Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська морська академія»
Навчально-науковий інститут інженерії (ННІІ)
Одеське відділення інституту морської техніки, науки і технології
(Великобританія)

МАТЕРІАЛИ

Науково-технічної конференції молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт"

20.11.2025

Одеса – 2025

Матеріали науково-технічної конференції молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт", 20.11.2025. – Одеса: НУ «ОМА», 2025. –238 с.

Матеріали публікуються згідно з поданими авторами оригіналами.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова:

Захарченко В. М. – д.т.н., професор, в.о. ректора Національного університету «Одеська морська академія» (НУОМА), проректор з науково-педагогічної роботи.

Заступники голови:

Ворохобін І.І.- д.т.н., професор, проректор з учбової роботи НУОМА;

Міюсов М. В – д.т.н., професор, радник ректора НУОМА;

Колегаєв М. О. – к.т.н., професор, директор навчально-наукового інституту інженерії (ННІІ) НУОМА;

Кар'янський С. А.– к.т.н., доцент, почесний секретар відділення Інституту морської техніки, науки та технології (Великобританія);

Савчук В. Д. – к.т.н., професор, начальник НДЧ НУОМА;

Члени оргкомітету:

Богач В. М. – к.т.н., доцент, завідувач кафедри інженерної механіки і судноремонту НУОМА;

Веретеннік О.М. – д.т.н., професор кафедри кафедри суднових енергетичних установок НУОМА;

Голіков В. А. – д.т.н., професор, завідувач кафедри технічної експлуатації флоту НУОМА;

Горб С. І. – д.т.н., професор, завідувач кафедри теорії автоматичного керування та обчислювальної техніки НУОМА;

Журавльов Ю.І. – к.т.н., доцент кафедри інженерної механіки і судноремонту НУОМА;

Кіріс О. В.– к.т.н., професор кафедри суднових енергетичних установок НУОМА;

Козицький С. В. – д.ф.–м.н., професор кафедри інженерної механіки і судноремонту НУОМА;

Малахов О.В. – д.ф.– м.н., професор кафедри суднових допоміжних установок і холодильної техніки НУОМА;

Нікольський В. В. – д.т.н., професор кафедри технічної експлуатації флоту НУОМА;

Цинова М.В.–к.ф.н., доцент, завідувач кафедри англійської мови в морській інженерії НУОМА;

Обертюр К.Л. – к.т.н., заст. директора ННІІ, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та захисту довкілля;

Парменова Д.Г.– к.т.н., доцент, завідувач кафедри безпеки життєдіяльності та захисту довкілля;

Половинка Е. М. – д.т.н., професор кафедри суднових енергетичних установок НУОМА;

Сагін С.В. – д.т.н., професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок НУОМА;
Харченко Р. Ю. – к.т.н., зав. аспірантурой та докторантурой НУОМА;
Хлієва О. Я. – д.т.н., професор, завідувач кафедри суднових допоміжних установок і холодильної техніки НУОМА.
Шестопалов К. О. - д.т.н., доцент кафедри суднових допоміжних установок і холодильної техніки НУОМА.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦІЇ:

Секція 1. Суднові енергетичні установки і системи.
Секція 2. Експлуатація і ремонт СЕУ.

ЗМІСТ

СУДНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ І СИСТЕМИ....................................8

Абрамов Н. С., Аболєшкін С.Є. Поліпшення показників робочого процесу суднових дизелів при використанні палив з низьким вмістом сірки 8

Будулатій Д.Є., Міюсов М.В. Поновлення експлуатаційних показників моторних мастил суднових дизелів 11

Бурілов Д. А., Половинка Э.М. Вдосконалення процесу упорскування палива суднових дизелів 15

Горайчук С.С., Парменова Д.Г. Підвищення ефективності сепарації нафтовмісних вод у суднових умовах 22

Дадукін М.Б., Парменова Д.Г. Забезпечення екологічної відповідності суднових систем очищення вод..26

Дворницький О.О., Глазєва О.В. Сучасні тенденції застосування акумуляторних батарей в електрорусі морських суден 32

Катеринич І. О., Половинка Э.М. Вдосконалення контролю робочих процесів суднових дизелів 38

Караваєв М.А., Колегаєв М.О. Забезпечення дотримання екологічних норм судновими дизелями в районах контролю за викидами 43

Кривоколісько І.І., Колегаєв М.О. Технологічні засоби та системи управління очищенням нафтовмісних вод на морських суднах 48

Кроть М.М., Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизелів 53

Кобецькой Д.В., Фрасинюк І.І. Підвищення екологічності та економічного суднових дизелів під час використання альтернативних видів палива 58

Манзюк П.С., Міюсов М.В. Забезпечення необхідного рівня емісії оксидів азоту суднових дизелів...63

Іонченко Д.К., Колегаєв М. О. Підвищення ефективності фільтрації суднових нафтовмісних вод..68

Сокол Д.Р., Заблоцький Ю.В. Підвищення ефективності очищення суднових вод, що містять нафту..72

Тігінян В., Фрасинюк І.І. Аналіз змін експлуатаційних показників роботи суднових дизелів під час використання хімічної обробки палива 77

Турбін В.О., Міюсов М.В. Використання скруберних систем очищення випускних газів суднових дизелів...82

Чуйкін І.С., Колегаєв М.О. Підвищення ефективності процесу мащення циліндрової групи суднових крейцкопфних дизелів 87

Ушаков О.І., Заблоцький Ю.В. Підвищення екологічності роботи морських суден 93

Вишталюк М.О. Забезпечення процесу мащення підшипникових вузлів суднових дизелів……………………………………………………………...98

Воронков Г.С., Заблоцький Ю.В. Зниження емісії оксидів азоту з під час експлуатації дизелів суден морського транспорту…………………………..103
Елефтеріаді К.К., Колегаєв М.О.Забезпечення екологічності роботи морських суден під час їх експлуатації в особливих районах……………...107
Мошківський А.А.Підвищення екологічності роботи суднових дизелів шляхом перепуску випускних газів………………………………………..113
Однолько Б.Ю. Забезпечення експлуатаційних характеристик палива для суднових дизелів……………………………………………………….…..119
Сиваєв М.М.Підвищення ефективності очищення суднових важких палив124
Сторчеус Е.В. Оптимізація роботи паливної апаратури суднових дизелів під час їх експлуатації на часткових режимах…………………………………...129
Маневський В.В. Забезпечення діагностування та контролю робочого процесу суднових дизелів……………………………………………………135
Борецький Є.О. Забезпечення міжнародних вимог під час проведення баластних операцій на суднах морського транспорту……………..................140
ЕКСПЛУАТАЦІЯ І РЕМОНТ СЕУ 145
Бабак Є. В., Голіков В. А. Оптимізація режимів роботи систем охолодження суднової енергетичної установки 145
Баловнєв А.І., Нікольский В.В. Підвищення надійності роботи двопаливної дизельної енергетичної установки танкера – газовоза..................................147
Вожжов О. О., Козьміних М.А. Порівняльний аналіз систем скраплення пари вантажу суден LPG. 150
Данілов К. С., Голіков В. А. Підвищення ефективності роботи енергетичної установки контейнеров ОЗА..155
Дерев`яний С.С., Шестопалов К. О. Аналіз впливу зовнішніх умов на ефективність роботи азотного контуру установки реконденсації відпарного газу на LNG-танкерах 160
Ващенко В.О., Корзунов О.О., Богач В.М. Основи відновлення працездатності сполучень деталей ЦПГ...163
Каліновський Р. О., Довиденко Ю. М. Підвищення ефективності використання палива в суднових дизелях шляхом його гомогенізації.........166
Поклонський Є.А., Корбан В. Х. Контроль технічного стану металевого корпусу судна радіохвилевим методом 170
Кіценко Є.О., Шестопалов К. О. Огляд холодоагентів для суднового холодильного обладнання 176
Крицький К.В., Хлієва О. Я. Аналіз аварійних ситуацій холодильних машин рефконтейнерів під час їх транспортування судном контейнеровозом........180
Константинов О. О., Козьміних М.А. Аналіз ефективності використання холодильних агентів в холодильному обладнанні рефрижераторних контейнерів...185

Майстренко М. О., Козьміних М.А. Аналіз можливості застосування сучасних холодильних агентів в суднових системах комфортного кондиціонування. 191
Матвієнко І. С., Голіков В. А. Підвищення ефективності експлуатації суднових систем комфортного кондиціонування повітря.............................196
Назаренко М.С., Нікольский В.В. Модернізація системи моніторингу параметрів суднового дизеля з електронним управлінням 200
Петрусенко О.Д., Шумілова К. В. Ефективність перспективи переведення флоту на використання низьковуглецевого або безвуглецевого палива 202
Сальніков В. О., Шумілова К. В. Використання скруберних систем для скорочення викидів CO_2 на великотоннажних танкерах 209
Ткачов Т.І., Хлієва О. Я. Аналіз впливу температури забортної води на енергоефективність установки реконденсації парів LPG на танкерах-газовозах 213
Янцелевич О.С., Сагін С.В. Підтримання експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил 216
Hlazyrin M., Khliyeva O., Tsynova M. Analysis of the Influence of Operating Parameters on the Efficiency of Ship Heat Exchangers 221
Rudyk K., Khliyeva O., Tsynova M. Fuel consumption analysis during different types of ship inert gas generators operation...224
Kharchenko K., Khliyeva O., Tsynova M. Environmental Problems of Refrigerant Replacement and Retrofit in Marine Refrigeration Equipment...........................228
Solomko M.Yu., Prodanov Yu. O., Zhuravlov Yu. I. Features of repair of frame, crank and head bearings under vessel operating conditions................................232

СУДНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ І СИСТЕМИ

УДК 621.438

Абрамов Н. С., Аболєшкін С.Є.
Національний університет "Одеська морська академія"

Поліпшення показників робочого процесу суднових дизелів при використанні палив з низьким вмістом сірки

Паливна апаратура (ПА) є найбільш складною і дорогою частиною сучасного суднового двигуна. Вона робить істотний вплив на надійність, економічність і екологічність роботи двигуна. Знос деталей, що труться сполучень ПА є однією з основних причин зниження ресурсу суднових двигунів.

В даний час спостерігається тенденція до зменшення вмісту сірки в бункерних паливах для суднових двигунів з метою поліпшення їх екологічних характеристик

Дистилятні палива є мастильним матеріалом для рухомих деталей ПА. Найбільш схильні до зносу прецизійні вузли паливного насоса високого тиску і форсунок. Зниження вмісту сірки в паливі призводить до погіршення їх протизносних властивостей, внаслідок чого відбувається збільшення зносу тертьових пар ПА двигунів.

Крім того, видалення сірки з палива в процесі гідроочищення провід до видалення поверхнево-активні речовини (ПАР), які сприяють утворенню змащувальних плівок на поверхні металу..

При експлуатації дизелів на таких паливах йде інтенсивне зношування, як плунжера, так і втулки ПНВТ. Знос цих деталей призводить до збільшення зазорів в сполученні. При збільшенні зазорів плунжерних пар знижується подача палива, погіршується якість розпилювання, порушується регулювання паливного насоса, виникають перебої в роботі двигуна і навіть його зупинки.

Існує ряд способів для регулювання протизносних властивостей палив відповідно до сучасних вимог. Перший - це застосування спеціальних протизносних присадок. Іншим є поліпшення триботехнічних характеристик палив за рахунок додавання в дистиллятное паливо масла рослинного походження (рапсове, соєве, соняшникове, пальмове і ін.), біодизеля або мінерального масла в певних співвідношеннях.

Виконані дослідження трибологічних характеристик ДП з різним вмістом сірки дозволило зафіксувати значне погіршення протизносних властивостей ДП. Величина ДПІ збільшується на 41%. Причому відбувається різке зростання цього показника (на 18%) вже після першого циклу знесірчення, коли вміст сірки в паливі ще досить високо і становить 0,349% мас. А при вмісті сірки 0,22% мас. величина ДПІ практично досягає свого максимального значення і подальше зниження концентрації сірки в паливі практично не викликає збільшення зносу пар тертя (рис.1).

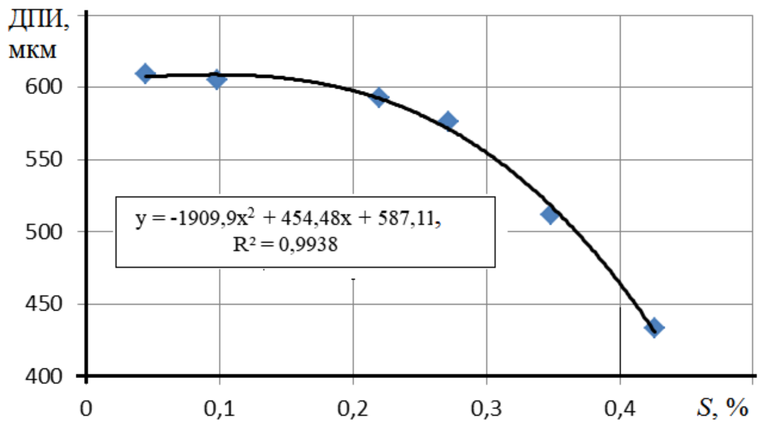


Рис.1 Вплив вмісту сірки на трибологические властивості ДП

Аналіз фізико-хімічних властивостей рослинних масел показує, що в молекулах рослинних масел міститься значна кількість атомів кисню (близько 10%). Це призводить до зниження їх теплоти згорання, але одночасно це знижує температуру, внаслідок чого значно поліпшуються екологічні властивості цих палив. При роботі дизелів на рослинних маслах відзначається зниження димності відпрацьованих газів і концентрації в них продуктів неповного згоряння палива.

Для поліпшення триботехнічних властивостей ДП є додавання мінеральних мастильних матеріалів, які володіють високою в'язкістю, відмінну адгезію, хорошими змащувальні властивості.

Протизносні властивості експериментальних сумішей можна оцінювати по діаметру плями зносу кульок. Дослідження проводили при різних співвідношеннях ДП і добавок. Результати випробувань представлені на рис.2.

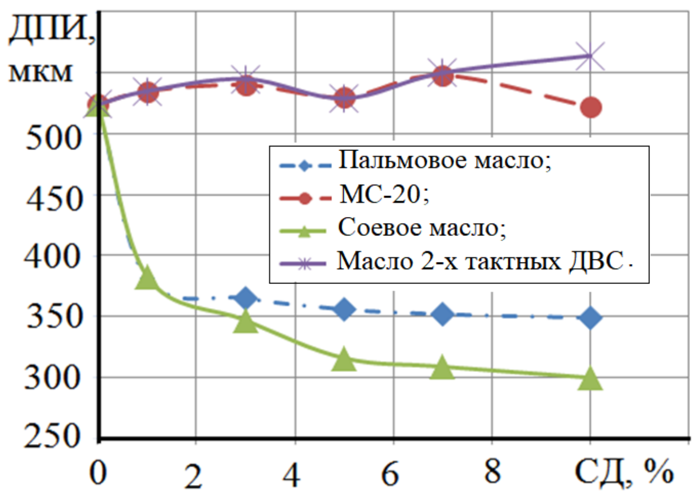


Рис.2 Вплив концентрації рослинних і мінеральних масел в суміші з ДП на ДПІ

Додавання рослинного масла в ДП покращує його здатність, що змазує, т. К. В хімічному складі рослинного масла міститься значна кількість органічних ПАР, зокрема олеїнової кислоти, які сприяють створенню хемосорбціонних плівок на поверхні металу в процесі тертя, в результаті чого зменшується знос паливної апаратури.

Комплексний аналіз, що включає в себе дослідження фізико-хімічних і трибологічних властивостей сумішевих палив, а також проведений моторний експеримент дозволили встановити оптимальну концентрацію рослинних масел в ДП. Вона становить 1-3%. Подальше збільшення вмісту масел недоцільно, так як дає незначний триботехнический ефект, але при цьому погіршуються фізико-хімічні показники суднового палива.

Література

1. Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. – М.: МАДИ (ТУ), 2000. – 311 с.
2. Смирнова, Т.Н. Биодизель альтернативное топливо для дизелей / Т.Н. Смирнова, В.М. Подгаецкий // Двигатель. - 2007. - № 1. - С. 32 - 36.
3. MARPOL, Annex VI- Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships, Chapter 3 - Requirements for control of emissions from ships, Regulation 14 - Sulphur oxides (SOx), http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphuroxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx

УДК 629.5

Будулатій Д.Є., Міюсов М.В.
Національний університет "Одеська морська академія"

Поновлення експлуатаційних показників моторних мастил суднових дизелів

Постановка проблеми. Дизельні двигуни, що застосовуються на морських і річкових суднах як головні або допоміжні енергетичні установки, уже понад п’ятдесят років зберігають провідне положення серед теплових двигунів. Подальше їх удосконалення спрямоване на збільшення агрегатної потужності, підвищення ефективності та зменшення витрат палива. Значним чинником, що впливає на ці параметри, є якість моторних мастил, які забезпечують змащування і відведення тепла від деталей, що труться. У процесі роботи мастильний матеріал поступово або різко втрачає свої основні властивості — передусім в’язкість і лужне число, що зумовлено забрудненням продуктами неповного згоряння та частинками зносу поверхонь тертя. Головним способом видалення таких домішок у системах циркуляційного мащення залишається багатоступенева фільтрація [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних суднових дизелях застосовується схема безперервного очищення мастил, яка працює протягом усього часу функціонування двигуна. Ефективність очищення забезпечується послідовністю кількох ступенів:

1) попереднє очищення за допомогою сітчастих елементів, що запобігають проникненню великих сторонніх домішок;

2) грубе очищення, яке здійснюється повнопотоковими фільтрами та дозволяє вилучати частки розміром 40…250 мкм;

3) тонке очищення, що реалізується фільтрами тонкої очистки або відцентровими сепараторами, які видаляють частинки від 4…5 мкм;

4) додаткове очищення у порожнинах шатунних шийок під дією відцентрових сил, а також можливе застосування магнітних, хімічних чи електричних методів.

Ефективність роботи суднових дизелів значною мірою залежить від здатності систем очищення регенерувати властивості мастильних матеріалів. Тому фільтрація є одним із ключових напрямів забезпечення надійної роботи двигунів.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення комплексу науково обґрунтованих рішень, що спрямовані на відновлення експлуатаційних показників моторних мастил у суднових дизелях.

Основний матеріал дослідження. У системах мащення сучасних чотиритактних двигунів провідне місце займають повнопотокові та комбіновані схеми очищення мастила. Їхнє широке впровадження зумовлене посиленням форсування двигунів, використанням важких остаточних палив, а також збільшенням механічних та термічних навантажень, що виникають у зонах тертя [1, 2].

Однією з основних причин відмови від частковопотокового фільтрування є перехід суднових дизелів від легких палив (в'язкістю 15…20 сСт при 40 °С) до важких залишкових палив, в'язкість яких може сягати 750 сСт. Частковопотокові фільтри не можуть забезпечити необхідну інтенсивність очищення через недостатнє відділення дрібних нерозчинних частинок, які формуються на поверхнях циліндрових втулок та поршневих кілець. Фільтри грубого очищення також виявилися недостатньо ефективними під час забезпечення тривалих ресурсних характеристик двигунів [1].

Впровадження повнопотокових фільтрів тонкого очищення значно підвищило захист контактних поверхонь, оскільки забезпечувало проходження через фільтр усього потоку мастила, що подається до внутрішніх каналів двигуна. Це сприяло суттєвому зменшенню концентрації нерозчинних частинок, які прискорюють окислення мастил і погіршують їхню стійкість [3, 4].

Сучасні двигуни мають циркуляційні системи, у яких усе мастило перед надходженням до зони мащення проходить через фільтрувальний елемент з номінальною тонкістю 15…25 мкм. Це практично унеможливлює потрапляння часток більших за зазначені значення до поверхонь тертя.

Ефективність різних схем фільтрації підтверджується даними щодо зношування основних деталей (рис. 1). Найменше зношування спостерігається при застосуванні повнопотокових фільтрів тонкого очищення. Найбільше покращення фіксується у вкладишах підшипників і шийках колінчастого вала: інтенсивність їх зношування зменшується у 1,85 разу порівняно з частковопотоковими схемами. При застосуванні лише грубого очищення зношування збільшується в 2,44 разу.

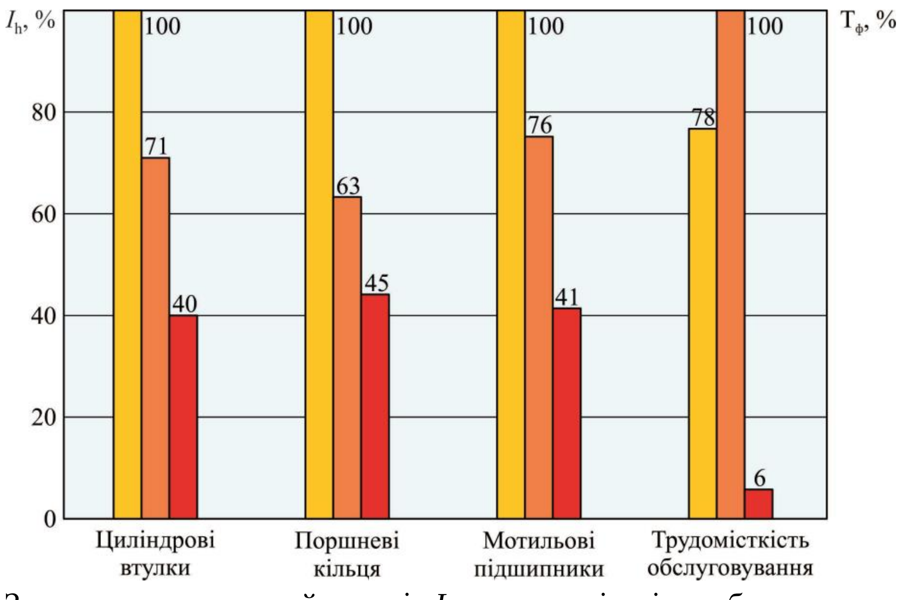


Рис. 1 Знос основних деталей дизелів I_h та трудомісткість обслуговування $T_ф$ фільтрів під час використання в циркуляційних системах мащення різних схем очищення: 1 – грубе очищення; 2 – частково потокове очищення; 3 – повно потокове очищення

Таблиця 1. Порівняння схем очищення моторного мастила суднових дизелів

Показник очищувача мастила	Схема очистки					
	повнопотокова			частковопотокова		
	фільтр	центрифуга	фільтр зі зворотним промиванням	фільтр	центрифуга	сепаратор
Діапазон потужності двигуна в системі якого можливо використання, кВт	3…5000	30…600	100…15000	30…7000	50…3000	300…15000
Продуктивність очисника загальна питома	 0,05…40 105±32	 0,1…2,0 138±41	 1,0…300 126±37	 0,01…4,0 7,2±2,4	 0,03…1 46±12	 0,2…4,5 2,1±0,5
Тонкість відсіву, мкм	31±7	27±5	36±12	17±3	21±6	5±2
Ймовірність захисту пар тертя дизеля від потрапляння великих абразивних часток, %	100	100	84±16	64±9	66±18	68±6
Питома інтенсивність очищення мастила від нерозчинених продуктів, $\times 10^{-9}$, $м^3/(с \cdot кг)$	0,5±0,2	2,6±1,1	0,15±0,06	1,6±0,9	3,4±1,3	2,7±1,4
Питома брудноємність очищувача, $\times 10^{-6}$, $м^3/кг$	72±25	123±42	59±19	105±31	168±45	9±3
Час, що необхідний для постійного обслуговування за термін експлуатації, год	696±213	206±52	1232±364	468±114	247±64	116±36
Питома трудомісткість обслуговування, $\times 10^{6}$, люд.·год/(кВт·год)	1,7±0,6	19,1±6,8	1,3±0,4	2,8±0,7	12,6±5,3	4,7±2,4
Питомі енерговитрати на роботу очищувача, $\times 10^{3}$, кВт/кВт	0,7±0,4	1,3±0,5	0,8±0,4	0,2±0,1	0,3±0,1	1,2±0,4

У таблиці 1 подано узагальнення параметрів різних типів очищувачів мастила. Повнопотокові системи мають тонкість 20…50 мкм, частковопотокові – 5…25 мкм. Ймовірність затримання великих часток становить 80–100 % у повнопотокових фільтрів та 5…40 % – у частковопотокових. Найвища інтенсивність очищення спостерігається у відцентрових сепараторів, хоча вони потребують більших енерговитрат і значніших трудових затрат.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження дозволяє сформулювати такі висновки:

1) комбіноване застосування фільтрів різних типів підвищує ефективність очищення мастил і збільшує ресурс двигуна;

2) необхідним є розмежування функцій між фільтрами повного та часткового потоку;

3) доцільним є зниження кількості забруднень, що надходять у повнопотокові фільтри;

4) слід підвищувати інтенсивність очищення в частковопотокових елементах;

5) підвищення надійності можливе за рахунок удосконалення конструктивних та технологічних параметрів очищувачів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991

2. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26-32.doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698.

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

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

5. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuˇcera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1373. https://doi.org/10.3390/jmse1010137.

УДК 621.431.74

Бурілов Д. А., Половинка Э.М.
Національний університет "Одеська морська академія"

Вдосконалення процесу упорскування палива суднових дизелів

Основними факторами, що впливають на процес тепловиділення в двигуні, є характеристики процесу подачі та впорскування палива в камеру згоряння і якість сумішоутворення.

Двигунобудівники давно прагнули до створення такої системи управління двигунами, яка забезпечила б гнучкість в управлінні подачею палива і фазами газорозподілу. Це дозволило б їх оптимізувати стосовно кожного конкретного режиму роботи з метою досягнення високої економічності в широкому діапазоні навантажень і швидкостей, зниження емісії шкідливих складових вихлопу і ін.

У зв'язку з цим вдосконаленням у розвитку процесів упорскування палива в даний час приділяється значна увага. Поряд з удосконаленням традиційних систем подачі палива з'явився цілий ряд принципово нових схем організації уприскування палива в камеру згоряння, до числа яких можна віднести системи упорскування з гідравлічним приводом плунжера паливного насоса високого тиску (ПНВТ) і акумуляторні системи упорскування, які отримали узагальнену назву Common Rail.

Значний прорив у вдосконаленні паливних систем суднових двигунів внутрішнього згоряння (СДВЗ) пов'язаний з розвитком електроніки і мікропроцесорної техніки. Це, в свою чергу, призвело до підвищення їх паливної економічності, зниження шкідливих викидів з відпрацьованими газами, а поєднання функції управління з функцією діагностики двигуна електронною системою управління дозволило значно підвищити надійність паливних систем і дизелів в цілому.

Експериментальне дослідження та реєстрація вимірів процесів впорскування палива.

Для вимірювання тиску при дослідженні паливної апаратури дизелів використовують датчики різних типів і конструкцій. До датчиків, що застосовуються при дослідженнях магістралей низького тиску, особливих вимог не висувають, тому тут можуть бути використані будь-які наявні перетворювачі тиску.

До датчиків, що встановлюються у систему високого тиску, крім вимог до частотній характеристиці, пред'являється друга дуже важлива і жорстка вимога - про мінімальний власний обсяг датчика. Це пов'язано з тим, що власний обсяг датчика збільшує обсяг трубопроводу високого тиску, який істотно впливає на закономірності процесу подачі палива. Третьою вимогою є висока міцність датчика, що дозволяє йому сприймати дуже високі (до кількох сотень і навіть тисяч бар) тиску, характерні для процесу безкомпресорної подачі палива.

Незалежно від типу використовуваного в датчику перетворювача, конструктивне виконання всіх датчиків високого тиску майже однаково. Найбільшого поширення набули тензометричні, ємнісні і п'єзоелектричні датчики.

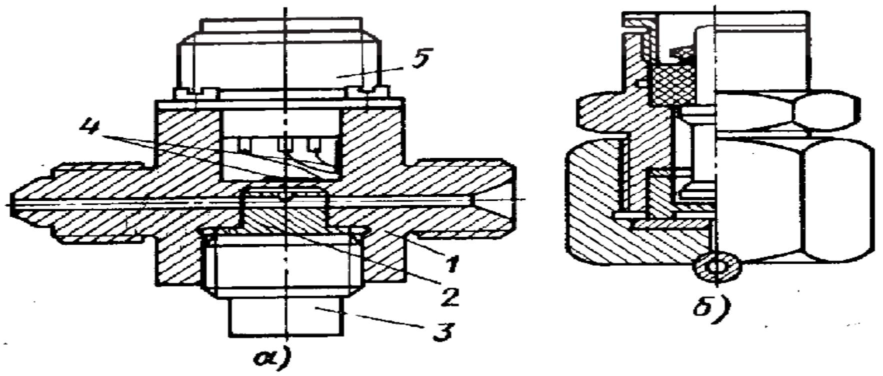


Рис. 1 Датчики високого тиску для індиціювання тисків в нагнітальному трубопро-воді паливної апаратури:
а — тензометричний; б — фірми «Діза Електроніка»

Датчики реєстрації переміщення деталей паливної апаратури

Найбільшого поширення набули індуктивні датчики переміщення, які використовуються з серійної тензометричної апаратурою; рідше застосовуються ємкісні, фотоелектричні і тензометричні датчики.

Приклад конструкції ємнісного датчика для визначення величини підйому голки форсунки наведено на рис. 2а. Відмінною особливістю датчиків цього типу є простота і мінімальні габаритні розміри. Застосування фотоелектричних датчиків для цього нераціонально, так як при інших рівних умовах вони значно складніше конструктивно.

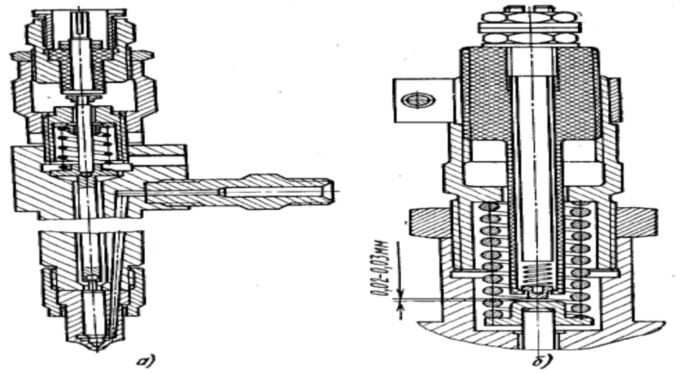


Рис. 2 Датчики переміщення голки форсунки
а – ємнісний, б – контактний

Деяке застосування при випробуваннях паливної апаратури знаходять контактні датчики підйому голки форсунки (рис. 2б). Вони реєструють (з деякою похибкою) тільки початок і кінець уприскування. Особливо зручні ці датчики для безпосереднього нанесення відповідних відміток на індикаторну діаграму при індиціювання двигуна індикатором МАІ-2. Таким чином, наприклад, легко визначається період затримки самозаймання.

При дуже малому діаметрі соплових отворів далекобійність факела зменшується, а дрібні краплі, володіючи малим імпульсом, швидко втрачають свою швидкість і концентруються навколо розпилювача, де для повного згоряння палива недостатньо повітря. У той же час на периферії камери залишається повітря, не залучене в процес згоряння. Ситуація ускладнюється ще й тим, що збільшення конусності факелів розпилювання від декількох периферійних отворів веде до взаємопроникнення аерозолю одного факела в інший (рис. 3а). У результаті формуються зони надзвичайно збагачені паливом, ефективне згорання в яких просто неможливо. Поява зон перекриття факелів може бути викликано і рухливістю заряду в камері згоряння, особливо при нецентральному розташуванні форсунок. У зв'язку з цим при оптимізації процесів сумішоутворення необхідно враховувати вплив на цей процес ступеня і характеру турбулізації повітряного заряду в камері згоряння.

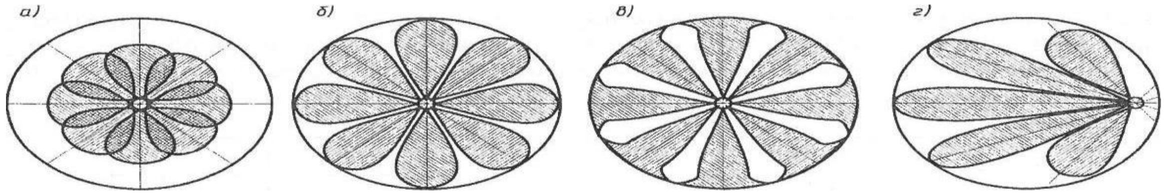


Рис.3 Розподіл факелів розпилювання залежно від діаметрів отворів розпилювача: а - накладення факелів при збільшених кутах конусності; б - оптимальний розподіл факелів по об'єму камери згоряння; в - натікання факелів на стінки гільзи циліндра; г - використання соплових отворів з різним діаметром при периферійному розташуванні форсунки

Можливість регулювати за допомогою діаметра отвору конусність і далекобійність факела розпилювання палива особливо цінна при доведенні процесу сумішоутворення у двигунів з периферійним розташуванням форсунок. Найчастіше для рівномірного покриття аерозолем обсягу камери згоряння в розпилювачі таких двигунів використовують соплові отвори різного діаметра (рис. 3г).

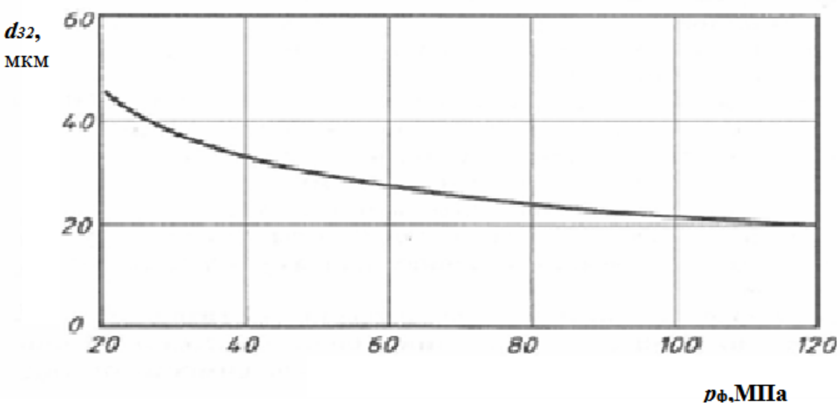


Рис. 4. Вплив тиску впорскування на d_{32} крапель аерозолю легкого палива ($d_р$-0,4 мм; ρ_a = 25 кг / м3; s = 120 мм)

Дисперсність розпилювання, необхідна для забезпечення якісногозгоряння палива в дизелі, досягається при швидкості витікання палива з сопла w = 250 ... 400 м / с, яка залежить переважно від тиску перед розпилювачем $p_ф$ (рис. 4) .

Для якісного розпилювання важких палив тиск впорскування має бути досить великим (вище 60 МПа), що пов'язано з більш високою в'язкістю.

Уданий час акумуляторна система впорскування палива використовується на малообертових дизелях серії RT-flex, вироблених фірмою Wärtsilä, яка успадкувала розробки фірми Sulzer, що випустила перший двигун даної серії в 2001 році. Система (рис. 5) була спроектована для роботи на важкому залишковому паливі HFO відповідно до специфікації ISO DIN 8217 (в'язкість до 700 сСт при 50°С) при температуре до 150°С.

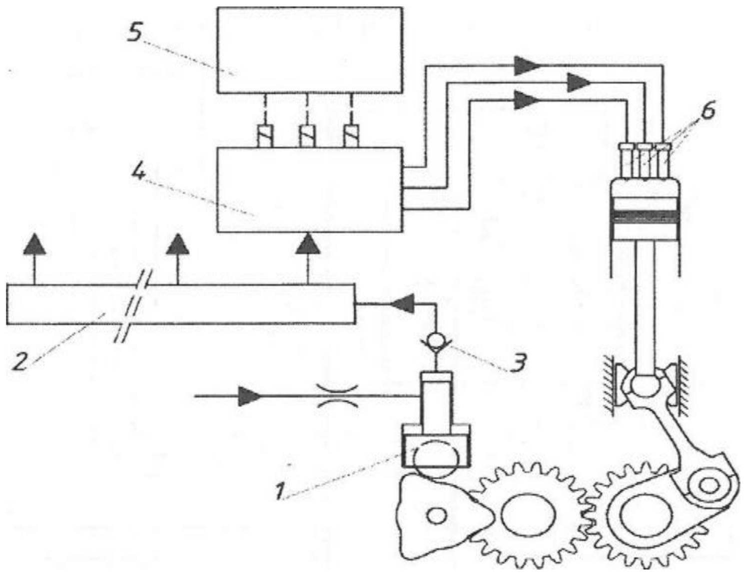


Рис. 5. Схема акумуляторної системи впорскування двигунів серії RT-flex фірми Wärtsilä: 1 - ПНВТ; 2 - акумулятор тиску; 3 - зворотній клапан; 4 - блок керування подачею палива; 5 - мікропроцесорний контролер WECS-9500; 6 – форсунки

Паливо під тиском 100 МПа через безповоротний клапан надходить в акумулятор великого обсягу, який представляє собою товстостінну трубу, простягнуту вздовж усього двигуна. Управління подачею палива здійснюється встановленим на кожному циліндрі блоком управління уприскуванням, на який надходять сигнали від мікропроцесорного блоку WECS 9500. Під дією цих сигналів швидкодіючі керуючі клапана відкривають або закривають доступ палива до стандартних паливних форсунок, які здійснюють впорскування палива в камеру згоряння двигуна.

Великий об’єм головного акумулятора (рис. 6.) дозволяє забезпечити досить стабільний тиск на протязі всього впорскування навіть без використання газових або пружних компенсаторів тиску.

Принцип визначення витрати палива заснований на фіксації переміщення спеціального вимірювального поршня, розташованого в корпусі блоку управління.

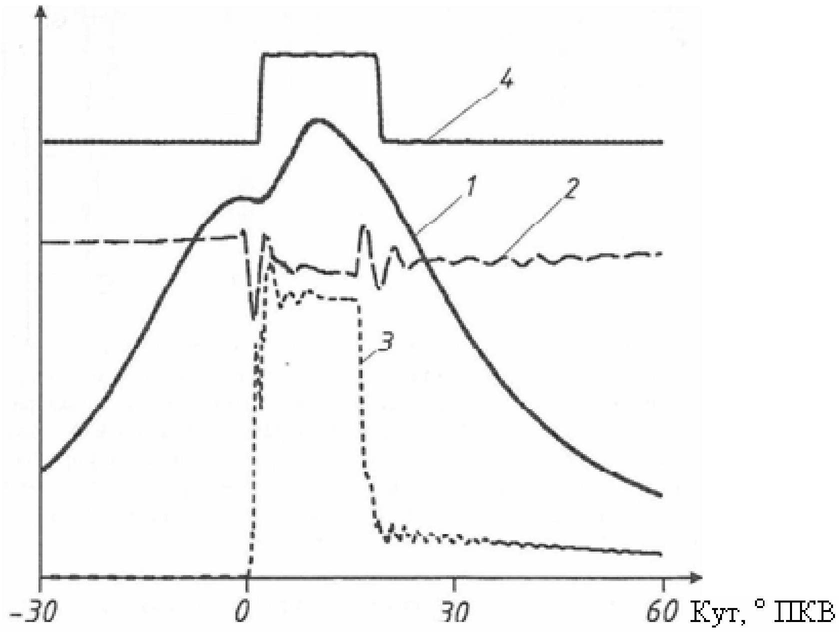


Рис. 6. Процес упорскування палива акумуляторною системою подачі палива дизеля серії RT-flex: 1 - крива тиску в циліндрі; 2 - тиск в головному акумуляторі; 3 - тиск перед розпилювачем; 4 – підйом голки форсунки

Акумуляторна система подачі палива фірми MAN (7) виконана за дульною схемою, що дозволяє використовувати її на різних моделях двигунів без істотних змін в конструкції окремих елементів.

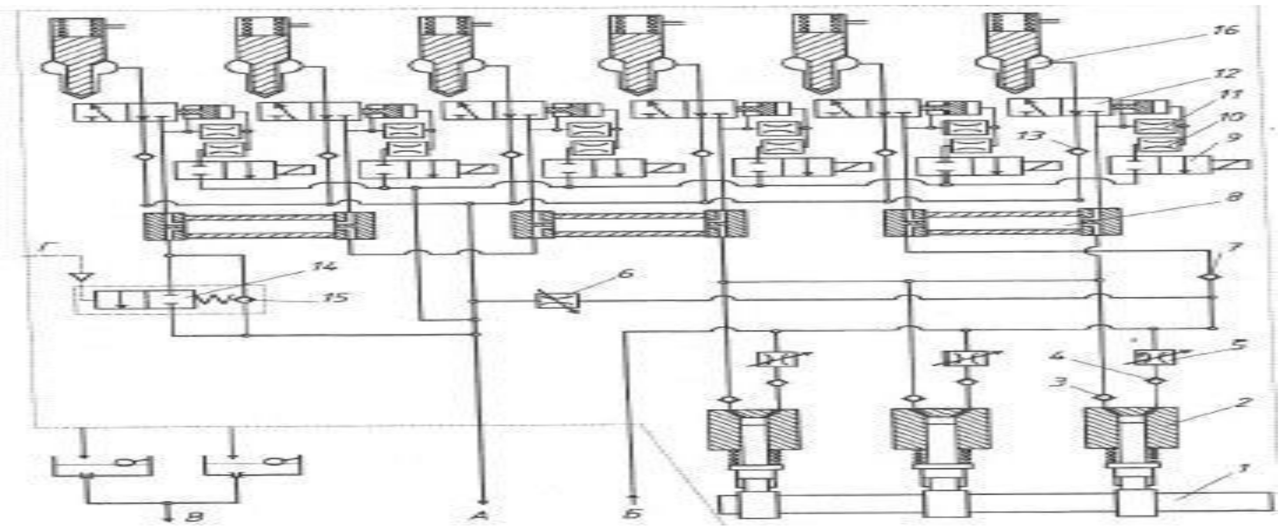


Рис. 7. Гідравлічна схема акумуляторної паливної системи середньооборотних двигунів фірми MAN.

На схемі позначені наступні вузли паливної системи: 1 - вал приводу насосів; 2 - паливні насоси високого тиску; 3 - нагнітальний клапан; 4 - всмоктувальний клапан; 5 - дросель регулювання подачі; 6 - дросель для підтримки перепаду тисків; 7 - зворотний клапан збільшення витрати при промиванні системи; 8 - акумулятор; 9 - пусковий клапан з електромагнітним приводом; 10 - дросель пускового клапана;11 - дросель головного клапана управління подачею; 12 - головний клапан управління подачею; 13 - зворотний клапан зливний порожнини; 14 - клапан прокачування системи і аварійного скидання тиску; 15 - клапан-обмежувач високого тиску; 16 - форсунка. А - підведення палива; Б - злив палива; В - збір протікання; Г-підведення керуючого повітря

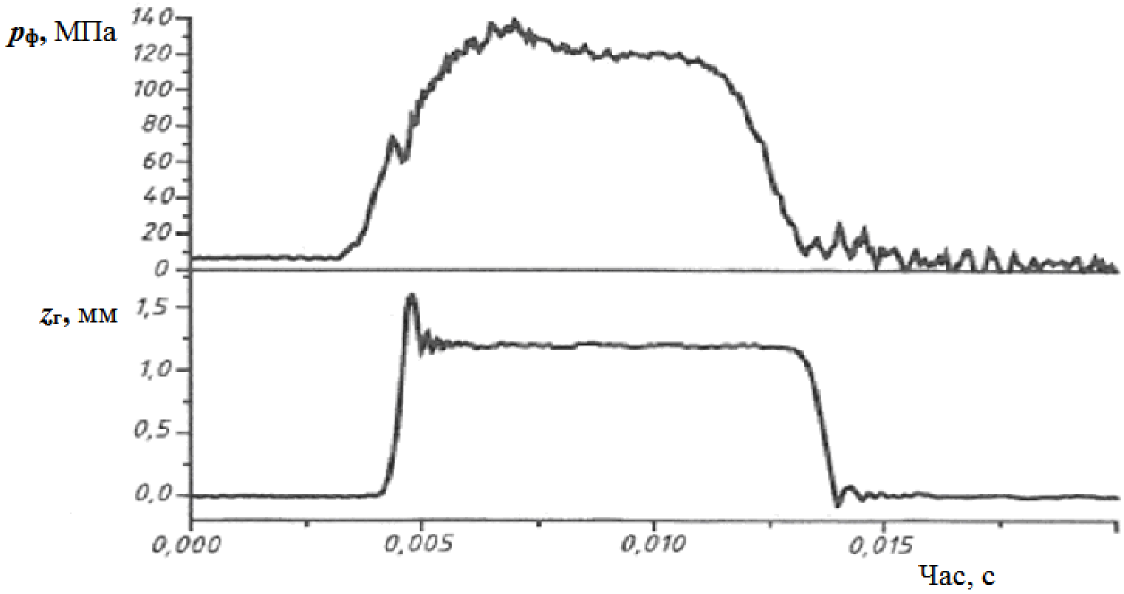


Рис.8. Осцилограми зміни тиску палива перед форсункою і крива підйому голки форсунки

Ретельний підбір і калібрування всіх елементів системи дозволили домогтися значних успіхів у організації робочого процесу двигуна.

На рис. 8 видно, що тиск перед форсункою дуже швидко наростає до максимуму і протягом всього впорскування мало змінюється.

Підбір окремих параметрів і алгоритмів керування дозволяє не тільки змінювати початок і кінець подачі палива, а й впливати на характер протікання кривої подачі, включаючи багатоступінчастий уприскування палива.

Фахівці вважають, що розроблена ними система здатна виконати не тільки існуючі, а й перспективні норми по обмеженням викидів шкідливих речовин.

В результаті досліджень встановлено:

1. Акумуляторна система забезпечує гнучке регулювання закону подачі і кількості палива, що впорскується, відповідно до заданого режиму швидкості та навантаження дизеля;
2. Займання і згоряння перших порцій призводить до того, що подальше паливо, незважаючи на гіршу якість розпилювання, надходить в середу з підвищеною температурою і тиском, в якій вже є осередки відкритого полум'я. Це сприяє швидкому випаровуванню наступних порцій палива та інтенсивному згорянню;
3. Наявність передвпорскування створює умови для більш м'якого і повного згоряння, так як основна подача відбувається в момент, коли в циліндрі з'являється полум'я від згоряє попередньо поданої порції палива. Тому займання основної маси відбувається практично миттєво і процес згоряння йде зі значно меншими швидкостями;

4. Зниження викидів NO_x у атмосферу у 2.5 разів та зменшення робочого тиску у циліндрі на більше ніж 22% при переході двигуна з режиму максимальної економічності на режим максимальної екологічності досягається завдяки відсутності в акумуляторних системах жорсткого алгоритму керування законом впорскування.

5. Для зниження дімності вихлопу вдаються до подачі невеликої додаткової порції палива в кінці згоряння, коли основна подача вже завершилася. Від згоряння свіжої порції палива інтенсифікуються процеси догоряння залишкових частинок вільного вуглецю і тим самим зменшує їх вміст у відпрацьованих газах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Білоусов Є. В. Паливні системи сучасних суднових дизелів : навчальний посібник / Є. В. Білоусов. - Херсон : ХДМА, 2014.-268 с.
2. ДЕСТ 15888-90 (ISO 7876/1-84). Апаратура дизелів паливна. Терміни та визначення. - введ. 01.01.92 - М. : ИПК. Видавництво стандартів, 1992.- 12 с.
3. MAN B&W New HFO Common Rail System for Medium speed Diesel Engines - Kyoto/Japan: CIMAC Congress, 2004 - 12p.
4. MAN B&W S60MC-C7 Project Guide Camshaft Controlled Two-stroke Engines. MAN Diesel a member of the MAN Group. - 2009. - 399 p.

УДК 628.168:629.5.03:620.92

Горайчук С.С., Парменова Д.Г.
Національний університет «Одеська морська академія»

Підвищення ефективності сепарації нафтовмісних вод у суднових умовах

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасний розвиток морського транспорту супроводжується зростанням кількості суден, що призводить до збільшення обсягів скидів нафтовмісних вод (ВМН) у води Світового океану. Забруднення морського середовища нафтою створює серйозну екологічну загрозу, оскільки навіть незначні концентрації нафтопродуктів негативно впливають на флору, фауну та якість води.

Традиційні методи очищення суднових вод – механічні, фізико-хімічні та біологічні. Недоліком традиційних методів очищення є схильність фільтрів до швидкого засмічення, особливо при наявності емульгованих нафтопродуктів, що знижує загальну ефективність системи та потребує частого технічного обслуговування. Тому актуальною науковою проблемою є пошук нових ефективних технологій очищення, які відповідали б вимогам Конвенції MARPOL 73/78 і забезпечували вміст нафти у стічній воді менше ніж 15 ppm. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є застосування нанотехнологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість сучасних джерел [1–3] присвячені вдосконаленню систем очищення лляльних вод, а саме відцентрових, коалесцентних і мембранних сепараторів. Дослідження вказують, що комбінування механічних і фізико-хімічних методів підвищує ефективність очищення, але не завжди забезпечує відповідність вимогам чинних екологічних нормативів.

Нові наукові підходи, такі як використання наноматеріалів, зокрема магнітних наночастинок, які можуть завдяки великій площі поверхні забезпечувати ефективну адсорбцію нафтопродуктів. Роботи [4–6] підтверджують, що використання наночастинок у фільтраційних і мембранних системах дозволяє зменшити вміст залишкової нафти до рівня менше 5 ppm, що відповідає вимогам MARPOL Annex I.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз технічного рішення з підвищення ефективності очищення нафтовмісних суднових вод із застосуванням нанотехнологій.

Для досягнення цієї мети були розв’язані наступні завдання:

– проведено аналіз сучасних методів очищення ВМН та їх недоліків;

– досліджено властивості наноматеріалів, придатних для сорбції нафтопродуктів;

– проаналізовані комбіновані системи очищення із наночастинками;

– зроблене порівняння ефективності очищення традиційних і нанотехнологічних систем;

– оцінено екологічну та економічну доцільність впровадження технології очищення нафтовмісних вод на суднах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Очищення суднових нафтовмісних вод здійснюється через поетапне видалення забруднень: спочатку механічне відстоювання або центрифугування, далі – коалесценція, флотація розчиненим повітрям, а завершальний етап – адсорбція або мембранна фільтрація.

Система PureBilge (BWPX 307), що використовує високошвидкісний відцентровий сепаратор (рис. 1), забезпечує очищення до 15 ppm, однак не видаляє дрібні емульговані фракції.

Запропонована комбінована система включає (рис. 2):

1. Первинне відокремлення грубих фракцій у гравітаційному сепараторі.

2. Магнітну наносорбцію.

3. Регенерацію наносорбенту за допомогою магнітного поля, що дозволяє повторне використання.

Термін окупності системи – близько 3 років за рахунок зниження штрафів і витрат на утилізацію відходів.

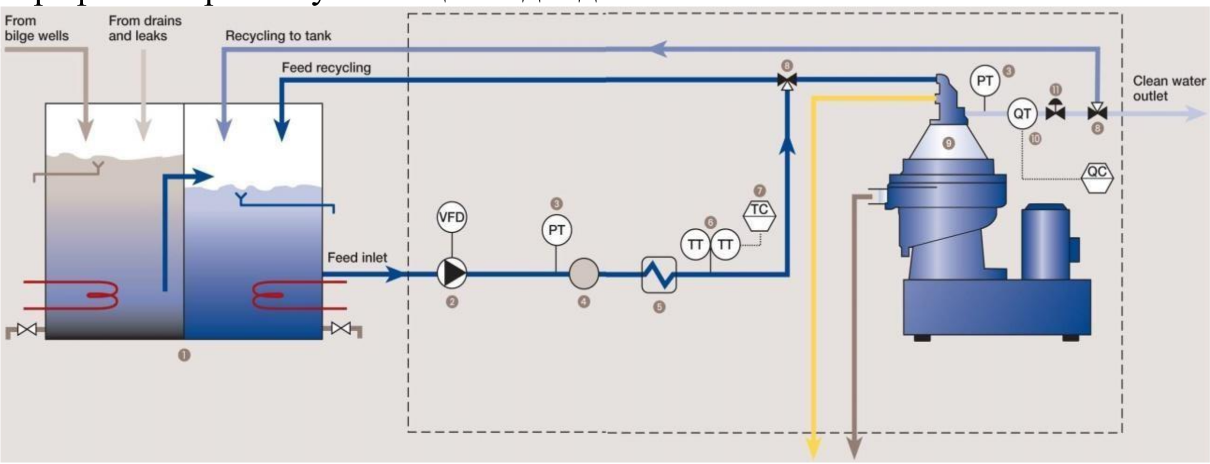


Рисунок 1 – Сепараційна установка PureBilge [7]:
1 – двохстадійний відстійний танк лляльних вод; 2 – живильний насос; 3 – манометр; 4 – фільтр; 5 – нагрівач; 6 – температурний трансмітер; 7 – температурний контролер; 8 – триходовий клапан переключення; 9 – BWPX 307 високошвидкісний відцентровий сепаратор; 10 – водо-мастильний колектор; 11 – моделюючий клапан постійного тиску

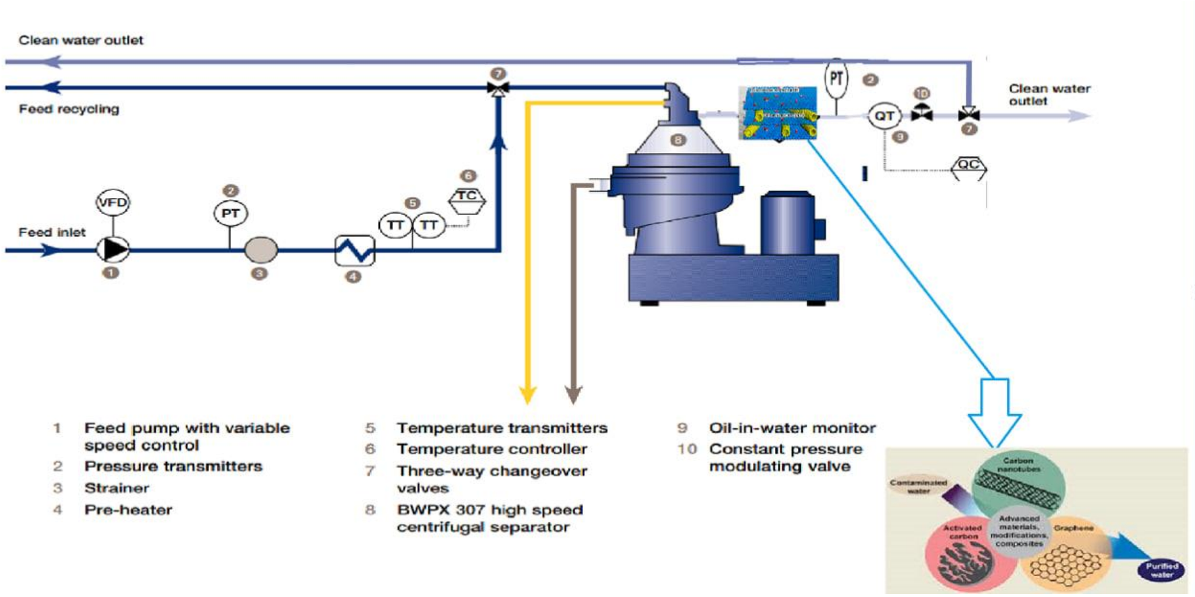


Рисунок 2 – Експериментальна схема поєднання системи відцентрового СЛВ із магнітною наносорбцією

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Доведено, що традиційні методи очищення не завжди забезпечують стабільного рівня очищення нижче 15ppm.
2. Застосування наночастинок підвищує ефективність очищення на 40–60 %.
3. Комбінована система очищення з нанотехнологічним модулем може бути інтегрована в існуючі суднові установки без значних конструктивних змін.
4. Використання наносорбентів є економічно доцільним і відповідає вимогам MARPOL 73/78.
5. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення процесів регенерації наноматеріалів і мінімізацію вартості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. MARPOL Consolidated Edition 2022. Articles, Protocols, Annexes and unified interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the 1978 and 1997 Protocols Incorporating all Amendments in Force on 1 November 2022. Seventh Edition, International Maritime Organization. London, 2022.
2. Alfa Laval. PureBilge System Manual, 2021.
3. Resolution MEPC.107(49) – Revised Guidelines and Specifications for Pollution Prevention Equipment for Machinery Space Bilges of Ships (Adopted on 18 July 2003), as amended by Resolution MEPC.285(70) (Adopted on 28 October 2016).
4. Amber J. Pete ,Bhuvnesh Bharti**,** Michael G. Benton**,**Nano-enhanced Bioremediation for Oil Spills: A Review,2021
5. Nurul Fattin Diana Junaidi, Nur Hidayati Othman , Nurul Syazana Fuzil , Muhammad Shafiq Mat Shayuti , Nur HashimahAlias , Munawar Zaman

Shahruddin , Fauziah Marpani , Woei Jye Lau , Ahmad FauziIsmail , NorFarah Diana Aba ,Recent development of graphene oxide-based membranes for oil–water separation: A review,2021

6. Qinghua Qin .,Research Progress and Applications of Carbon Nanotubes, Black Phosphorus, and Graphene-Based Nanomaterials: Insights from Computational Simulations, 2025

7. Alfa Laval Corporate AB. PureBilge: Technical information for bilge water treatment.

УДК 628.168:629.5.08

Дадукін М.Б., Парменова Д.Г.
Національний університет "Одеська морська академія"

Забезпечення екологічної відповідності суднових систем очищення вод

Постановка проблеми в загальному вигляді. Морський транспорт є основним видом транспорту в міжнародній торгівлі, забезпечуючи понад 80% світового вантажообігу, зокрема транспортування нафти, нафтопродуктів, зрідженого газу та хімічних речовин, обсяги яких постійно зростають. Це зумовлює підвищення вимог до суднових енергетичних установок, систем управління, безпеки та екологічного контролю. Ключову роль відіграє Додаток І Конвенції MARPOL 73/78, який регламентує запобігання нафтовому забрудненню моря та встановлює гранично допустиму концентрацію нафтопродуктів у лляльних водах (не більше 15 ppm) [1]. Особлива увага приділяється забрудненню моря лляльними водами, що містять нафтові домішки та токсичні компоненти, утворені під час роботи суднових енергетичних систем. Щорічний обсяг скидання лляльних вод суднами у світовий океан становить приблизно 16 730 тонн [2].

На сучасному флоті активно впроваджують автоматизовані системи, енергоефективні технології та засоби моніторингу, однак зростання технічної складності суден потребує оптимізації експлуатаційних процесів для зниження витрат і негативного впливу на довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження свідчать про необхідність подальшого вдосконалення наявних технологій обробки лляльних вод [6,7]. Попри впровадження комбінованих систем очищення, рівень очищення залишається недостатнім для повного вилучення шкідливих компонентів. Навіть після проходження систем очищення у стічних водах зберігаються залишкові концентрації паливно-мастильних матеріалів, поверхнево-активних речовин, важких металів та органічних сполук, які чинять токсичний вплив на гідробіонтів, сприяють накопиченню шкідливих речовин у донних відкладеннях та порушенню біогеохімічної рівноваги морських екосистем [2]. Це зумовлює необхідність подальшої оптимізації процесів очищення лляльних вод і розроблення більш ефективних технологічних рішень, спрямованих на мінімізацію антропогенного впливу судноплавства на довкілля.

Постановка завдання. Завданням дослідження є удосконалення підходів до очищення нафтовмісних лляльних вод на морських суднах шляхом комплексного аналізу. У межах роботи поєднується кількісна оцінка ризику скидання забруднених вод у морське середовище (з використанням методу Монте-Карло та регресійного аналізу) із вивченням конструктивних та функціональних особливостей суднових систем контролю вмісту нафти – системи моніторингу скиду нафтопродуктів (Oil Discharge Monitoring Equipment, ODME) і приладу для вимірювання вмісту нафти у воді (Oil Content Monitor, OCM). Такий підхід дозволяє встановити залежності між технічними характеристиками суден, обсягами утворення лляльних вод і потенційним екологічним ризиком, а також оцінити здатність наявного обладнання забезпечувати відповідність міжнародним екологічним стандартам MARPOL 73/78.

Виклад основного матеріалу дослідження. Морське середовище, що є найбільшою екосистемою планети, зазнає значного антропогенного тиску через забруднення нафтою, стічними водами, пластиком і токсичними речовинами, які негативно впливають на біорізноманіття, здоров'я людини та морську економіку. Однією з глобальних екологічних проблем є забруднення океанів нафтою та нафтовими продуктами [8]. Лляльна вода містить нафту, метали, поверхнево-активні речовини та інші токсичні компоненти, які утворюють стійкі емульсії, ускладнюючи процес очищення та спричиняючи небезпеку для морських екосистем [2]. Джерелом таких відходів є машинні приміщення суден, де через витоки, конденсацію та експлуатацію численних систем, накопичуються нафтовмісні суміші, які щорічно призводять до скидання тисяч тонн забруднених вод у Світовий океан.

Під час дослідження для оцінки ризику скидання лляльних вод із суден було розглянуто метод Монте-Карло [2], який дає змогу змоделювати випадкові сценарії утворення нафтовмісних вод з урахуванням типу суден, їх вантажопідйомності та потужності головних двигунів. Діаграма процесу моделі оцінки, що застосовувалася, наведена на рисунку 1.

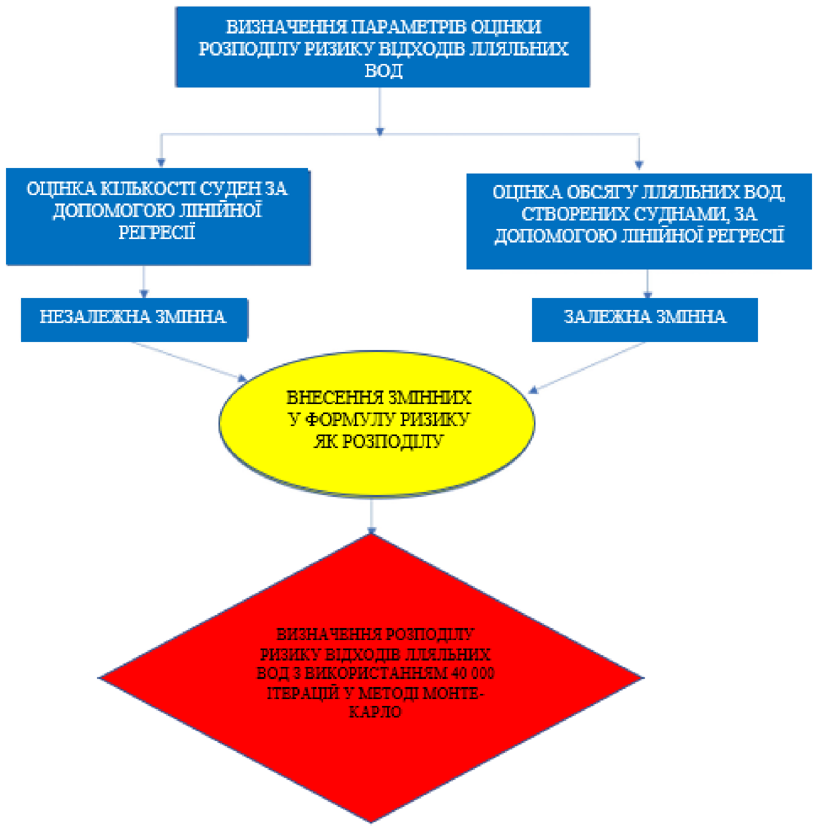


Рисунок 1 – Блок-схема моделі визначення ризику скидання лляльних вод [2]

Було проведено відбір лляльних вод із суден без попередньої обробки для оцінки їх фактичного складу. Отримані результати (табл. 1) показали, що більшість показників лляльних вод перевищують допустимі норми, окрім pH (7,14–7,61). Виявлено підвищений вміст завислих речовин, азоту, фосфору, нафти, жирів, а також високі значення ХПК і БПК, що свідчить про необхідність удосконалення систем очищення відповідно до вимог Конвенції MARPOL [3].

Проведений регресійний аналіз показав високий рівень кореляції (R^2 = 0,76–0,93) між технічними характеристиками суден і обсягом лляльних вод. Моделювання в середовищі Oracle Crystal Ball (MS Excel, 40 000 ітерацій) підтвердило тенденцію зростання їх утворення у найближчі роки [3]. Це свідчить про підвищення екологічного навантаження та необхідність впровадження заходів для його зменшення.

Таблиця 1 – Результати аналізу проб ллядьних вод [3]

Параметр	Одиниця	Судно 1	Судно 2
pH	-	7,61	7,14
Колір	Pt-Co	3000	7200
Загальний азот	мг/л	351,6	1625,20
Загальний фосфор	мг/л	0,84	1,84
Зважені тверді речовини	мг/л	472	1812
Вуглеводневі масла	мг/л	110,60	133,80
Поверхнево-активні речовини (МА = 318 г/моль)	мг/л	<0,040	<0,040
Хімічне споживання кисню	мг/л	8870,40	17369,6
Біохімічне споживання кисню	мг/л	1606,40	3881,10

Аналіз відібраних зразків лляльних вод (табл.1) вказує на значне перевищення встановлених нормативів за низкою екологічно важливих показників. Зокрема, концентрація зважених твердих речовин (ЗТР) становить 472 мг/л та 1812 мг/л, що значно перевищує гранично допустиме значення 350 мг/л. Такий рівень забруднення свідчить про вміст у лляльних водах палива, олива та інших хімічних сполук, які утворюються в процесі експлуатації суднових енергетичних установок.

Крім того, зафіксовано високі значення показників хімічного (ХПК) та біологічного (БПК) споживання кисню, що додатково свідчить про присутність у воді значної кількості органічних речовин. Зокрема, значення БПК досягають 1606,4 мг/л та 3881,1 мг/л, що перевищує норматив у 250 мг/л у 6–15 разів. Подібні концентрації свідчать про істотне органічне навантаження, здатне порушити кисневий баланс у морському середовищі та спричинити деградацію біоценозу.

Отримані в роботі [3] результати аналізу показали значне перевищення допустимих нормативів за основними показниками забруднення, згідно

Регламенту про контроль забруднення вод [4], що унеможливлює безпосереднє скидання лляльних вод у море та підтверджує високий екологічний ризик, пов’язаний із скиданням лляльних вод у морське середовище без належного попереднього очищення. Результати оцінки ризику свідчать про підвищене екологічне навантаження, що, у свою чергу, обумовлює необхідність удосконалення суднових систем сепарації, посилення технічного контролю та забезпечення дотримання вимог Конвенції MARPOL 73/78.

З цією метою було проаналізовано конструктивні та функціональні особливості систем ODME і OCM, які відіграють ключову роль у моніторингу вмісту нафти у стічних водах і запобіганні забороненим скидам у морське середовище.

Система моніторингу скидів ODME, встановлювана переважно на нафтоналивних суднах, виконує безперервний контроль викиду баластних вод для недопущення перевищення встановленої межі – 30 літрів на морську милю [1].

Рисунок 2 демонструє принцип роботи системи ODME, яка автоматично контролює скидання нафтовмісної води, аналізуючи концентрацію нафти, швидкість потоку та рух судна.

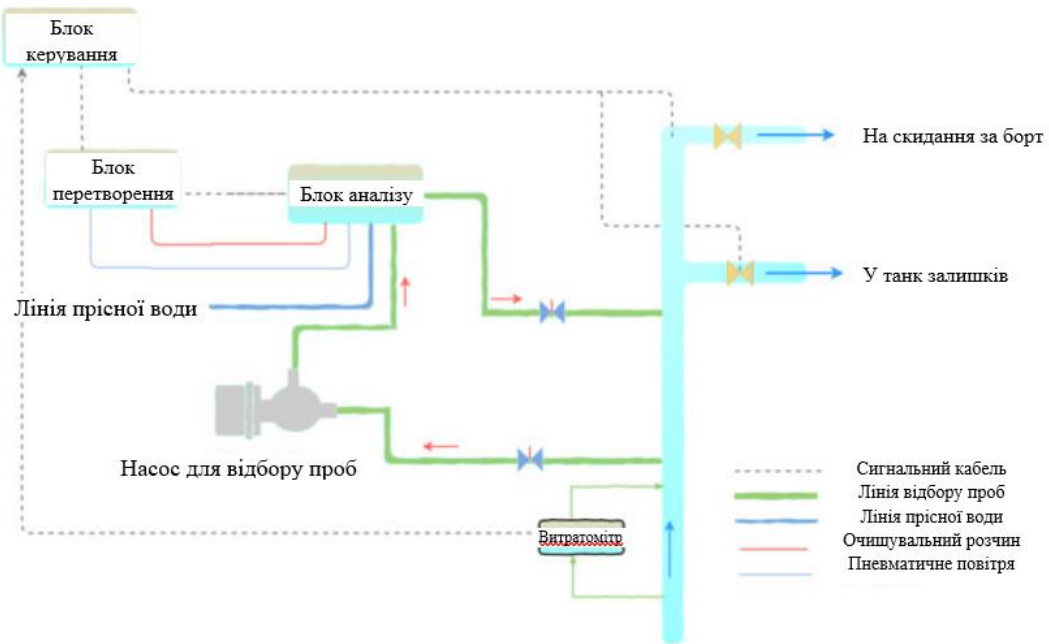


Рисунок 2 – Діаграма роботи ODME [5]

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження підтвердило, що однією з головних екологічних проблем сучасного судноплавства залишається забруднення моря нафтовмісними лляльними водами, очищення яких потребує використання високоефективних систем контролю та сепарації.

У роботі отримано такі основні наукові та практичні результати:

1. Проведено комплексну оцінку процесів очищення нафтовмісних лляльних вод на морських суднах. Встановлено, що існуючі комбіновані системи забезпечують високу ефективність очищення, однак не завжди гарантують досягнення нормативів MARPOL 73/78 без попереднього моделювання ризиків.

2. Застосування методу Монте-Карло та регресійного аналізу дозволило кількісно оцінити ризик скидання забруднених вод залежно від типу судна, вантажопідйомності та потужності головних двигунів. Виявлено високий рівень кореляції (R^2 = 0,76–0,93) між технічними характеристиками суден та обсягами лляльних вод.

3. Аналіз функціонування систем ODME і OCM підтвердив їхню ефективність у запобіганні несанкціонованим скидам. Проте результати моделювання вказують на потребу модернізації окремих елементів систем контролю та підвищення надійності в умовах зростання екологічного навантаження.

4. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування впровадження адаптивних режимів очищення та створення портових систем збору лляльних вод, що дозволить знизити вплив судноплавства на прибережні екосистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. MARPOL Consolidated Edition 2022. Articles, Protocols, Annexes and unified interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the 1978 and 1997 Protocols Incorporating all Amendments in Force on 1 November 2022. Seventh Edition, International Maritime Organization. London, 2022.
2. Ömer Harun Özkaynak & Gönül Tuğrul İçemer (2021) Determining the bilge water waste risk and management in the Gulf of Antalya by the Monte Carlo method, Journal of the Air & Waste Management Association, URL: https://doi.org/10.1080/1096224
3. Özkan Yılmaz, F., Nas, O., Özlüer Hunt, A. (2024) Mersin İli Taşucu Limanı'ndan Örneklenen Sintine Sularının Kirlilik Açısından Değerlendirilmesi. *MedFAR*., 7(2):50-60. https://doi.org/10.63039/medfar.1475892
4. Regulation for water pollution control – Official Gazette, No. 19919. – URL: https://faolex.fao.org/docs/pdf/rus11156E.pdf
5. A step by step guide of how to operate ODME and principle of its operation [Електронний ресурс] // MySeaTime. 2016. – URL: https://www.myseatime.com/blog/detail/a-step-by-step-guide-of-how-to-operate-odme-and-principle-of-its-operation
6. Malakhov O.V., Palagin O.M., Naydyonov A.I., Lykhoglyad K.A., Bondarenko A.V.: Bilge and Oily Water Treatment During Operation of Vessel. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 18, No. 2, doi:10.12716/1001.18.02.23, pp. 433-445, 2024.

7. Nurul Aini Amran, Siti Nor Adibah Mustapha. Oil – Water Separation Techniques for Bilge Water Treatment // Resources of Water – Published: 26 October 2020. DOI: 10.5772/intechopen.91409.
8. М'ягкий М. М., Ткаченко І. І. Вдосконалення процесу очищення вод, що містять нафту// Матеріали науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт»– Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С. 28-30.

УДК 629.5.064.5:621.355

Дворницький О.О., Глазєва О.В.
Національний університет «Одеська морська академія»

Сучасні тенденції застосування акумуляторних батарей в електрорусі морських суден

Науково-технічний напрям в галузі електричного судноплавства було почато в 1836 році, коли видатний вчений Б.С. Якоби продемонстрував можливість приведення в рух морського судна за допомогою електродвигуна постійного струму власного виконання від акумуляторних батарей (АБ). Цей експеримент став не лише технічним проривом, а й символом початку епохи електричного транспорту. Подальший розвиток електрорух отримав у військово-морському підводному флоті, і лише у наші дні ми можемо гідно оцінити цей винахід.

В наш час проблема екологічного впливу морського транспорту на довкілля є однією з актуальних тем, оскільки викиди парникових газів (CO_2), оксидів сірки (SO_x), азоту(NO_x) з морських суден надають негативний вплив на клімат, якість повітря та безпосередньо стан морських екосистем. Міжнародна морська організація прийняла стратегію скорочення викидів парникових газів від світового судноплавства щонайменше на 50% до 2050 року.

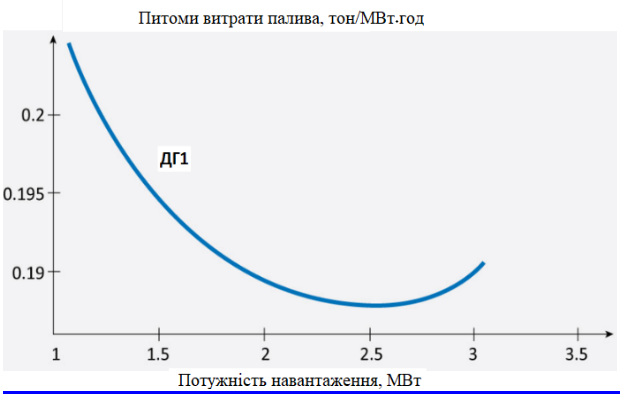
Перехід судноплавної галузі до використання вуглецево-нейтральних видів палива та необхідність виконання жорстких вимог щодо декарбонізації є головним стимулом для впровадження АБ як найбільш перспективних засобів для відповідності новим регуляторним вимогам, зокрема Стратегії IMO щодо викидів парникових газів, а також індексам CII (Carbon Intensity Indicator) та EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index). [1]

АБ розглядаються як ключовий захід підвищення енергоефективності, що дозволяє значно зменшити споживання палива та викиди. [2]

Мета роботи – показати можливість сучасних АБ до застосування у гребних електричних установках (ГЕУ).

Повернення в наші дні до даної технології не випадкове. Це, перш за все, диктується з одного боку умовами дотримання міжнародної конвенції MARPOL 73/78 щодо скорочення викидів з морських суден на допустимому рівні [3], а з іншого боку прагненням забезпечити регулювання частот обертання ГЕУ в широкому діапазоні саме за рахунок електричної частини і спрощенням конструкції самих генераторів.

Ефективність роботи ДГ які працюють з фіксованими обертами визначається поточним споживанням енергії, що часто призводить до низької ефективності. На рисунку 1 показано кількість тон дизельного палива, що споживається на виробництво МВт·год електроенергії, залежно від потреби в потужності навантаження. Найкращі показники досягаються при роботі на 80–100% від номінальної потужності, що визначається конструкцією та налаштуванням двигуна.



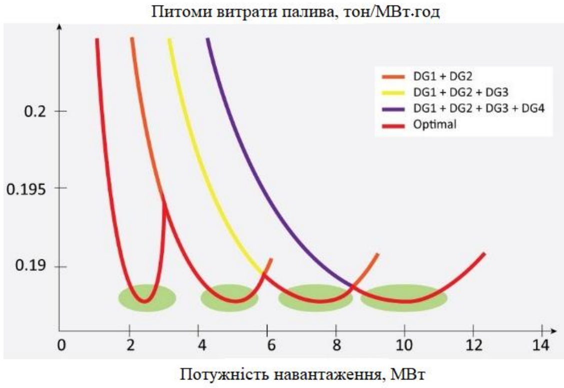


Рис. 1 Рис. 2

Процес коливання навантаження **можна оптимізувати** запускаючи лише необхідну кількість генераторів відповідно до навантаження. Це дозволяє досягти кращої середньої ефективності (для одного-чотирьох працюючих ДГ), як показано на рисунку 2, якщо акумулятор не встановлено.

При використані акумуляторів, генератори будуть знаходитись в зоні оптимальної ефективності (зелені еліпси), незалежно від миттєвих потреб судна, а енергія буде накопичуватись та розподіляться раціонально, що компенсує втрати на заряд/розряд АБ.

Подібну ефективність можна забезпечити а**льтернативним варіантом — генераторами зі змінними обертами, але це** потребує перехід на постійний струм (DC) замість стандартного змінного (AC). Доцільність такого рішення буде залежати від особливостей конкретного судна.

Оскільки в експлуатації знаходиться достатня кількість морських суден з дизель-механічними пропульсивними установками (ПУ), то розглянемо варіант з комбінованою ПУ (рис.3).

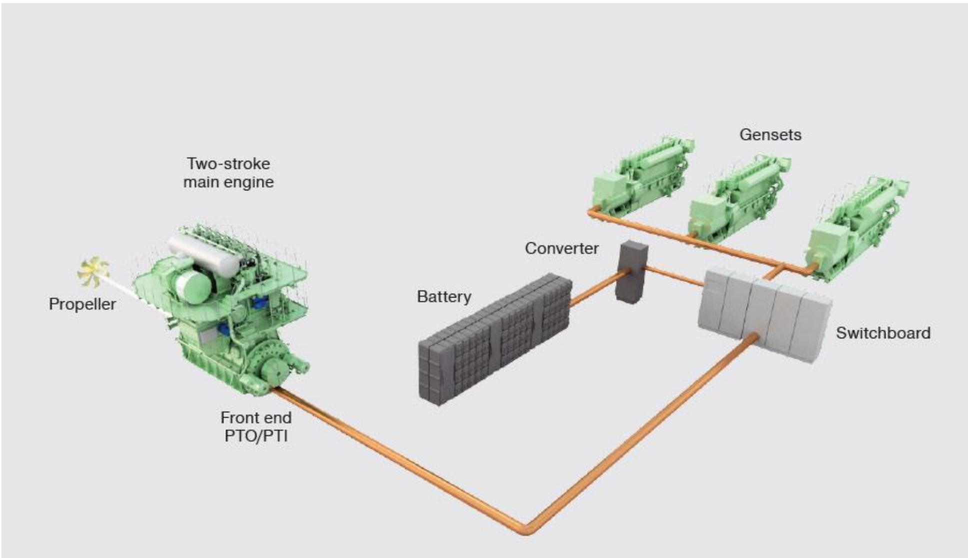


Рис.3. Комбінована пропульсивна установка

Така концепція дозволяє забезпечити не тільки рух судна з дотриманням вимог конвенції у зонах екологічного контролю, а й підзарядку АБ для подальшої роботи [3]. Оцінимо можливості такої системи з погляду споживання енергії.

Енергія, необхідна для виходу з порту на 5 морських миль оцінюється в табл.1 [3]. Загальна енергія, необхідна для прискорення судна та виходу з порту обмежена. Для контейнеровозів основне споживання енергії обумовлено електричним навантаженням, а не фактичною рушійною силою. До наведених розрахунків не включено міркування щодо споживання енергії ДГ. Слід зазначити, що споживання енергії при маневруванні може значно збільшитись при сильному вітрі.

Таблиця 1 – Енергія необхідна для виходу з порту на 5 морських миль

Тип судна	Балкер	Балкер	Балкер	Балкер	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Ро-ро
Розмір	50k dwt	82k dwt	200k dwt	320k dwt	2 500 teu	14 000 teu	20 000 teu	5000 lm
Енергія для виходу із порту, кВт·год	314	428	873	1324	212	655	777	198
Споживання енергії на судні, кВт·год	230	280	340	400	1200	5600	8000	1300
Загальне споживання енергії, МВт·год	0.5	0.7	1.2	1.7	1.4	6.3	8.8	1.5

Енергія необхідна для виходу із територіальних вод. Інформація про енергію для виходу з територіальних вод (12 морських миль) від причалу, представлена в табл.2 [3]. При цьому, ця відстань може бути дещо більшою, що залежить від розташування порту та берегової лінії. Вважаємо, що швидкість становить 10 вузлів. Проте споживання енергії для фактичного руху судна обмежене, а тому загальне споживання енергії є низьким для суден з низьким навантаженням на суднову мережу.

Таблиця 2 – Енергія необхідна для виходу з територіальних вод на 12 морських миль

Тип судна	Балкер	Балкер	Балкер	Балкер	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Ро-ро
Розмір	50k dwt	82k dwt	200k dwt	320k dwt	2 500 teu	14 000 teu	20 000 teu	5000 lm
Енергія для виходу з територіальних вод, МВт·год	2.2	2.7	5.1	7.5	1.7	4.2	5.0	1.5
Споживання енергії на судні, МВт·год	0.4	0.5	0.6	0.7	2.0	9.5	13.6	2.2
Загальне споживання енергії, МВт·год	2.6	3.2	5.7	8.2	3.7	13.7	18.6	3.7

Рушій, що живиться від АБ, може бути варіантом для забезпечення дотримання правил у межах 200 морських миль, як показано в табл.3 [3]. Тут вважається, що судно прискорюється до своєї робочої швидкості поза межами територіальних вод (12 морських миль). Енергія, необхідна для покриття 200 морських миль, у цьому випадку, залежить від енергії, необхідної для руху судна, а не від навантаження споживачів на борту.

Таблиця 3 - Енергія необхідна для виходу із 200 мильної зони

Тип судна	Балкер	Балкер	Балкер	Балкер	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Ро-ро
Розмір	50k dwt	82k dwt	200k dwt	320k dwt	2 500 teu	14 000 teu	20 000 teu	5000 lm
Енергія для виходу з екозони, МВт·год	77	94	147	219	116	320	467	134
Суднові споживачі, МВт·год	3.6	4.2	5.0	5.7	14.6	62.1	82.0	14.4
Загальне споживання енергії, МВт·год	81	98	152	225	131	383	549	149

Аналіз джерел показує, що в даний час значний прогрес у розвитку ПУ пов'язаний з використанням літій-іонних АБ. Але, незважаючи на всю привабливість з екологічної точки зору, такі системи мають обмежений характер через значні масо-габаритні та цінові показники і можуть застосовуватися тільки для конкретних маршрутів [3]. Інформація про масо-габаритні показники систем із зазначеним вище типом АБ представлена в [3] та табл.4.

Таблиця 4 - Питома маса, об'єм та ціна великих 1МВт·год потужних морських літій-іонних батарей

Основні показники	Рівень системи	Груповий рівень	Модульний рівень	Рівень елемента
Питома вага, кг/кВт·год	11-30	7-28	6-24	6-8
Питомий об'єм, л/ кВт·год	12-35	10-12	7-10	1,5-2,5
Питома ціна, USD/ кВт·год	500	-	-	200-250

На масу і об'єм батареї на системному рівні (крім маси елемента) впливає безліч факторів, наприклад: тип ізоляції між елементами і модулями, системи охолодження (повітряне/водяне), інтеграція з іншими бортовими пристроями, системами та ін. Особливо на масу та обсяг модулів має вплив метод, який застосовується для теплової ізоляції окремої АБ та модулів, для зниження ризику теплового розгону. Це відображається у значному збільшенні питомої ваги як окремої АБ, так і на рівні модуля.

Можлива топологія схем використання комбінованих установок представлена на рис.4.

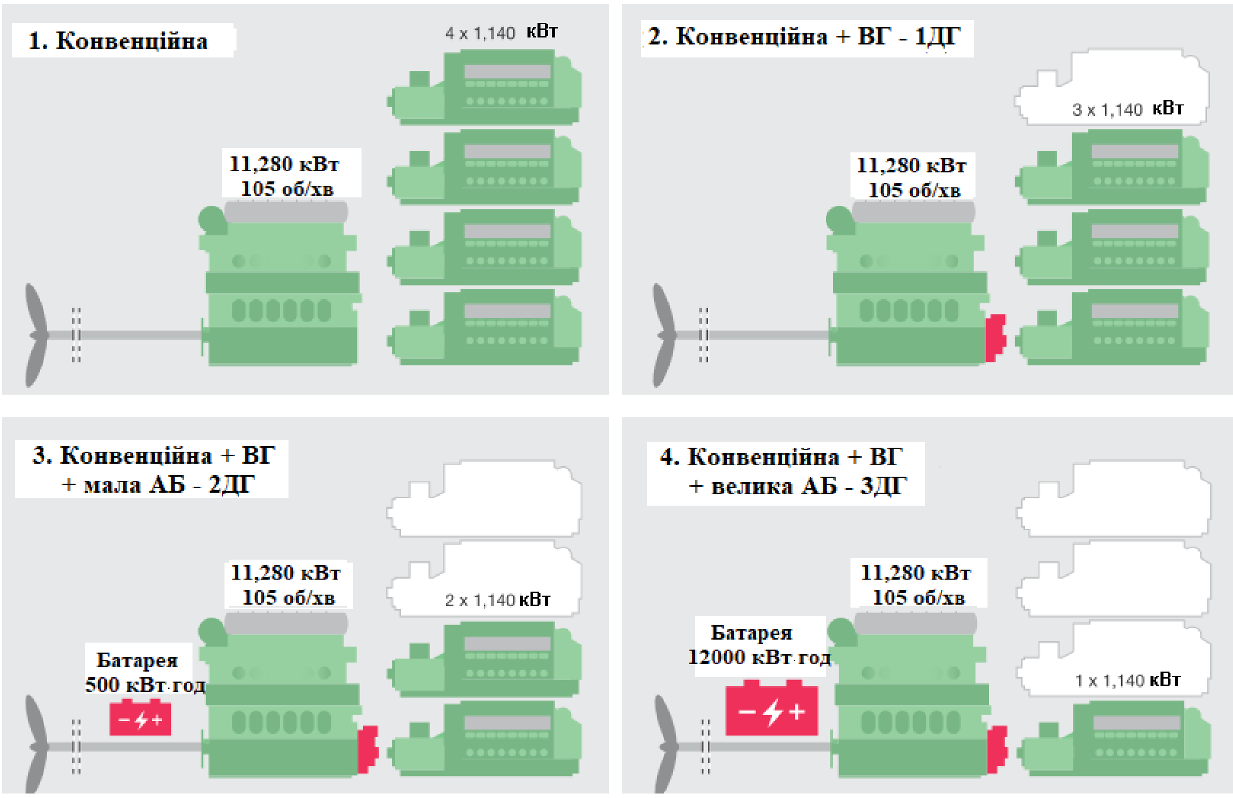


Рис.4. Можливі топології схем використання комбінованих установок

Можливе зниження питомих витрат палива на виробництво енергії для вищенаведених топологічних схем, представлено на рис.4.

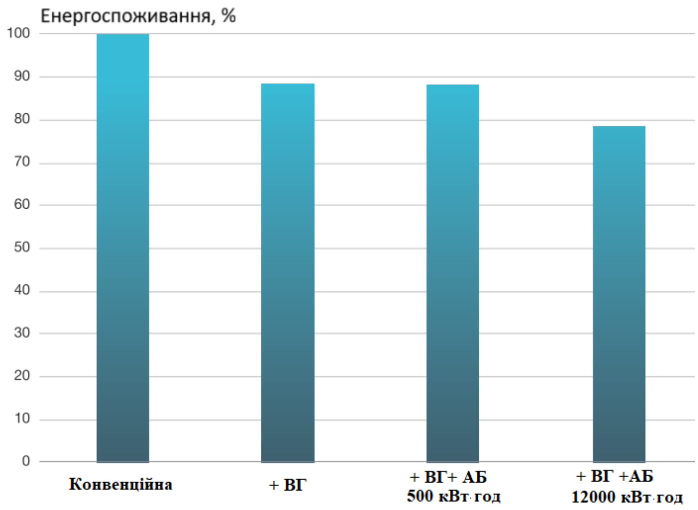


Рис.5. Можливе зниження питомих витрат палива на виробництво енергії для різних топологічних схем

Наступним етапом у розвитку ГЕУ з АБ є системи зі статичними генераторами, розробленими фірмою MAN B&W – MAN Hybrid EcoAux (рис.6). Його технічні характеристики наведені в [4] та табл.5.

а б

Рис.6. «Твердотільний» генератор MAN Hybrid EcoAux: а – зовнішній вигляд; б – склад генератора: 1 – накопичувач енергії (АБ); 2 – вимикач; 3 – система захисту; 4 – двонаправлений інвертор; 5 – фільтр; 6 – трансформатор що розділяє; 7 – вимикач з моторним приводом.

Таблиця 5 - Технічні характеристики «твердотільних» генераторів MAN Hybrid EcoAux

Типорозмір	Напруга мережі, В	Частота, Гц
625 кВт·год (5С)*	400-690	50 или 60
405 кВт· год (5С)	400-690	50 или 60
270 кВт· год (5С)	400-690	50 или 60
135 кВт· год (5С)	400-690	50 или 60

* *С* – Швидкість заряду. С = 12 хвил., т.ч. 5С=5·12=60 хвил.

Таку систему можна буде використовувати як «гарячий» резерв. Типова конфігурація допоміжної системи складається, як мінімум, з трьох ДГ (рис.7). Два ДГ працюють з низьким навантаженням (зазвичай нижче 40%), при цьому один ДГ перебуває в режимі очікування під час критичних операцій, таких як маневрування або розвантаження судна, де слід уникати відключення електроенергії. Така конфігурація припускає раптову зупинку одного генератора. При перетині океану один ДГ може покривати навантаження, другий готовий до запуску, а третій знаходиться на технічному обслуговуванні.

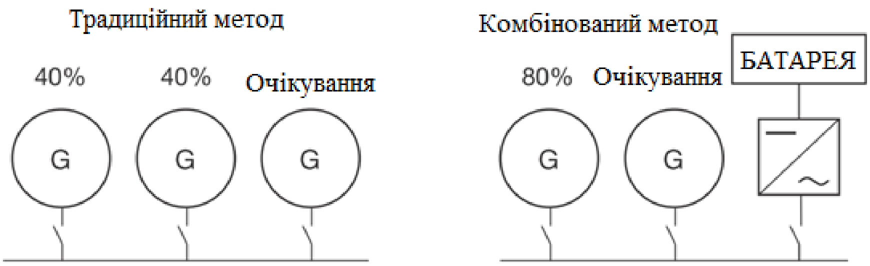


Рис.7. Принцип дії системи з АБ "гарячий" резерв

Висновки: В проведеному тематичному дослідженні було розглянуто основні принципи забезпечення електроруху судна із застосуванням конвенційних генераторів, акумуляторних батарей та статичних генераторів. Наведено різні сценарії енергоспоживання для дотримання екологічних вимог щодо викидів з морських суден. Таким чином, можна зробити висновок, що електрифікація суден стає ключовим напрямом розвитку морської галузі завдяки прогресу в акумуляторних технологіях. Очікується поява компактних, довговічних і безпечних батарей, зокрема твердотільних та на основі натрію, графену й нанотрубок. Це сприятиме економічній ефективності та розвитку повної автономності електричних і гібридних суден.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Marcin Kolodziejski, Iwona Michalska-Pozoga. Battery Energy Storage Systems in Ships' Hybrid/Electric Propulsion Systems. Energies 2023. https://doi.org/10.3390/en16031122

2. https://www.dnv.com/publications/maritime-energy-efficiency-report/

3. MAN Energy Solutions. Batteries on board ocean-going vessels. [Электронный ресурс] - URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf

4. https://ru.scribd.com/document/830944566/man-hybrid-ecoaux-eng

5. https://www.researchgate.net/publication/378387129_Lithium-Ion_Batteries_on_Board_A_Review_on_Their_Integration_for_Enabling_the_Energy_Transition_in_Shipping_Industry

УДК: 621.431

Катеринич І. О., Половинка Э.М.
Національний університет "Одеська морська академія"

Вдосконалення контролю робочих процесів суднових дизелів

Експлуатація суднових дизелів внутрішнього згоряння пов'язана з постійними коливаннями зовнішнього навантаження і тривалою роботою на часткових режимах. Це призводить до інтенсивного зносу циліндропоршневої групи, паливної апаратури високого тиску, механізму газорозподілу і газотурбонагнітача. При цьому відомо, що потужність і питома витрата палива в значній мірі залежить від технічного стану ПА високого тиску, ЦПГ і ГТН, які необхідно діагностувати в процесі експлуатації з метою визначення технічного стану механізмів і запобігання аварійних ситуацій.

Моніторинг робочого процесу в умовах експлуатації і визначення індикаторних параметрів суднових дизелів внутрішнього згоряння дозволяє виконувати ефективну діагностику ПА і ЦПГ по реальному стану за допомогою відомих методів діагностування.

Основна ціль технічного діагностування – ефективна організація перевірки стану СТЗ. ТД дозволяє здійснювати ТО і Р за фактичним технічним станом. Діагностика – галузь знань, що включає в себе теорію і методи організації процесу діагнозу.

Нині на флоті застосовуються як стаціонарні, так і переносні системи комп'ютерної діагностики СДВЗ, що реалізують метод «розділеного моніторингу». У стаціонарних системах використовується апаратна синхронізація даних від маховика двигуна. У переносних системах використовується як апаратна, так і програмна синхронізація даних. Програмна синхронізація дозволяє не використовувати датчик на маховику і отримувати дані безпосередньо під час експлуатації дизеля.

Стаціонарна система діагностики MIP-Calculator NK-100 (Autronica)

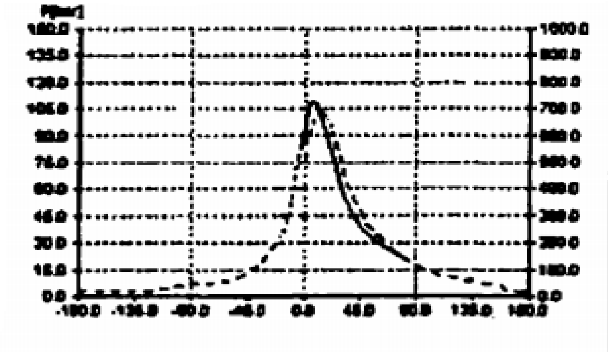
Системи NK-100 (200) (Аутроніка, Норвегія) призначені для оцінки якості процесу згоряння в циліндрах, контролю процесу вприскування палива і роботи паливної апаратури, оцінки технічного стану основних агрегатів систем, які обслуговують дизель

До складу системи входять такі датчики: датчик тиску в циліндрі GT-20 (GT-20A, GT-21), датчик тиску палива GT-30 (GT-30A), датчик тиску продувного повітря GT-205, датчик кута повороту колінчастого вала (фазовий датчик).

На основі результатів вимірювання здійснюється контроль за параметрами робочого процесу і їх регулювання.

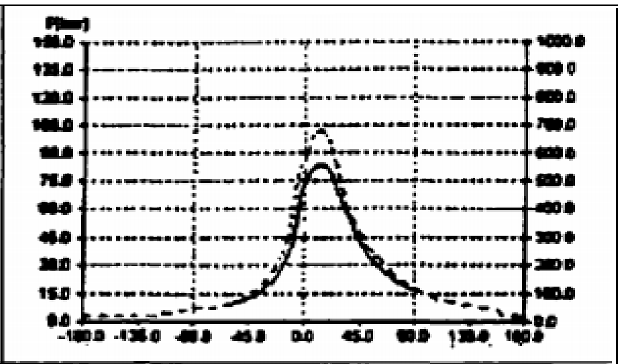
У документації NK-100 наведено приклади деяких характерних деформацій індикаторних діаграм у випадку різних несправностей елементів

ЦПГ (рис.1 отримана на двигуні діаграма - суцільною лінією, еталонна - пунктирною).



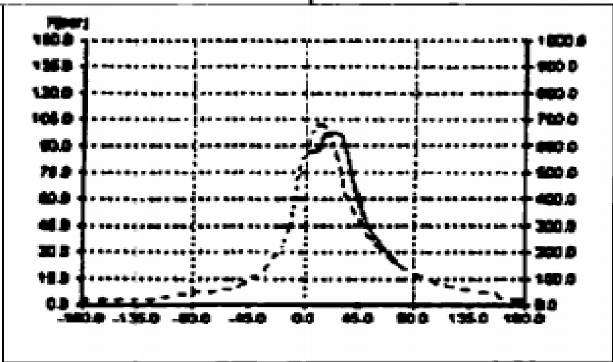
Можливі несправності:

– **пізній кут випередження подачі палива зі сторони паливного насосу високого тиску.**



Можливі несправності:

- **зношені чи пошкодженні поршньові кільця;**
– **підгорання головки циліндра;**
– **прогорання випускного клапана;**
– **можливе зниження тиску продувочного повітря, якщо дані такі самі по всім циліндрам.**



Можливі несправності:

– **низький тиск подачі палива;**
– **впускний клапан пошкодженний;**
– **пошкодження форсунки чи сопла;**
– **виключно низька якість палива, якщо такі дані по всім циліндрам.**

Рис. 1. Класифікація несправностей в NK-100 за допомогою індикаторних діаграм.

Система DEPAS D4.0H

Система розроблена для використання на суднових дизелях (головних і допоміжних). Модуль реального часу системи D4.0H призначений для безпосереднього запису даних робочого процесу і попереднього розрахунку 3-х ключових параметрів (тактність двигуна визначається автоматично): - Pz (Pmax) – максимальний тиск згоряння в циліндрі (середнє, мінімальне і максимальне значення за кілька робочих циклів);

- *RPM* – частота обертання колінчастого вала дизеля;
- P_t – середній тиск в циліндрі.

Програмне забезпечення здійснює розрахунок параметрів робочого процесу. Фази подачі палива і газорозподілу, так само як і технічний стан ПА і ЦПГ визначаються за допомогою контактного вібродатчика.

Використання вібродатчика в системі пояснюється на рис. 2.

Верхня діаграма – переміщення голки форсунки під час вприскування палива. Середня діаграма – тиск палива перед форсункою. Нижня діаграма - перетворена вібродіаграма торця форсунки. Фази вприскування палива (початок – підіймання голки і кінець – посадка голки – по верхній діаграмі) збігаються з передніми фронтами віброімпульсів на нижній вібродіаграмі.

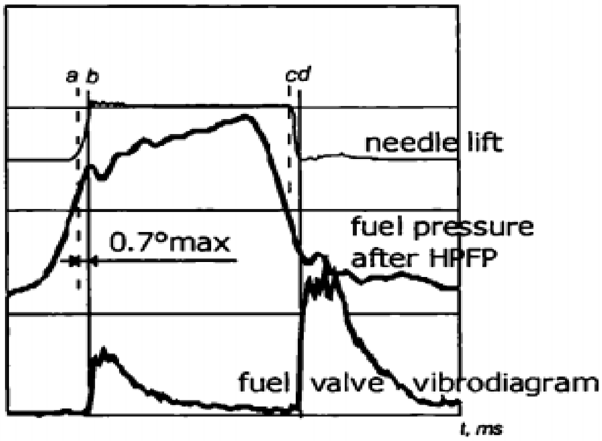


Рис. 2. Використання вібродатчика в системі DEPAS D4.0H

Приклади деяких дефектів, що виявляються під час аналізу діаграм.

1. Зношення плунжерної пари ПНВТ (можливе протікання впускного

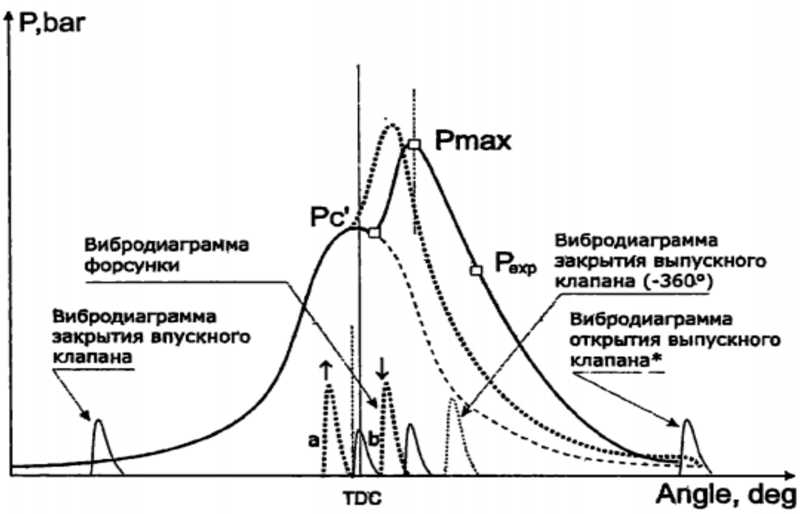


Рис. 3. Зношення плунжерної пари ПНВТ

клапана) – рис. 3.

Зміщується за ВМТ початок видимого згоряння P’c.

Знижується Pz, збільшується Pexp і температура випускних газів.

Змінюється форма, зменшується амплітуда і зміщується вправо вібродіаграма форсунки.

2. Зависання голки форсунки (в нижньому положенні) – рис. 4.

Викривляється форма вібродіаграми вприскування.

Можлива повна відсутність переднього імпульсу *a*.

Знижується P_z, P_{exp}, температура випускних газів, середній індикаторний тиск та індикаторна потужність циліндра.

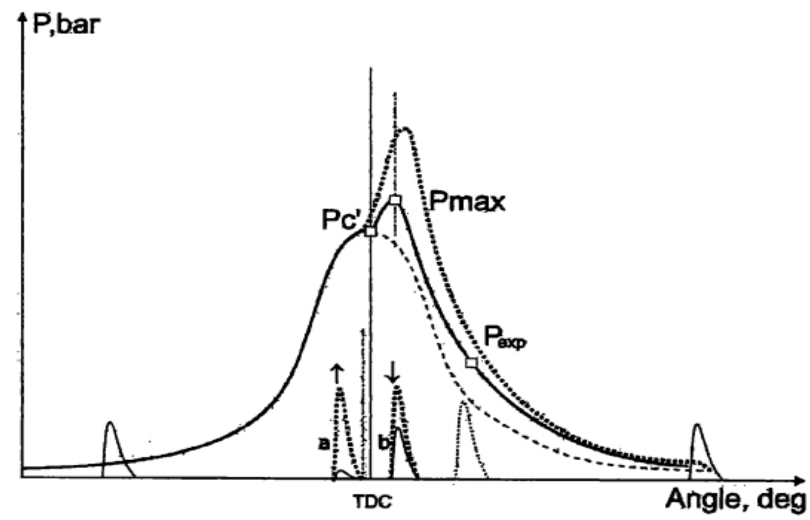


Рис. 4. Зависання голки форсунки (в нижньому положенні)

3. Рання подача палива – рис. 5.

Момент початок видимого згоряння палива P'_c зміщується на лінію стиснення. Вібродіаграма форсунки зміщується вліво.

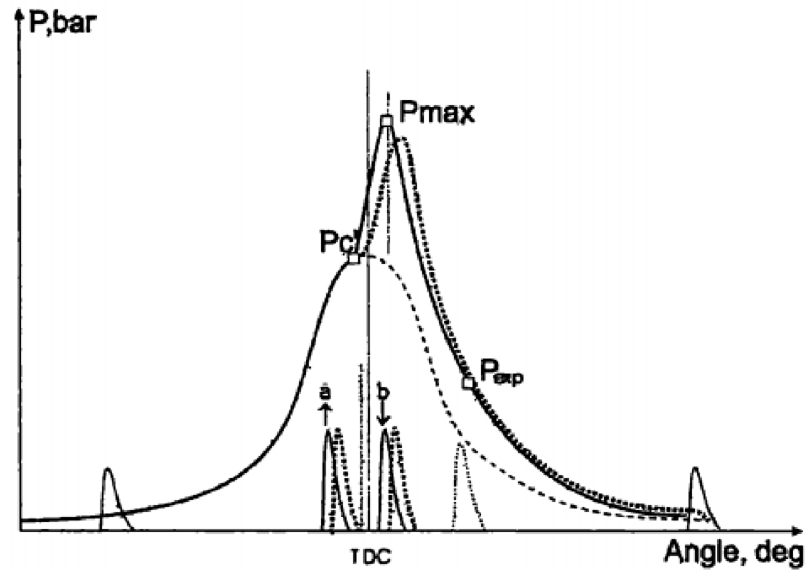


Рис.. 5. Рання подача палива

4. Прогорання клапанів (пізнє закриття впускного клапана) – рис. 6.

Знижується тиск в кінці стиснення P_c. Знижується P_z, P_{exp}, P_i, N_i.

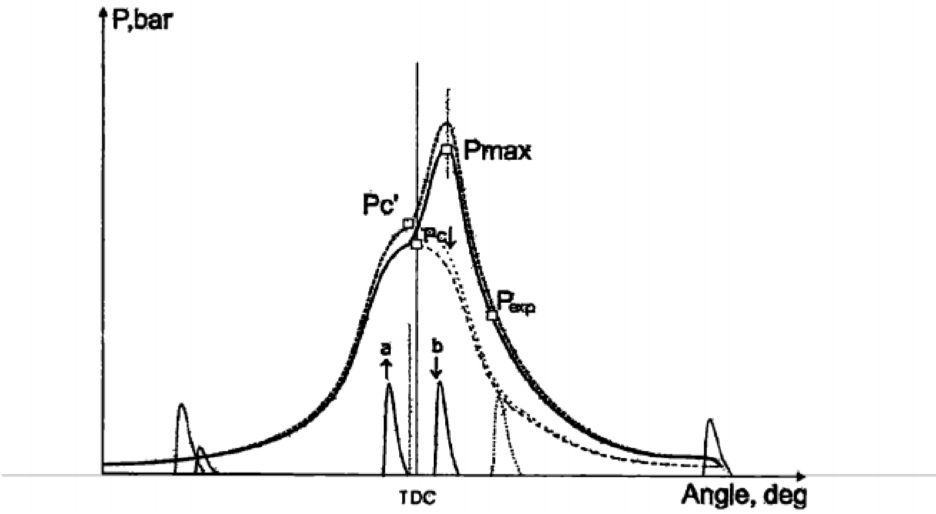


Рис. 6. Прогорання клапанів (пізнє закриття впускного клапана)

ВИСНОВКИ

За допомогою систем контролю та діагностування можна:

- збільшити економічність робочого процесу за рахунок точного регулювання паливної апаратури і механізму газорозподілу;
- збільшити міжремонтний період і скоротити витрати на ТО за рахунок рівномірного розподілу навантаження між циліндрами;
- виключити ризик виникнення аварійних ситуацій і суттєво підняти рівень ТО СЕУ завдяки своєчасному моніторингу і контролю робочого процесу;
- скоротити витрати на експлуатацію СЕУ;
- скоротити споживання палива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Системи NK – 100, NK – 200 [Электронный ресурс] - Режим доступу до ресурсу: http://www.cix.co.uk/~autronica-offshore
2. Судновий механік: Довідник // Авт. кол.: За ред. А.А.Фока, д-ра техн. наук, судн. старшого механіка. — У 3-х т. — Т. 1. — Одеса: Фенікс. 2008. — 1036 с
3. DEPAS manual [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: http://www.denkra.com/

УДК 629.5

Караваєв М.А., Колегаєв М.О.
Національний університет "Одеська морська академія"

Забезпечення дотримання екологічних норм судновими дизелями в районах контролю за викидами

Постановка проблеми в загальному вигляді. Забезпечення дотримання екологічних норм судновими дизелями в районах контролю за викидами є актуальною проблемою, яка виникає під час експлуатації суден морського транспорту. Екологічні показники суднових дизелів регламентується вимогами Міжнародної конвенції MARPOL. Одним з них є емісія оксидів сірки. Викиди SOX регламентуються масовим вмістом сірки у судновому паливі. З 01.01.2020 р. відповідно до Annex VI MARPOL вміст сірки у паливі не повинен перевищувати 0,1 % за умови експлуатації судна в зонах спеціального екологічного контролю (Sulphur Emission Control Areas – SECAs) та не більше 0,5 % під час експлуатації судна поза районами SECAs. Спеціальні зони SECAs визначені Міжнародною морською організацією (IMO) та показані на рис. 1. Для країн Європи до них належать акваторії Північного та Балтійського морів, а також порти Середземномор'я [1].

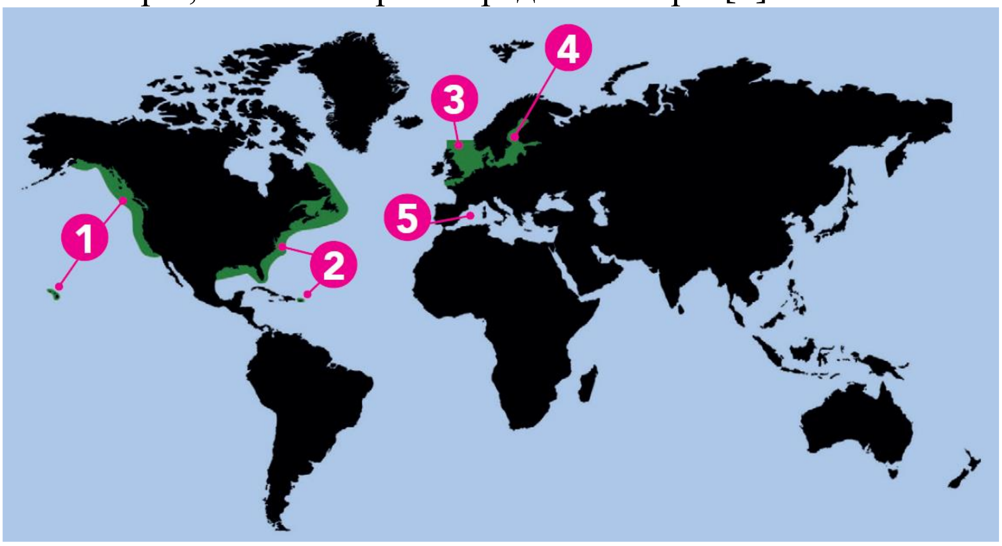


Рис. 1. Райони SECAs відповідно до вимог IMO:
1 – The North American SECA, включаючи most of US, Canadian coast and Hawaii; 2 – US Caribbean SECA, включаючи Puerto Rico і US Virgin Islands; 3 – The North Sea SECA, що включає The English Channel; 4 – The Baltic Sea SECA; 5 – All EU Ports

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання палива із вмістом сірки понад 0,5 % за масою можливе лише за умови додаткового очищення випускних газів у спеціальних технічних пристроях (якими зазвичай встановлюються скрубери) [2]. У разі управління екологічною безпекою навігаційного переходу за допомогою додаткового очищення випускних газів контролюється відношення SO_2(ppm)/CO_2(%) після скрубера. Ця величина не повинна перевищувати значення $SO_2/CO_2<4{,}1$ під час знаходження судна в SECAs і значення $SO_2/CO_2<21{,}7$ під час знаходження судна за межами SECAs. Дослідження, що спрямовані на контроль та управління емісією оксидів сірки, у своєї більшості присвячені використанню скруберних систем очищення, а також переведенню дизелів на паливі з низьким (не більш за 0,1 %) на наднизьким (до 0,05 %) вмістом сірки [3].

Постановка завдання. Завданням дослідження була оцінка енергетичної та екологічної ефективності різних методів, що забезпечують виконання вимог Annex VI MARPOL щодо емісії оксидів сірки під час знаходження суден морського транспорту у районах контролю за викидами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконували на двох однотипних морських спеціалізованих суднах класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн. На одному із суден використовувалася скруберна система додаткового очищення випускних газів від оксидів сірки). Це дозволяло використовувати для суднових дизелів паливо із вмістом сірки до 3,5 % за масою. На другому судні додаткове очищення випускних газів не виконувалося. У зв'язку з цим під час експлуатації дизелів у SECAs використовувалося паливо DMA, під час експлуатації дизелів за межами SECAs використовувалося паливо RME180. На цьому судні була реалізована технологія, яка дозволяє застосовувати біодизельне паливо, як таке використовувалося паливо B30 класу FAME [4]. Основні характеристики палив наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Характеристики палив

Параметр	RMG380	RME180	DMA	FAME B30
В'язкість за 50 °С, сСт	329	184	12,8	36,3
Густина за 15 °С, кг/м^3	986	928	896	914
Вміст сірки, %	2,7	0,48	0,082	0,018
Температура спалаху, °С	81	73	67	71
Теплотворна здатність, кДж/кг	39070	40480	43420	36890

Під час дослідження обидва судна здійснювали навігаційний перехід між портами Aughinish (Ireland) та Tallinn (Estonia) з проміжним заходом до портів Scagen (Denmark), Kalundborg (Denmark), Gdynia (Poland). Під час руху з порту Aughinish до порту Scagen судна заходили до Baltic SECA. План навігаційного переходу наведено на рис. 2.

Під час всього навігаційного переходу обидва судна перевозили однакові вантажі та виконували однакові вантажні операції у портах розвантаження. Це забезпечувало ідентичність зовнішніх умов під час проведення експериментів та ідентичність навантажень на головний двигун суден. Також ідентичним для кожного із суден підтримувалися навантаження на допоміжні двигуни. Це забезпечувалося однаковими навантаженнями на суднові споживачі енергії.

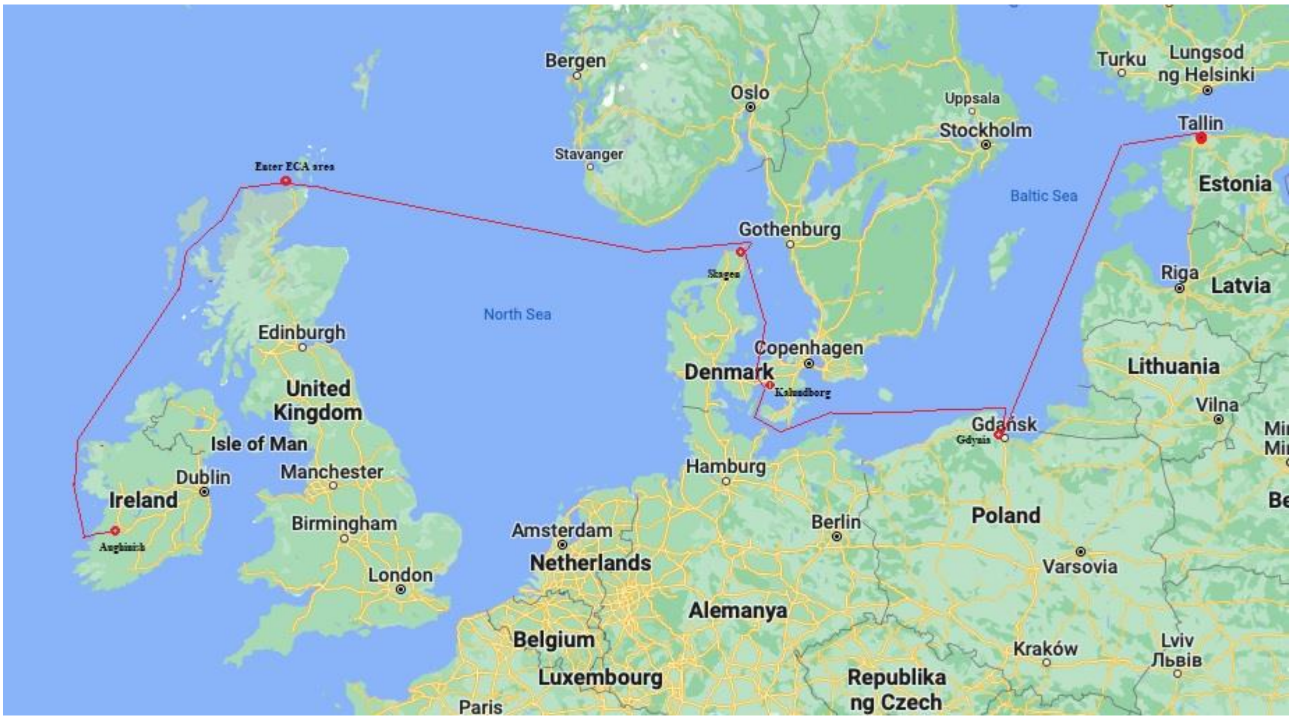


Рис. 2. План навігаційного переходу

Порівняння екологічності роботи обох суден виконувалось за відносним значенням

$$\mathrm{Eco}^{+} = \frac{\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{\mathrm{IMO}} - \left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{\text{екс}}}{\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{\mathrm{IMO}}};$$

де $\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{\mathrm{IMO}}$ – відношення емісії діоксиду сірки до діоксиду вуглецю, що регламентується вимогами IMO під час використання на суднах скруберної системи очищення випускних газів від оксидів сірки;

$\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{\text{екс}}$ – відношення емісії діоксиду сірки до діоксиду вуглецю під час експлуатації відповідної схеми зниження емісії оксидів сірки (скруберного очищення або біодизельного палива).

Результати досліджень (для навігаційного переходу, характеристики якого наведені на рис. 2) наведені на рис. 3.

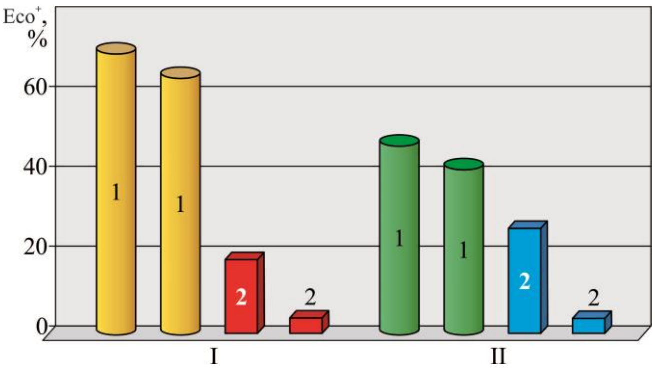


Рис. 3. Зміна екологічної стійкості судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн за різних способів управління екологічною безпекою:
1 – використання системи скруберного очищення; 2 – використання паливної суміші з біодизельним паливом;
I – робота у SECA; II – робота поза SECA

Використання методів управління екологічною безпекою завжди пов'язане з підвищенням витрат енергії з їхнього забезпечення. У разі системи скруберного очищення додаткові витрати енергії пов'язані з використанням насосів морської води та буферних насосів. Крім того, використання скруберного очищення на 1,0…1,5 % знижує потужність головного та допоміжних двигунів. Це пов’язане з підвищенням аеродинамічного опору в газовипускный магістралі дизелів. У разі використання паливної суміші, що містить біодизельне паливо, додаткові витрати енергії пов'язані з роботою насоса біодизельного палива та дозерної установки, що забезпечує додавання біодизельного палива у паливну магістраль.

Номограма, що відображає втрати потужності під час використання різних методів управління екологічною безпекою, наведена на рис. 4.

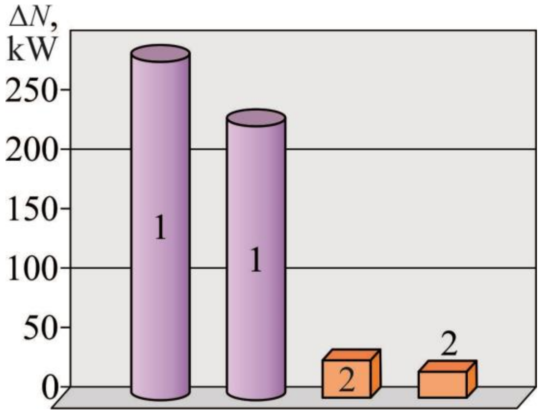


Рис. 4 Втрати потужності за різних способів управління екологічною безпекою судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн:
1 – використання системи скруберного очищення; 2 – використання паливної суміші, до складу якої входить біодизельне паливо

Висновки. Управління екологічною безпекою навігаційних переходів є одним із складових, які визначають роботу суден морського транспорту. Особливо актуальною є підтримка екологічної безпеки для районів Північної

Європи, в яких створені спеціальні екологічні райони контролю викидів оксидів сірки.

Виконання міжнародних вимог щодо рівня емісії SOX можливе шляхом додаткового очищення випускних газів, а також за рахунок використання палива з низьким вмістом сірки. У першому випадку випускні гази піддаються очищенню у спеціальних скруберах, у другому – використовується біодизельне паливо, вміст сірки в якому не перевищує 0,02 %.

Ефективність використання методів управління екологічною безпекою може бути оцінена за екологічною стійкістю судна. Чим вище значення екологічної стійкості – тим від максимально можливих значень емісії SOX перебувають поточні значення емісії SOX. Метод використання додаткового очищення випускних газів у скруберах характеризується найвищою екологічною ефективністю. При цьому використання як методу управління екологічною безпекою біодизельного палива також забезпечує високий рівень екологічної стійкості.

До недоліків методів керування екологічною безпекою відносяться втрати потужності дизеля, які пов'язані з додатковим аеродинамічним опором у газовипускній магістралі. Також вимагає додаткових витрат енергії додаткове обладнання, яке забезпечує функціонування систем очищення газів або підготовки палива.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sagin, S.V., Sagin, S.S., Madey, V. (2023). Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport. *Technology Audit and Production Reserves, 4* (3(72)), 33–42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.

2. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píˇstˇek V., Kuˇcera P. (2023). Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel. *Applied Ocean Research*. *140*. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.

3. Sagin, S., Sagin, A. (2023). Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves, 5*(1(73)), 37–43. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198

4. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píˇstˇek V., Kuˇcera P. (2024). Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy, 224,* 120221. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221.

УДК 629.5

Кривоколісько І.І., Колегаєв М.О.
Національний університет "Одеська морська академія"

Технологічні засоби та системи управління очищенням нафтовмісних вод на морських суднах

Постановка проблеми в загальному вигляді. Однією з головних проблем сучасності є запобігання антропогенному забрудненню вод Світового океану, передусім нафтопродуктами. При цьому мається на увазі забруднення не лише відкритих просторів морів і океанів, через які проходять транспортні шляхи, але і акваторій заток, портів, берегової лінії, по периметру якої відбувається не менш інтенсивний рух суден. Нині за даними космічної зйомки 30 % площі світового океану покрито нафтовою плівкою різної товщини. Традиційно вважається, що основна небезпека від забруднення нафтою і її похідними походить від нафтоналивних суден, проте доля аварій танкерного флоту складає тільки 12 % від загального числа джерел забруднення. Основну роль до забруднення світового океану (27 %) вносять нафтовмісні води (НВМ), які зливаються суднами. Типовим прикладом НВМ є трюмні, баластні і льяльні води машинно-котельних відділень.

Відповідно до вимог МАРПОЛ, будь-яке судно, що має на борту велику кількість нафтового палива, а також судно валовою місткістю 10000 тонн і більше оснащується обладнанням для фільтрації нафти та пристроями сигналізації та автоматичного припинення будь-якого скидання нафтовмісної суміші, коли вміст нафти в стоку перевищує 15 млн$^{-1}$. Води, що містять нафту, і нафтозалишки повинні зберігатися на борту і зливатися в приймальні пристрої або скидатися за межами особливого району з дотриманням чинних правил для відкритого моря. Скидання дозволяється за умови: джерелом льяльних вод не є лляла відділення вантажних насосів; льяльні води не змішані із залишками нафтового вантажу; судно перебуває у русі; вміст нафти в стоку без розведення не перебільшує 15 млн$^{-1}$; на судні знаходиться у дії обладнання для фільтрації нафти, система фільтрації, яка має пристрій, що забезпечує автоматичне припинення скидання, коли вміст нафти у стоку перевищує 15 млн$^{-1}$. У всіх випадках, коли в безпосередній близькості від судна (танкера) або його кільватерного струменя на поверхні води виявляються видимі сліди нафти, невідкладно розслідуються факти, що належать до цього випадку, для встановлення дійсного порушення нормативних вимог щодо скидання нафти [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує цілий ряд традиційних технологій методів очищення льяльних вод, найбільш розповсюдженими з яких є: хімічне очищення, абсорбційна фільтрація, мембранна фільтрація,традиційна коагуляція. Усі вони є статичними технологіями, призначеними для роботи в режимі періодичного завантаження, коли обробка величезного об'єму льяльної води ведеться впродовж короткого часу. Для систем, що реалізовують ці технології, характерні великі об'єми відходів і значні об'єми потоку на зворотне промивання.

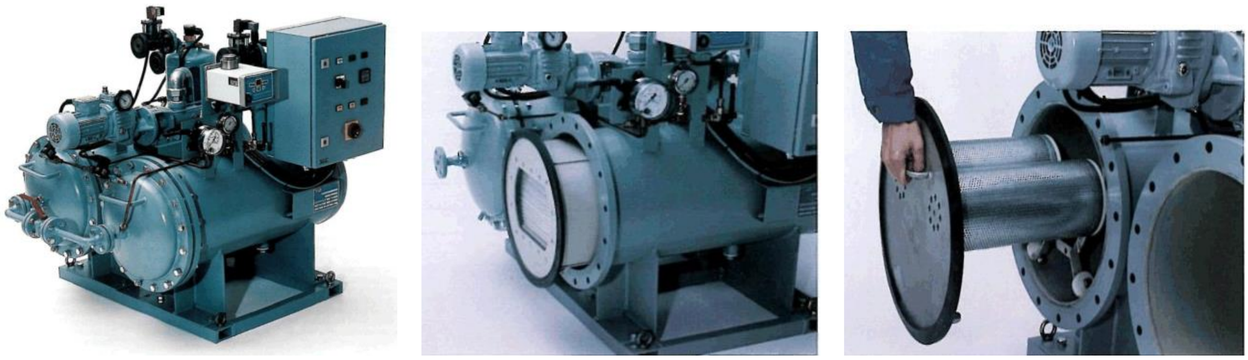
Одним з суттєвих недоліків усіх цих систем (за винятком систем мембранної фільтрації) є зниження їх ефективності в суворих погодних умовах відкритого моря і за умовою утворення в льяльної воді стійких емульсій. Це пов'язано з тим, що в цих технологіях використовується природна сила гравітації, дія якої легко долається навіть під час помірного хитавиці судна. У результаті страждає якість обробки. Проблеми в цих системах викликають і різкі скачки концентрації нафтопродуктів. Традиційні статичні системи, призначені для обробки певних порцій продукту, часто виявляються не в змозі забезпечити необхідну якість в реальних умовах [2, 3].

Під час вибору технології очищення НВМ визначальними чинниками є: витрата НВМ, початкова концентрація нафтопродуктів і супутніх забруднень, вимоги до якості очищеної води по усіх нормованих забрудненнях. Залежно від вимог до якості очищеної води, а також цілого ряду техніко-економічних показників вибирається технологічна схема очищення, основу якій складає механічна обробка. При цьому залежно від конкретних умов використовуються гравітаційні облаштування різноманітних конструкцій, а з метою підвищення ефекту очищення може бути здійснена попередня або наступна обробка стоків. Окрім відстоювання з використанням реагентів (коагулянтів, флокулянтів, їх комбінування) або без них технологія очищення може включати фільтрування, флотацію, сорбцію, центрифугування, хлорування або озонування.

Постановка завдання. Таким чином, незважаючи на велику кількість досліджень, та технологічних рішень, що забезпечують очищення вод, що містять нафту, існує нерозв'язане завдання – відсутність метода очищення, за допомогою якого можливо забезпечити остаточну концентрацію нафтопродуктів менш ніж 15 млн$^{-1}$ при одночасної мінімальної витраті енергії на цю операцію.

Виклад основного матеріалу дослідження. Забезпечення остаточної концентрації нафтопродуктів у воді менш 5 млн$^{-1}$ можливо шляхом використання комбінованої установки для очищення НВМ, у якої к перша ступінь використовується коалесціюючий фільтр, а як друга ступінь застосовано розділений гранульований фільтроелемент. У більшості випадків комбіновані установки мають високу ефективність роботи та характеризуються широким діапазоном продуктивності.

Прикладом подібного обладнання є сепаратори ВМН типу Deoiler PPT-BWS/MESB, які відносяться до однієї з останніх світових моделей подібного обладнання. Загальний вид сепаратора Deoiler PPT-BWS/ME надано на рис. 1. Принципова схема процесу очищення, що реалізується у сепараторі, подана на рис. 2.



а)　　　　　　　　　　　　*б*)　　　　　　　　　　　　*в*)

Рис. 1. Сепаратор льяльних вод Deoiler PPT-BWS/ME:
а – загальний вид; *б* – 1-я ступінь, блок сепарації; *в* – 2-я ступінь, механічні деемульгатори й піногасники

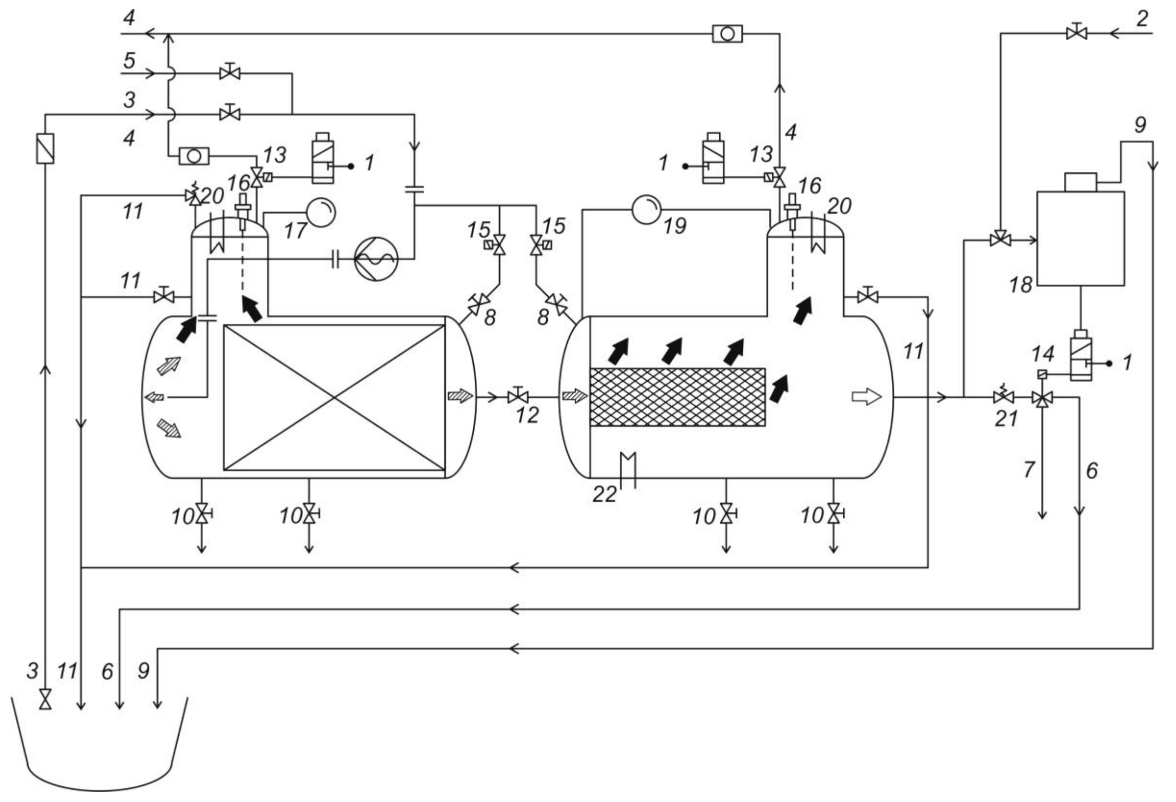


Рис. 2. Принципова схема сепаратора льяльних вод Deoiler
1 – вхід стисненого повітря (тиск 0,6 МПа); 2 – вхід чистої води для промивання датчика забруднення; 3 – магістраль для входу забрудненої (льяльної) води з безповоротним клапаном і фільтром грубого очищення; 4 – магістраль випуску відсепарованої нафти;
5 – магістраль для входу промивної чистої води (тиск 0,1…0,2 МПа); 6 – магістраль скидання неочищеної води назад у льяла (повернення); 7 - за борт; 8 – магістраль для випуску повітря зі стопорним клапаном; 9 – магістраль для підведення очищеної води до датчика забруднення для контролю; 10 – випуск твердих залишків і бруду;
11 – магістраль від запобіжного клапана й клапана відбору проб; 12 – запірний клапан;
13 – електромагнітний клапан випуску відсепарованих нафтопродуктів; 14 – 3-х ходовий електромагнітний клапан; 15 – електромагнітний клапан для продувки й випуску повітря; 16 – датчик рівня; 17 – манометр; 18 – обладнання контролю забруднення води нафтопродуктами OMD-11;19 – диференціальний манометр; 20 – електричний підігрівник води; 21 – зворотний клапан; 22 – Stand-by

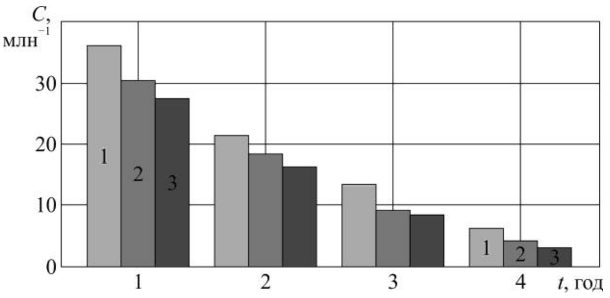
Сепаратор BMH NFV останнього покоління DEOILER являє собою компактну систему сепарування із двома основними щаблями, об'єднаними в один блок. Навіть таке виконання дозволяє ефективно сепарувати воду, масло, паливо й дає можливість досягти залишкового змісту нафтопродуктів в відсепарованої воді менш 5 млн$^{-1}$. Така концепція сепаратор ВМН DEOILER підходить для сепарування будь-яких льяльних вод, які утворюються в результаті експлуатації суден морського транспорту.

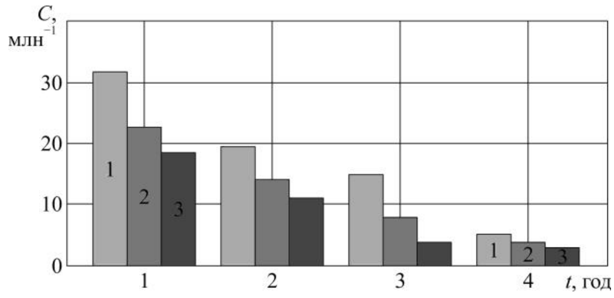
Сепаратор ВМН також відповідає високим вимогам захисту довкілля, що діють у деяких спеціальних зонах, і вимог які, як очікується, будуть уведені в інших районах Світового океану в найближчому майбутньому.

Компактний блок складається із сепаратора НВМ типу PPT-BWS, проверненого й схваленого німецьким класифікаційним товариством Німецький Ллойд, додатково встановлюваного механічного деемульгатора типу MESB, перевіреного й схваленого німецьким класифікаційним товариством Німецький Ллойд, як додатково оснащений агрегат, і поступально резонаторного насоса, який забезпечує живлення системи. Усі складання монтуються на основному каркасі, утворюючи єдиний блок. Обоє апарата PPT-BWS, а також MESB оснащені збірником масла, де збираються сепаруемі нафтопродукти. У кожному збірнику мастила встановлюється нагрівальний прилад. При досягненні максимального рівня нафтопродуктів у ємності відкривається мастильний випускний клапан, керований вимірювальним обладнанням рівня нафтопродуктів. Висока концентрація нафтопродуктів (до 100 %) а також емульсій типу «мастило-паливо у воді» може постійно й без проблем переробляється установкою. Для спостереження й контролю залишкового змісту нафтопродукту система оснащена системою моніторингу нафтопродуктів. Дана система має функцію тривоги й контролю «Back-to-Bilge» (назад у льяла) якщо залишковий зміст нафтопродуктів перевищує 5 млн$^{-1}$ після процесу сепарування. Суміш нафтопродуктів і води йде через запатентовані профілі багатофазного сепарування PPT-BWS (багатофазний сепаратор), де відбувається поділ нафтопродуктів і твердих тел. Краплі чистих нафтопродуктів поєднуються, утворюючи більші краплі в процес оптимізованого об'єднання. Такі краплі йдуть у збірник масла змонтовані у верхній частині. Одночасно частки відходів відділяються від води в результаті певного напрямку потоку в спеціальні камери, що перебувають у нижній дріботить PPT-BWS, де збирається осад. Це забезпечує ефективне сепарування в плині тривалого часу.

У механічному деемульгаторі й піногасники типу MESB, який являє собою далекої розробку успішного деемульгатору NFV типу MEB, відбувається остаточне сепарування крапель, що залишилися, нафтопродукту. Крім відмінного розшарування звичайних механічних нафтових емульсій, обладнання також розщеплює піну, викликану можливість синтетичних масел поглинати воду.

Ефективність видалення нафтових фракцій з НВМ залежить від температури, за якою виконується процес очищення та від потужності сепараційного блоку, який це забезпечує роботу 1-го ступеню очищення. Результати з визначення цього впливу, які були отримані під час експерименту, наведені на рис. 3.





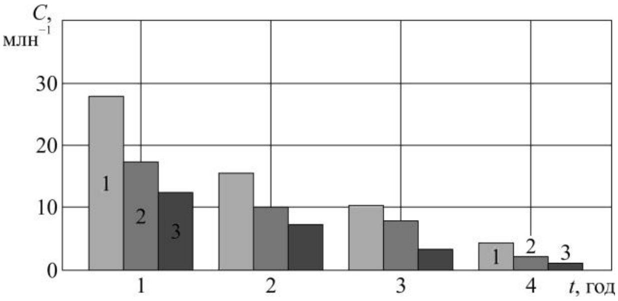


Рис. 3. Зниження остаточної концентрації нафти в залежності від часу для різної потужності сепараційного блоку (1 – 2 кВт; 2 – 4 кВт; 3 – 6 кВт) та різного попереднього підігріву нафто-водяної суміші (*а* – до температури 30°С; *б* – до температури 40°С; *в* – до температури 50°С)

Висновки і перспективи подальших досліджень. Експлуатація суден морського та внутрішнього водного транспорту повинна здійснюватися з суворим виконанням вимог міжнародної конвенції МАРПОЛ. Одним зі шляхів забезпечення цих вимог (відносно остаточної концентрації нафти в суднових нафтовмісних / льяльних водах) є використання комбінованих установок, що забезпечують поділення нафтовмісних вод на окремі фракції та подальше видалення з загального потоку нафти та нафтопродуктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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. – С. 131-147. doi: 10.31653/smf47.2023.131-147.

2. Колегаєв М.О., Бражнік І.Д. Вдосконалення процесу підготовки вантажних танків нафтоналивних суден до вантажних операцій // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – С. 66–76. DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-66-76.

3. Ткаченко І. В. Розробка технології розділення і очищення вод, що містять нафту / І. В. Ткаченко // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 24-30. DOI : 10.31653/smf340.2020.24-30.

УДК 629.5

Кроть М.М., Заблоцький Ю.В.
Національний університет "Одеська морська академія"

Підвищення паливної економічності суднових дизелів

Постановка проблеми в загальному вигляді. В останні роки на транспортних суднах морського та внутрішнього водного транспорту для середньообертових дизелів (СОД) все ширше застосовуються важкі сорти палива високої в'язкості, що мають більш низьку вартість. 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) під час використання палив з в'язкістю до 380 мм^2/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. Крім того, в суднову практику чітко простежується тенденція використання важких сортів палива не тільки для сучасних моделей СОД, а також переведення СОД попередніх моделей (спроектованих з умовою їхньої роботи на легких сортах палива) на експлуатацію на паливі з підвищеною в'язкістю [1].

Використання в суднових дизелях палив підвищеної в’язкості перш за все пов’язано зі намаганням зменшити експлуатаційні витрати на придбання рідкого палива. Одночасно з цим підвищенню економічності роботи суднових дизелів сприяє не лише вартість палива, але також визначення оптимальних режимів його використання, а також впровадження сучасних технологій, що підвищують якість його збереження, транспортування та згоряння. До однієї з технології, яка спрямована на підвищення економічності роботи дизелів морських суден, відноситься використання паливних присадок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Присадки до суднових палив в даний час набули досить широкого поширення на суднах, однак результат їх застосування не завжди отримує однозначну оцінку [2, 3]. Це пов'язано з різними причинами, які, перш за все, залежать від характеристик суднового дизеля та елементів його паливної системи, а також від забезпечення правильної технології використання присадок [4, 5].

Постановка завдання. На даний момент конструктивне і технологічне виконання суднових двигунів внутрішнього згоряння досягло своєї досконалості, що забезпечує мінімальні питомі витрати палива даних типів теплових двигунів в порівнянні з іншими (паровими котлами та газовими турбінами). У зв'язку з цим метою дослідження було визначення впливу паливних присадок на економічність роботи дизелів морських суден.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на чотирьох однотипних суднових дизелях Wartsila 6L32F, паливна система кожного з яких передбачала дозування до загального потоку палива, що прямує до паливних насосів високого тиску, дозерної установки, за допомогою якої в паливо додавалась присадка

Як паливні присадки використовувались продукти фірми Drew Marine: Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus, що мають наступні основні характеристики.

Паливна присадка Amergy 1000 – суміш органічних компонентів, призначена для забезпечення повнішого згорання і максимального використання енергії, що отримується від палива. Її можна використовувати в дизелях для різних видів палива, від дистиляту до залишкових сортів. Забезпечуючи повніше згорання, Amergy 1000 знижує кількість вихлопних часток і відкладень нагару. Завдяки такій дії, поверхні камери згорання підтримуються в чистішому стані, скорочуються витрати на ремонт, а також зменшуються витрати палива. Amergy 1000 не містить металів і повністю поглинається в процесі згорання. Норма дозування Amergy 1000 – 1 літр на 1...8 тонн палива (1 / 1000…1 / 8000). Оптимальне дозування, проте, може розрізнятися залежно від конструкції двигуна, якості палива і експлуатаційних умов. Amergy 1000 подається безперервно в паливну систему. Це краще всього досягається за допомогою дозуючого насоса або через витратомір. Така організація подачі препарату забезпечує належну дисперсію і рівномірний рівень розчинення в паливі.

Паливна присадка Amergize – суміш розчинних в мастилі органометаллів, найбільш ефективна для дизелів, що працюють на важкому паливі. Випробування присадки Amergize в двигунах показали, що поєднання інгредієнтів в Amergize забезпечує синергетичний ефект, що дозволяє знижувати відкладення і покращувати згорання. Amergize підходить як для середньо-, також і для малообертових дизелів, в яких виникають проблеми, пов'язані із згоранням і відкладеннями на внутрішніх поверхнях дизеля через наявність в паливі ванадію, сірки і натрію. Перетворювач відкладень в Amergize діє під час процесу згорання, вступаючи в реакцію з цими речовинами (ванадій, сірка, натрій) і змінюючи склад золи, що зменшує механічні втрати на подолання сил тертя. Стандартне дозування Amergize в межах 1 літр на 1...8 тонн палива. Дози можуть змінюватися залежно від рівня забруднення палива, конструкції двигуна і експлуатаційного стану енергетичної установки.

Паливна присадка Amergy XLS Plus призначена для низько сірчистих палив. Amergy XLS Plus – це суміш дисперсантів, активаторів згоряння, миючих засобів і мастильних присадок, призначена для зведення до мінімуму наслідків паливної нестабільності і зносу металевих поверхонь, що знаходяться в безпосередньому контакті один з одним. Палива з низьким вмістом сірки володіють низькими мастильними властивостями, необхідними для мінімізації безпосереднього контакту металевих деталей паливної системи і двигуна. Таким чином, тривале використання дизельного палива з низьким вмістом сірки може призвести до надмірного зносу плунжерних пар паливних насосів високого тиску, а також розпилювачів форсунок. Присадка до палива Amergy XLS містить високоефективні мастильні компоненти, які зводять до мінімуму прямий контакт металевих частин і збільшують термін служби елементів паливної системи, дозволяючи використовувати низько сірчисті види палива. Рекомендоване фірмою Drew Marine дозування Amergy XLS Plus в межах 1 літр на 1...8 тонн палива.

Метою першого етапу дослідження було визначення з вказаних присадок такої, яка сприяє найкращої економічності роботи дизеля – а саме забезпечує мінімальну питому витрату палива. Технологія випробувань полягала в наступному. Один з чотирьох дизелів (перший) експлуатувався на паливі без додавання паливної присадки. Три з чотирьох дизелів використовували під час роботи паливну присадку: другий – Amergy XLS, третій – Amergy 1000, четвертий – Amergize. Схожі рекомендовані значення дозування присадок дозволяли їх використання в кожному з дизелів з однаковою концентрацією, за яку була прийнята 1 літр присадки на 4 тонни палива. З метою забезпечення коректності проведення досліджень на кожному з чотирьох дизелів та можливості подальшого порівняння результатів експерименту, створювались умови, що забезпечували однакове навантаження на дизелі, а також однаковий час експлуатації дизелів.

Питома ефективна витрата палива b_e, кг/(кВт·год) розраховувалась за виразом:

$$b_e = B_{\text{год}} / N_e;$$

де $B_{\text{год}}$ – годинна витрата палива, кг/год, яка визначалась за показаннями витратоміру, що встановлено на магістралі подачі палива;

N_e – експлуатаційна потужність дизеля, кВт.

Зміна значень питомої витрати палива для різних умов проведення експерименту наведена на рис. 1

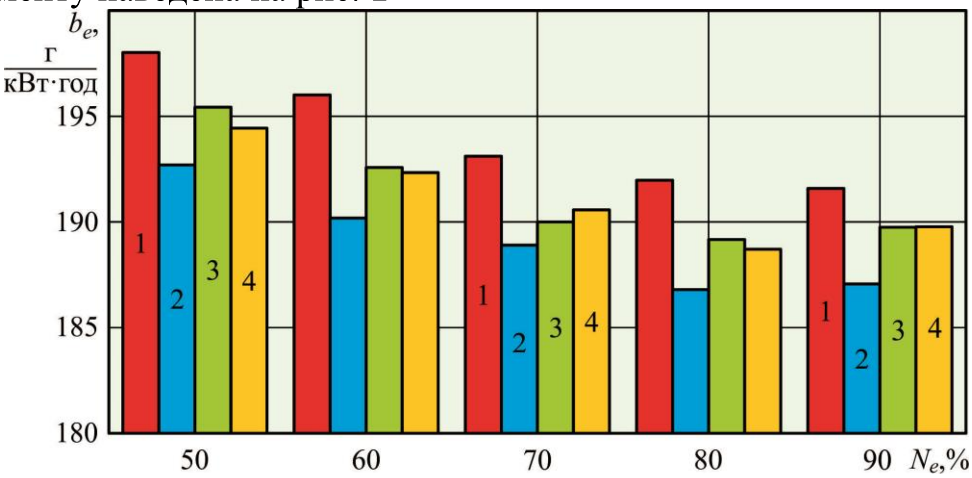


Рис. 1. Питома витрата палива на різних навантаженнях суднового дизеля Wartsila 6L32F: 1 – робота дизеля без використання паливної присадки; 2, 3, 4 – робота з використанням паливних присадок Amergy XLS, Amergy 1000, Amergize відповідно

Результати першого етапу досліджень дозволили визначити паливну присадку, що забезпечує мінімальні значення питомої витрати палива. Як така присадка була прийнята паливна присадка Amergy XLS.

Метою другого етапу досліджень було визначення оптимальної концентрації паливної присадки Amergy XLS – експериментальне визначення такої її концентрації, яка призводить до мінімальної витрати палива дизелем Wartsila 6L32F. Під час цього етапу досліджень використовувалась лише паливна присадка Amergy XLS, при цьому її концентрація в загальному обсязі палива складала 1 / 2000, 1 / 3000, 1 / 4000, 1 / 5000, 1 / 6000. Результати досліджень наведені на рис. 2.

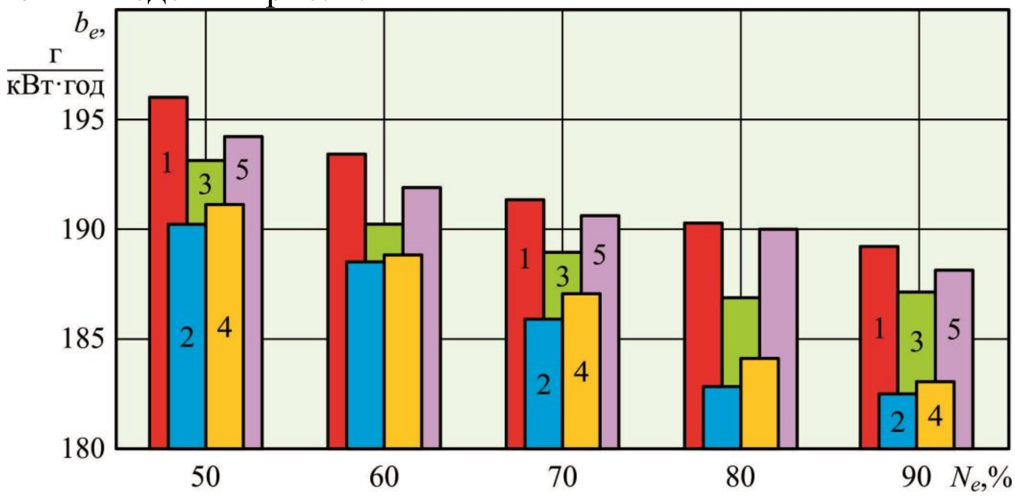


Рис. 2. Питома витрата палива на різних навантаженнях суднового дизеля Wartsila 6L32F для різної концентрації паливної присадки Amergy XLS: 1 – 1 / 2000, 2 – 1 / 3000, 3 – 1 / 4000, 4 – 1 / 5000, 5 – 1 / 6000

Висновки і перспективи подальших досліджень. Наведені результати дозволяють зробити наступні висновки.

1. Експериментально отримані результати, що підтверджують зниження питомої ефективної витрати палива під час використання паливних присадок, свідчать про інтенсифікацію процесу сумішоутворення і згоряння палива. Це призводить до більш повного використання його теплотворної здатності та зниження кількості палива, що догоряє на ході розширення і в випускному колекторі. При цьому відзначимо, що для різної концентрації присадки в базовому паливі спостерігається різна величина зниження питомої ефективної витрати палива.

2. Використання присадок до палива призводить до підвищення паливної економічності суднового дизеля. Під час використання паливних присадок на різних режимах роботи суднового дизеля Wartsila 6L32F було досягнуте 1,8…4,7 % зниження питомої ефективної витрати палива.

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

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021 – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 5 - 17.
2. Zablotsky Yu. V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of Marine Diesel When using Fuel Additives / Yu. V. Zabloysky, S. V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol 9(46). – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.
3. Сагін С.В., Побережний Р.В. Метод управління факторами ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації пропульсивних комплексів засобів водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 110-117. doi: 10.31653/smf46.2023.110-117.
4. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
5. Сагін С.В., Побережний Р.В. Метод управління факторами ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації пропульсивних комплексів засобів водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 110-117. doi: 10.31653/smf46.2023.110-117.

УДК 629.5

Кобецькой Д.В., Фрасинюк І.І.
Національний університет "Одеська морська академія"

Підвищення екологічності та економічного суднових дизелів під час використання альтернативних видів палива

Постановка проблеми в загальному вигляді. В теперішній час найбільше довкілля забруднюють вихлопи двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Ані атомна енергетика, ані промисловість не дають такого обсягу викидів, як ДВЗ. Саме тому до специфічних завдань експлуатації суднових енергетичних установок відносяться запобігання утворенню та нейтралізації екологічно небезпечних речовин, що утворюються під час використання нафтових палив. В результаті згоряння палива утворюються вуглекислий газ CO_2, оксиди сірки – SO_2 та SO_3, водяні пари, оксиди азоту NO_X та різні леткі речовини. Перенасичення атмосфери вуглекислим газом веде до так званого парникового ефекту. Крім атмосферного повітря, забруднення від ДВЗ за рахунок витоків і розливів палива, мастила, охолоджуючих рідин, організації несанкціонованих відкритих звалищ зі змінних компонентів двигунів, насамперед масляних фільтрів, зношених запчастин, суднової ганчір'я і т.і., піддаються грунт і вода [1]. У всіх країнах зростає кількість захворювань, викликаних азотовмісними сполуками. Тому останнім часом велика увага приділяється зниженню у продуктах згоряння ДВЗ шкідливих речовин, особливо оксидів азоту NO_X. Якщо не вжити відповідних заходів, то у найближчі 50 років територія планети виявиться непридатною для життя людини. Саме тому зусилля науковців спрямовані нині на пошук альтернативного палива – дешевого, калорійного та екологічно чистого [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До складу важкого палива (порівняно з легким) входить підвищений вміст сірки (до 0,5 %) та азоту (до 1,0 %). Під час їх згоряння утворюються токсичні компоненти – оксиди сірки SO_X та азоту NO_X, які негативно впливають на екологію та людину. У зв'язку з цим останнім часом велика увага приділяється зниженню у випускних газах (ВГ) шкідливих речовин, особливо оксидів азоту NO_X [3, 4]. З метою зниження концентрації цих речовин використовують різні методи і технології: упорскування води в повітряний та випускний ресивер, рециркуляція випускних газів, використання для забезпечення процесу згоряння альтернативного палива [5].

Постановка завдання. Протягом останніх десятиліть ведуться інтенсивні дослідження альтернативних палив. При цьому кращим вважається часткове заміщення традиційних видів моторного палива синтетичними рідкими вуглеводнями, які отримуються з природного газу, в силу їх низької собівартості. Крім традиційних палив, вже застосовують альтернативні палива, в тому числі спиртовмісні, які в дизелях, правда, що обмежені в використанні. Таким чином, дослідження альтернативних видів суднових палив, та вивчення їх впливу на робочий процес а також екологічні показники суднових ДВЗ є важливою та актуальною проблемою, розв'язання якої буде сприяти покращенню роботи суднових дизелів та зменшенню їх негативного впливу на довкілля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Альтернативні палива отримують в основному з сировини ненафтового походження і застосовують для скорочення споживання нафтопродуктів. Основними видами альтернативного палива є: зріджені горючі гази; спирти, продукти їх переробки і суміші з нафтовим паливом; паливні суміші; штучне рідке та газове паливо (біопаливо і біогаз); рослинні оливи; водень.

Привабливість спиртових палив полягає в тому, що їх можна отримати з будь-якої вуглеводневої сировини, як мінеральної (природний газ, вугілля, горючі сланці), так і органічної (картопля, буряк, інші сільськогосподарські культури, рослинні відходи, водорості та ін.). Серед переваг спиртових палив необхідно також відзначити наявність в їх молекулах атомів кисню, що дозволяє помітно поліпшити екологічні показники токсичності ВГ двигунів внутрішнього згоряння [4].

Серед спиртів найбільш привабливим для використання в ДВЗ є етиловий спирт (ЕС), або етанол. Це обумовлено хорошими екологічними якостями етанолу (його гранично допустима концентрація в повітрі робочої зони – найвища серед всіх спиртів) і можливістю його отримання з різних сировинних ресурсів. Результати експерименту, що підтверджують доцільність використання суміші ДП та ЕС, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Показники дизеля 4ЧН11/12,5 при роботі на різних паливах

Показник	ДП	96%ДП+4%ЕС
Часова витрата палива, $G_т$, кг/год	20,10	20,00
Обертальний момент дизеля, M_e, Н·м	322	318
Питома ефективна витрата палива, b_e, г/(кВт·год)	218,4	220,0
Ефективний ККД дизеля, η_e	0,374	0,376
Димність ВГ, K_X, %	16,0	12,0
Інтегральні питомі масові викиди, г/(кВт·год):		
оксидів азоту e_{NO_x}	7,018	5,798
оксиду вуглецю e_{CO}	1,723	1,879
незгорілих вуглеводнів e_{CH_x}	0,788	0,836

Однією з серйозних проблем, що виникають під час використання етанолу як моторного палива, є його погана змішуваність з нафтовим ДП та рядом альтернативних палив. Основна причина цього – наявність в етанолі, отриманому шляхом бродіння біомаси, значної кількості води, яка дуже погано поєднується з нафтопродуктами.

Із числа видів перспективного палива для ДВЗ особливої уваги заслуговує хімічно інертний діметиловий ефір. Діметилефір CH_3-O-CH_3 – безбарвний газ, який при тиску в 5,3 бар переходить в рідкий стан і не має сірки, розчиняється в етанолі, воді. В наш час це єдине синтетичне паливо, яке забезпечує повну заміну традиційного дизельного палива. Основною сировиною для виробництва $(CH_3)_2O$ повинна стати природна сировина, яка синтезує природний газ метан CH_4.

Використання як моторного палива діметилового ефіру $(CH_3)_2O$ дозволяє зменшити викиди в атмосферу оксидів вуглецю CO/CO_2, вуглеводнів C_iH_j і оксидів азоту NO_X на 30...70 % в порівнянні зі звичайним рідким вуглеводневим паливом. Результаті експериментів, що це підтверджують, надані у таблиці 2.

Таблиця 2. Технічні показники робочого циклу ДВЗ при зміні складу робочої суміші палива

Показники	ДП	Суміші палива, % ДП+% ДМЕ				ДМЕ
		90+10	80+20	70+30	60+40	
Теплота згоряння палива, кДж/кг	42500	41140	39780	38420	37060	28900
Теоретична кількість повітря для згоряння 1 кг палива, кг/кг	14,5	13,94	13,27	12,86	12,32	9,08
Індикаторний ККД	0,449	0,448	0,453	0,454	0,453	0,450
Інтегральні питомі масові викиди, г/(кВт·год):						
оксидів азоту e_{NO_x}	7,12	5,52	3,35	2,85	2,62	2,5
оксиду вуглецю e_{CO}	4,16	3,07	2,64	2,16	1,85	1,52
незгорілих вуглеводнів e_{CH_x}	1,13	0,81	0,68	0,42	0,29	0,25

Без перебільшення можна сказати, що дві проблеми, які неминуче стоять перед людством – виснаження запасів вуглеводних палив і небезпека наростаючого забруднення навколишнього середовища – таять в собі цілком реальну перспективу загибелі цивілізації під впливом їй же створених загроз. Заміна вуглеводневих палив воднем могла б радикально їх розв'язати. Подання про водень як про «паливо майбутнього» досить міцно утвердилася як серед фахівців, так і серед тих, кого взагалі цікавить майбутнє енергетики і транспорту. Дійсно, вода, основний продукт окислення водню, майже не затримує тепло біля поверхні Землі на відміну від вуглекислого газу, у величезній кількості викидається в атмосферу не тільки транспортом, а й усіма тепловими енергоустановки. Таким чином, проблема «парникового ефекту» знімається повністю. У продуктах згоряння водню не містяться токсичні продукти неповного згоряння вуглеводневих палив – окис вуглецю, вуглеводні і тверді частинки.

Що стосується запасів, то водень, але в пов'язаному вигляді, є найпоширенішим на Землі елементом. Щоб масштабне використання водню в якості палива для транспортних енергоустановок стало реальністю, повинні бути вирішені два складні завдання:

по-перше, організувати його масове і недороге виробництво;

по-друге, створити ефективні та надійні засоби зберігання запасу цього найлегшого в природі газу на борту судна в кількості, необхідній для забезпечення необхідної дальності автономного плавання.

Обидва завдання принципово можна розв'язати, хоча для організації виробництва водневого палива буде потрібно знайти шляхи для багаторазового збільшення виробництва електроенергії. У вирішенні проблеми зберігання за останні десятиліття досягнуто значного прогресу.

Моторні властивості водню – висока детонаційна стійкість, швидке згоряння і широкі межі займистості – сприяють створенню водневих двигунів.

Разом з тим існує ряд проблем, що ускладнюють отримання таких же потужних показників, як у дизельного двигуна. По-перше, хоча теплотворна здатність водню в розрахунку на одиницю маси майже в чотири рази вище, ніж у дизельного палива, стехіометричне співвідношення по відношенню до повітря також приблизно втричі вище. У поєднанні з низькою густиною газоподібного водню це призводить до того, що теплота згоряння одиниці об'єму водню-повітряної суміші нижче, ніж у дізельно-повітряної. Це означає пропорційне зниження циліндрової потужності при рівних умовах організації процесу. Це зниження може бути компенсоване швидшим і повним згорянням водню. Існує ще ряд причин, що ускладнюють використання стехіометричних сумішей в водневому двигуні.

Однією з проблем, пов'язаних з перекладом існуючих ДВЗ на водневе паливо, є небезпека передчасного займання водню-повітряної суміші.

Крім того, при переведенні діючих ДВЗ на водневе паливо слід вважатися з можливістю суттєвого підвищення механічних і теплових навантажень на деталі двигуна. Причина цього – висока швидкість згоряння водню. Швидкість поширення ламінарного полум'я для водню в кілька разів вище, ніж для вуглеводневих палив. Розрахункові і експериментальні дані, отримані при випробуваннях двигунів, що працюють на водні, показали, що швидкість поширення турбулентного полум'я в першому наближенні пропорційна швидкості ламінарного полум'я, відповідно, менше тривалість згоряння. При відсутності спеціальних заходів це призводить до підвищення тиску і температури в циліндрі двигуна.

Необхідно також враховувати, що підвищена температура в зоні згоряння призводить до прискореного утворення окислів азоту через окислення атмосферного азоту. Це може звести нанівець ефект усунення оксидів вуглецю та вуглеводнів, оскільки оксиди азоту мають більш сильну отруйну дію, ніж сполуки вуглецю.

Таким чином, для отримання всіх переваг, які потенційно дає водневе паливо, необхідно врахувати весь комплекс факторів, які можуть викликати погіршення потужних, економічних і екологічних показників, і намітити шляхи їх усунення або компенсації. Найбільш доцільний шлях вирішення таких завдань – комплексне моделювання всіх процесів в двигуні. У цьому випадку, на відміну від експериментальних підходів, можна отримати порівнянні дані про результати тих чи інших заходів, які не залежать від їх конкретного конструктивного рішення.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Суднові енергетичні установки є крупними споживачами рідких палив, що призводить не лише до підвищених витрат на йог придбання, підготування та використання, але й на погіршення екологічних показників навколишнього середовища. Одним зі шляхів, що забезпечують покращення екологічних показників роботи суднових ДВЗ є використання альтернативних палив. При цьому, найбільш доцільним є використання етанолу та диметилового ефіру, які з різною концентрацією додаються до дизельного палива, та таким чином утворюють паливну суміш. Найбільш ефективним видом альтернативного палива є водень, що володіє майже чотириразовою перевагою в теплотворної здатності у порівнянні з дизельним паливом. При цьому можливості використання водневих дизелів потребують глибокого попереднього теоретичного вивчення та моделювання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – P. 120. https://doi.org/10.3390/jmse11010120
2. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2020. – Vol. 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.
3. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines / Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 2(1(64)). – C. 34–41. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959.
4. Куропятник О.А. Аналіз експлуатаційних режимів роботи дизелів суден морського транспорту під час використання альтернативного палива // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 50. – С. 52-66. DOI: 10.31653/smf50.2025.52-66.
5. Мадей В.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Оцінка ефективності використання палива біологічного походження в суднових дизелях // Розвиток транспорту. – 2025. – № 2. – С. 71-85. https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.06.

УДК 629.5

Манзюк П.С., Міюсов М.В.
Національний університет "Одеська морська академія"

Забезпечення необхідного рівня емісії оксидів азоту суднових дизелів

Постановка проблеми в загальному вигляді. Питання охорони навколишнього середовища від забруднень є актуальними для всієї енергетики, включно з судновою. Щорічні викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами суднових дизельних двигунів сягають мільйонів тонн. Існують обмеження на викиди шкідливих речовин від спалювання суднового палива, встановлені міжнародними програмами захисту атмосфери та вимогами Міжнародної морської організації (International Maritime Organization – IMO). У липні 2010 р. набула чинності нова редакція Додатку VI до Міжнародної конвенції з запобігання забрудненню з суден (MARPOL 73/78), що встановлює суворіші вимоги до суден [1].

Конвенція MARPOL 73/78 передбачає заходи, спрямовані на зменшення та запобігання забрудненню морського середовища як нафтою та нафтопродуктами, так і іншими шкідливими речовинами, які перевозяться суднами або утворюються в процесі їх експлуатації.

Правові норми та інструкції щодо запобігання забрудненню атмосфери з суден містяться в Додатку VI до Конвенції MARPOL 73/78. У цьому додатку визначені граничні рівні викидів оксидів сірки та азоту від суднових енергетичних установок, а також заборонено неконтрольовані викиди речовин, що руйнують озоновий шар [2]. Нові вимоги стосуються практично всіх груп шкідливих викидів, зокрема NO_x (рис. 1).

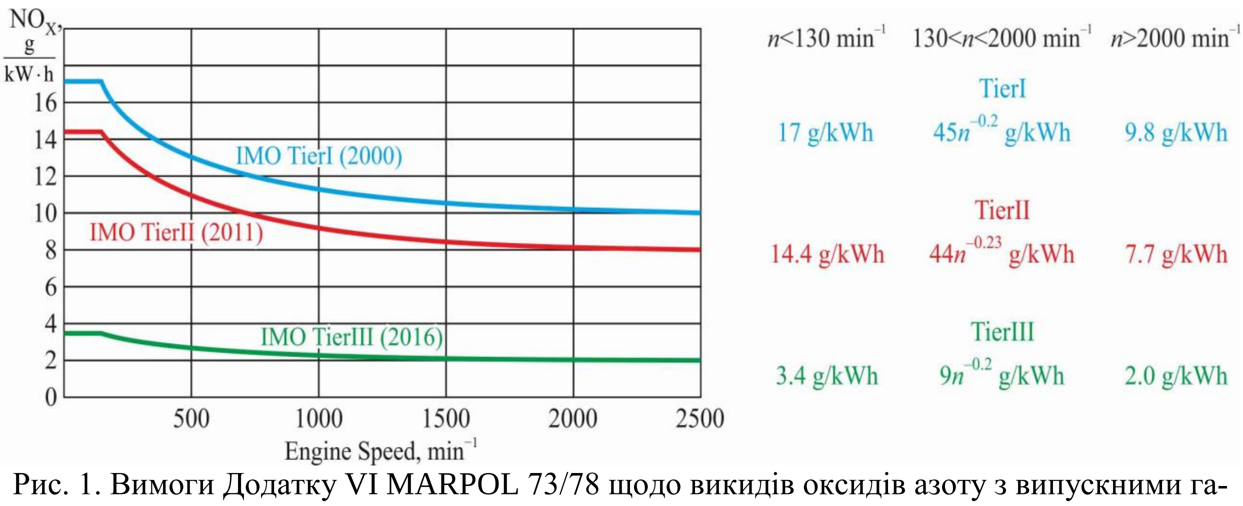


Рис. 1. Вимоги Додатку VI MARPOL 73/78 щодо викидів оксидів азоту з випускними газами суднових ДВЗ

Відповідно до нових вимог, запроваджується триступенева система стандартів викидів оксидів азоту NO_X: перший ступінь – для суден, побудованих до 01.01.2011 р. (чинні на сьогодні нормативи для суден, побудованих у 2000 р. та пізніше); другий – для суден, побудованих після 01.01.2011 р. (зниження норми викидів оксидів азоту на 20 %); третій – для суден, побудованих після 01.01.2016 р. (зниження викидів на 80 %). Зазначені вимоги не поширюються на судна довжиною менше 24 м та потужністю менше 750 кВт.

Питання зниження викидів оксидів азоту є особливо актуальним для суднових чотиритактних дизелів, які експлуатуються не лише під час морських та океанських переходів, але й під час стоянки суден у портах – зонах із найбільш жорстким екологічним контролем.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Провідні виробники дизелів, такі як MAN-B&W, Wärtsilä, Hyundai, Mitsubishi, CAT та інші, оснащують свої двигуни дорогими системами організації та контролю запалення палива, сучасним високотехнологічним обладнанням, що зменшує кількість шкідливих викидів. Останніми роками це сприяло поширенню дизелів із безпосереднім уприскуванням палива та електронним управлінням, що забезпечує точне та гнучке регулювання параметрів упорскування, покращує експлуатаційні характеристики, підвищує надійність і відкриває резерви для підвищення технічного рівня. Саме такий підхід дозволяє задовольнити широкий спектр вимог до сучасних дизелів.

Для зменшення вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах суднових двигунів застосовуються різні методи. Сучасні методи зниження шкідливих викидів є наукоємними технологіями, розробленими провідними світовими інститутами. Наприклад, компанія MAN B&W активно працює над впровадженням технології рециркуляції вихлопних газів (EGR). Як стверджує виробник, отримано багатообіцяючі результати, які забезпечують зниження викидів NO_X на десятиліття. Наприклад, при рівні рециркуляції 15...20 % досягається зменшення викидів NO_X на 60...80 % [3].

Безперервне впорскування води (CWI) у повітряний заряд розглядається як найбільш економічно ефективна система для досягнення невисокого рівня 10..30 % зниження NO_X, однак невеликий досвід застосування цього методу вимагає подальших досліджень.

Технологія безпосереднього впорскування води (DWI) у циліндр є ефективною для середнього рівня зниження викидів NO_X 40...60 %, але потребує модернізації двигуна.

Системи селективного каталітичного відновлення (SCR) та селективного некаталітичного відновлення (SNCR) оксидів азоту мають найвищу вартість серед перелічених технологій. Їхнє застосування дозволяє досягти майже повного усунення викидів NO_X. Ці технології ідеально підходять для суден, що працюють у регіонах із жорсткими екологічними вимогами [4].

Використання водопаливних емульсій (ВПЕ) вважається одним із перспективних методів. Це проста та маловитратна технологія для досягнення середнього рівня 30...50 % зниження викидів NO_X на існуючих суднах без значних модифікацій двигуна [5].

Мета дослідження. Метою роботи є розробка технології, спрямованої на зменшення викидів оксидів азоту з відпрацьованими газами суднових дизелів.

Виклад основного матеріалу. Проведений аналіз існуючих методів зниження шкідливих викидів дозволяє запропонувати наступне рішення для підвищення екологічності суднових дизелів.

Якщо забезпечити подачу азоту в циліндри двигуна після періоду затримки самозаймання, це викличе екзотермічну реакцію окиснення азоту. У результаті сповільниться процес перетворення хімічної енергії палива на теплову, знизиться швидкість зростання температури та тиску в камері згоряння. Це призведе до зменшення «жорсткості» роботи дизеля та подовження періоду початкового горіння. Наступним кроком є подача повітря, збагаченого киснем, на початку періоду основного горіння, що сприятиме підвищенню потужності, зниженню питомої витрати палива та зменшенню шкідливих викидів [6].

Технічні характеристики установки розділення повітря, яка може входити до складу суднової енергетичної установки, дозволяють отримувати повітря, збагачене киснем до 40 % за об'ємом. Підвищення вмісту кисню в паливо-окиснювальній суміші призведе до покращення якості згоряння палива та можливості спалювати більшу його кількість за того ж стехіометричного співвідношення кисню та палива. Це створює умови для потенційного підвищення теплового ККД, потужності дизеля та сприяє керуванню процесом згоряння. При використанні збагаченого киснем повітря викиди видимого диму, твердих частинок і незгорілих вуглеводнів зменшаться внаслідок більш повного згоряння в широкому діапазоні навантажень.

Для реалізації такого робочого циклу пропонується схема (рис. 2 та рис. 3), до складу якої входять живильні компресори для подачі стиснутого повітря через фільтри попередньої підготовки, мембранні модулі, що розділяють повітря на N_2 та O_2, які за допомогою прискорювальних пристроїв надходять у резервуари з тиском 200 бар відповідно. Також передбачається певна модернізація двигуна шляхом додавання системи подачі азоту та збагаченого киснем повітря, а саме: форсунок, контрольних пристроїв об'ємного впорскування та електронного блоку управління подачею. Крім того, пропонується впровадити програмне забезпечення для детального покрокового контролю роботи установки на всіх стадіях горіння. Запропоноване програмне забезпечення представлено у вигляді комп'ютерної програми, сумісної з різними операційними системами (рис. 4).

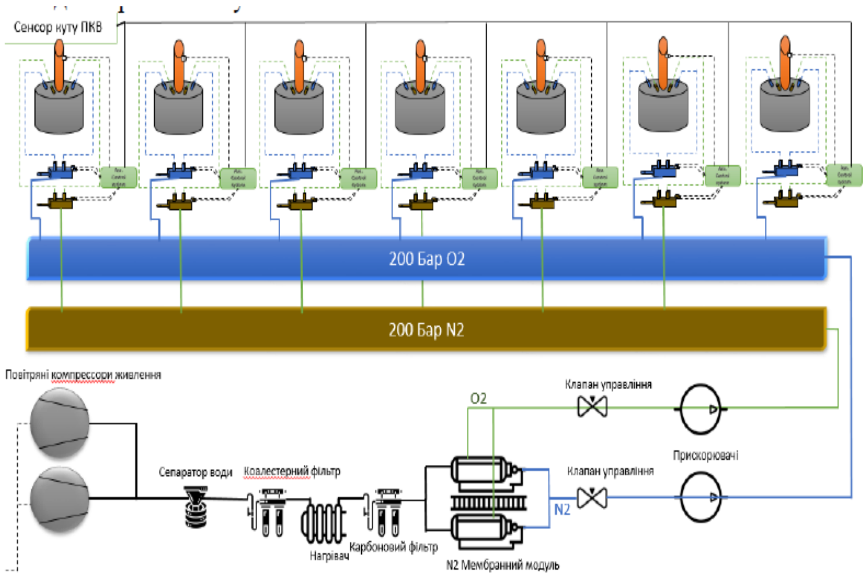


Рис. 2. Принципова схема генерації азоту та збагаченого киснем повітря

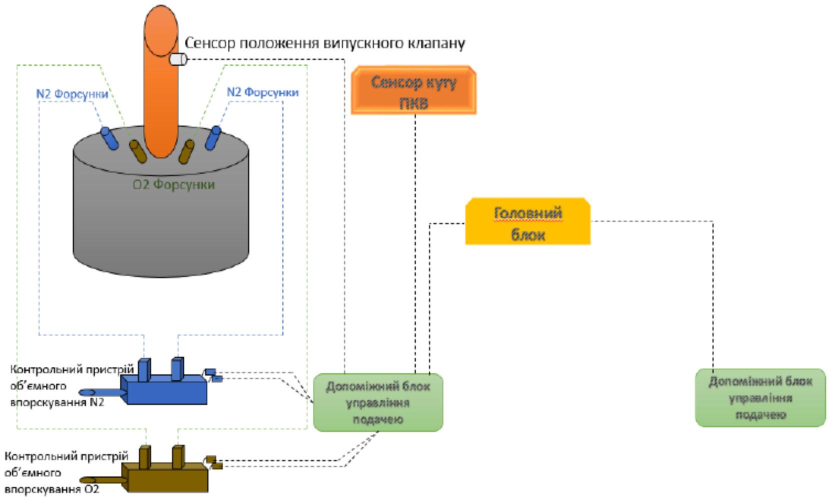


Рис. 3. Принципова схема подачі азоту та збагаченого киснем повітря в циліндр

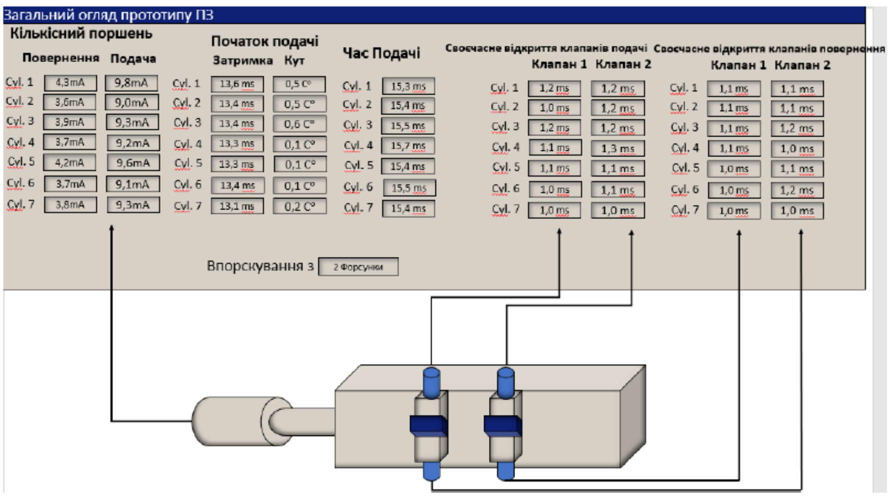


Рис. 4. Загальний огляд прототипу програмного забезпечення

Висновки і перспективи подальших досліджень. Одним із методів зниження викидів оксидів азоту суднових чотиритактних дизелів є додаткова подача азоту в циліндри. Це сприятиме зниженню температури в циліндрі під час процесів стиснення та згоряння. Очевидними перевагами використання азоту та збагаченого киснем повітря порівняно з іншими методами підвищення потужності та дотримання вимог MARPOL є: більш висока питома потужність циліндра за того ж або незначно вищого максимального тиску, а також суттєве зниження шкідливих викидів і покращення якості згоряння палива. Оскільки необхідні зміни в системі наддуву двигуна не є складними, запропонована схема установки може використовуватися в енергетичних установках суден морського та внутрішнього водного транспорту.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuˇcera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373.

2. Куропятник О.А. Забезпечення екологічних показників суднових дизелів шляхом використання систем рециркуляції випускних газів високого тиску // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 121-132. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.14.

3. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 5 - 9.

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

5. Сагін С.В., Куропятник О.А. Використання системи рециркуляції випускних газів високого тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів // Розвиток транспорту. – 2025. – № 2. – С. 86-98. https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.07.

6. Куропятник О.А. Визначення оптимальних умов експлуатації систем каталітичного відновлення випускних газів дизелів суден морського транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 50. – С. 67-79. DOI: 10.31653/smf50.2025.67-79.

УДК 621.644:628.168:629.5

Іонченко Д.К., Колегаєв М. О.
Національний університет «Одеська морська академія».

Підвищення ефективності фільтрації суднових нафтовмісних вод

Постановка проблеми в загальному вигляді

Експлуатація суден морського та внутрішнього водного транспорту є невід'ємною складовою світової економіки, проте супроводжується значним екологічним ризиком для морського середовища. Однією з головних загроз є потрапляння нафти та нафтопродуктів у водойми внаслідок технічних несправностей, аварій, несанкціонованих скидів або недостатньої ефективності систем очищення суднових стічних вод (рис. 1).

Рис. 1 – Скидання льяльних вод [3]

Забруднення Світового океану нафтою та нафтопродуктами є глобальною екологічною проблемою. Основними джерелами нафтового забруднення є транспортування нафти, аварійні розливи та експлуатація суден, що щороку призводить до надходження у Світовий океан близько 2 млн. т нафтопродуктів. Найбільші втрати нафти пов'язані з її перевезенням танкерами, аваріями на бурових платформах та пошкодженнями підводних трубопроводів, що спричиняє масштабні екологічні катастрофи, як, наприклад, вибух на платформі Deepwater Horizon у 2010 році (рис. 2).

Рис. 2 – Вибух на платформі Deepwater Horizon [4]

За оцінками, близько 23 % нафтових забруднень надходять із суден, 17 % пов'язані з втратами у портах, а решта припадає на аварії та буріння. Зменшення обсягів забруднення можливе лише шляхом удосконалення технологій транспортування, зберігання та переробки нафти, впровадження сучасних систем очищення стічних вод, а також посилення міжнародного екологічного контролю [2].

Відповідно до вимог Міжнародної конвенції MARPOL 73/78, скидання лляльних вод дозволяється лише за умови, якщо вміст нафти у стоках не перевищує 15 ppm [1]. Проте навіть сучасні системи очищення не завжди здатні стабільно забезпечувати цей показник через обмеження ефективності традиційних механічних, гравітаційних та фізико-хімічних методів.

Тому актуальною науково-технічною проблемою є підвищення ефективності очищення нафтовмісних суднових вод.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема очищення лляльних вод активно досліджується багатьма науковцями. Основна увага приділяється удосконаленню механічних та гравітаційних методів, які, однак, не забезпечують повного видалення дрібнодисперсних нафтопродуктів. Мембранні технології мають високий ступінь очищення, але характеризуються високою вартістю, чутливістю до засмічення та потребують регулярного технічного обслуговування.

Перспективним напрямом вважається коалесцентна фільтрація, де процес відділення базується на злитті дрібних крапель нафтопродуктів у більші, які легко відокремлюються в сепараторі. Наукові роботи [5-9] доводять, що ефективність такого процесу визначається насамперед властивостями фільтраційного матеріалу – його пористістю, гідрофобністю, хімічною стійкістю, структурою волокон, забезпеченням рівномірного розподілу потоку, високою площею контакту фаз та довговічністю у суднових умовах [9].

Постановка завдання

Метою дослідження є підвищення ефективності очищення нафтовмісних суднових вод за рахунок застосування нетканих матеріалів у коалесцентному сепараторі.

Виклад основного матеріалу дослідження

Процес очищення лляльних вод на борту суден базується на поетапному вилученні дисперсних нафтових крапель із водної фази. У коалесцентному сепараторі первинне розділення здійснюється за рахунок гравітаційного осадження, під час якого видаляються переважно великі краплі та механічні домішки. Проте після цього етапу у водній фазі зберігається значна кількість часток, оскільки діаметр нафтових крапель може бути меншим за 50 мкм, що робить їх недостатньо важкими для ефективного вилучення лише під дією сили тяжіння . Наукове положення роботи полягає у підтвердженні залежності ефективності коалесцентної фільтрації від фізико-хімічних властивостей нетканого матеріалу (рис. 3), а також у доведенні його переваг над традиційними фільтраційними елементами. Завдяки волокнистій структурі, високій питомій поверхні та властивостей, неткані матеріали сприяють активнішому злиттю дрібнодисперсних крапель нафтопродуктів, що інтенсифікує процес розділення фаз [5,10].

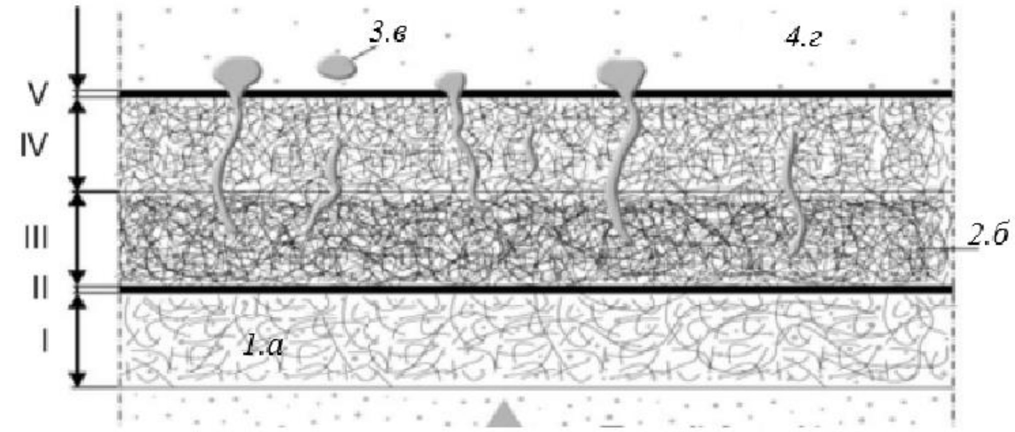


Рис. 3 – Потік емульсії крізь нетканний матеріал та коалесценція нафтових частинок. [10]
а – нафтові частинки перед бар’єром; **б** – нафтові частинки, затриманої на бар’єрі; **в** – нафтові частинки, що вийшли з бар’єра; **г** – нафтові частинки, яка пройшла крізь бар’єр;

Отримані результати мають практичне значення для розробки та модернізації суднових систем очищення, спрямованих на дотримання міжнародних екологічних вимог і зниження рівня нафтового забруднення морського середовища. Використання нетканих матеріалів дозволяє підвищити стабільність і довговічність фільтрів, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити надійність суднових систем очищення.

Висновки і перспективи досліджень

1. Аналіз сучасних методів очищення нафтовмісних суднових вод засвідчив обмежену ефективність традиційних механічних і гравітаційних технологій

щодо видалення дрібнодисперсних нафтопродуктів. Це ускладнює досягнення стабільної відповідності вимогам екологічного законодавства, зокрема Конвенції MARPOL 73/78.

2. Коалесцентна фільтрація розглядається у наукових публікаціях як перспективний напрям удосконалення систем очищення, особливо в частині доочищення лляльних вод. Ключовим чинником ефективності цього процесу є властивості фільтраційного матеріалу, що визначає інтенсивність злиття нафтопродуктів і стабільність розділення фаз.

3. На основі аналізу опублікованих експериментальних досліджень встановлено, що неткані матеріали з оптимальними фізико-хімічними характеристиками здатні значно підвищити ефективність коалесцентної фільтрації без необхідності модифікації конструкції існуючих сепараторів.

4. За результатами аналітичного узагальнення наукових джерел, обґрунтовано доцільність подальших прикладних досліджень щодо впровадження нетканих матеріалів у суднові системи очищення. Зокрема, перспективним є напрям інтеграції фільтраційних матеріалів із сенсорними елементами для підвищення ефективності експлуатаційного контролю.

5. У межах магістерської роботи доцільно зосередитися на аналітичному порівнянні характеристик нетканих фільтраційних матеріалів, моделюванні умов їх роботи в коалесцентних сепараторах, а також на оцінці потенціалу їх використання з урахуванням суднових експлуатаційних обмежень та екологічних вимог.

УДК 629.5

Сокол Д.Р., Заблоцький Ю.В.
Національний університет "Одеська морська академія"

Підвищення ефективності очищення суднових вод, що містять нафту

Постановка проблеми в загальному вигляді. Під час експлуатації морських суден та їх енергетичних установок утворюються різного виду відходи, у тому числі води, що містять нафту (ВМН). Схема утворення відходів, що забруднюють довкілля під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту надана на рис. 1.

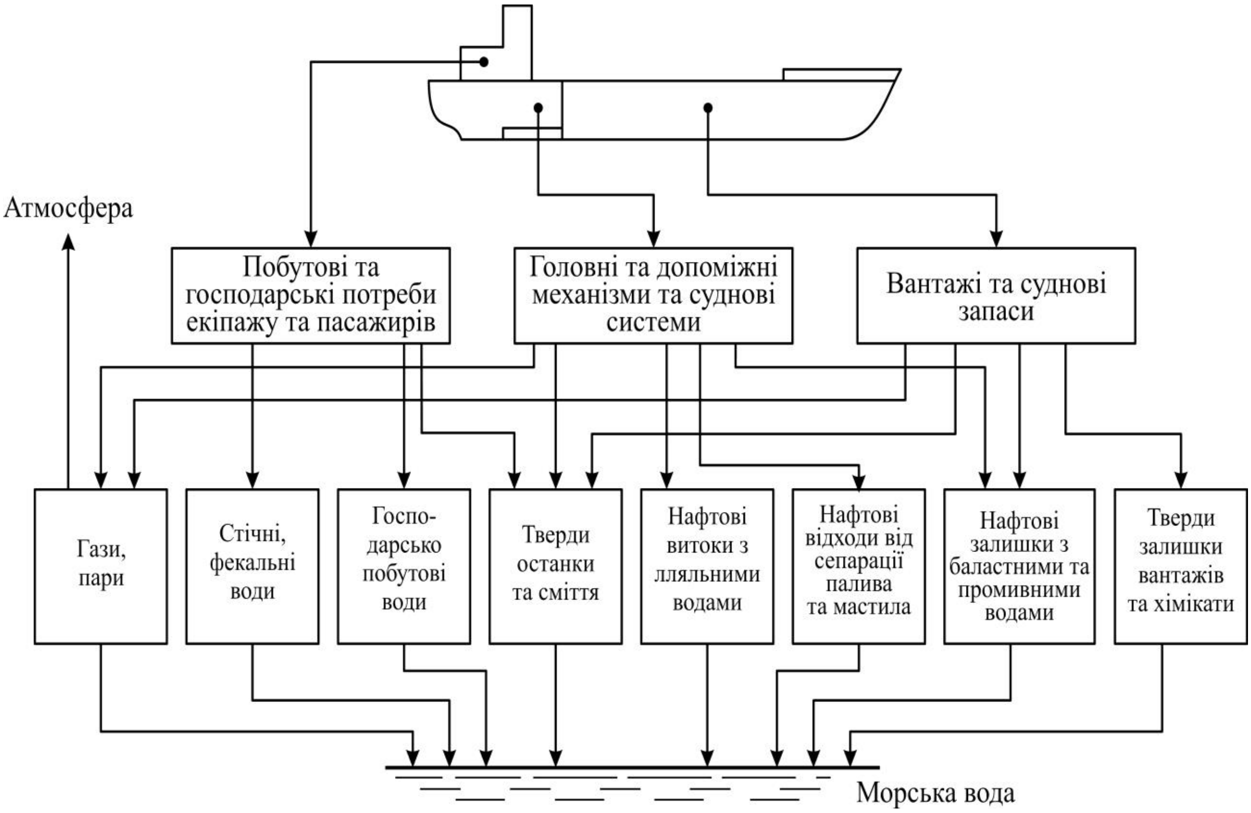


Рис. 1. Схема утворення відходів, що забруднюють довкілля під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту

Згідно з Додатком IV до МАРПОЛ 73/78 та Правил Регістру судноплавства України термін «води, що містять нафту» трактується як «суміш води з будь-яким вмістом нафти», а «нафта» – як «нафта в будь-якому вигляді, включаючи сиру, рідке паливо, нафтові залишки (шлам), нафтові опади та очищені нафтопродукти». У Додатку I до МАРПОЛ 73/78 термін «води, що містять нафту» відсутній. У цьому нормативному документі міститься термін, що має аналогічне практичне значення – «льяльна вода, що містять нафту», тобто вода, яка може містити нафту внаслідок її експлуатаційних витоків чи обслуговування механізмів у машинних приміщеннях. Будь-яка рідина, що надходить у льяльну систему, включаючи льяльні колодязі, трубопроводи льяльної системи, лляла, танки льяльних вод, розглядається як льяльна вода, що містить нафту [1].

Очищення води, що містять нафту на суднах морського транспорту відноситься до найбільш актуальних завдань, вирішення якої безпосередньо пов'язане з надійністю технічної експлуатації суднового обладнання, а також з охороною довкілля від забруднення водами, що містять нафту, особливо в прибережних районах при судноплавстві та діяльності берегових підприємств. На морському транспорті для очищення води, що містять нафту набули поширення сепараційні установки відстійно-коалесцентного типу. Однак це просте та достатнє ефективне обладнання виявилося практично непридатним, коли на морських суднах стали використовувати важкі сорти рідкого палива із відносною густиною 0,95..0,98 кг/см^3. Нафтоводяна суміш, що містить такі вуглеводні в емульгованому стан, не поділяються гравітацією навіть при нагріванні [1], тому очищення подібних сумішей до стану, що вимагається Конвенцією МАРПОЛ 73/78 (а саме забезпечення перед скиданням за борт концентрацією нафтопродуктів в льяльної воді не більше 15 млн$^{-1}$) є актуальним завданням

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для виділення нафтопродуктів з ВМН вод на судні має бути обладнання, що забезпечує сепарацію та фільтрацію. Судна, що не мають фільтруючого обладнання, повинні зберігати всі ВМН на борту та здавати їх на берегові або плавучі приймальні споруди [2].

Відповідно до існуючих вимог будь-яке судно валовою місткістю 400 рег. тонн і більше, але менше ніж 10000 рег. тонн має бути оснащене фільтруючим обладнанням. Відповідно до Додатку I, Правила 16, Конвенції МАРПОЛ, судно валовою місткістю 10000 рег. тонн і більше повинно бути оснащене фільтруючим обладнанням та пристроєм сигналізації та автоматичного припинення скидання нафтовмісної суміші у разі, якщо вміст нафти у стоку перевищує 15 млн$^{-1}$ (рис. 2) [3, 4].

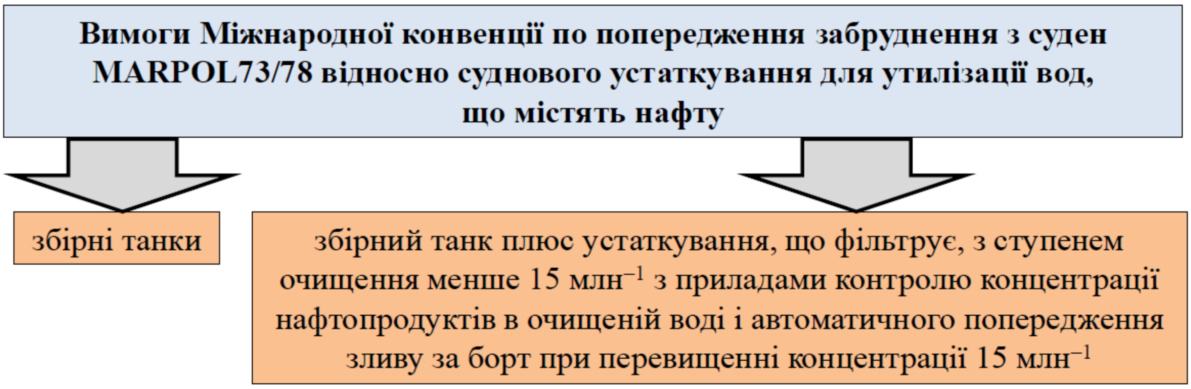


Рис. 2.Вимоги МАРПОЛ щодо суднового обладнання з очищення ВМН

Постановка завдання. Метою дослідження є оптимізації технологічної схеми очищення ВМН, при якої забезпечується вміст нафти в ВМН перед її видаленням за борт не більше 15 млн$^{-1}$ за найменший час з найменшими втратами енергії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для успішного вирішення завдання підвищення ефективності очищення ВМН безпосередньо в суднових умовах необхідно використовувати комплексний системний підхід, якій дозволяє враховувати вплив усіх елементів суднової енергетичної установки на якість очищення [5].

З проведеного аналізу різних способів і типів сепараторів для очищення вод, що містять нафту СЕУ витікає, що найбільш перспективними і такими, що мають значні можливості підвищення ефективності роботи є коалесциючі елементи, що мають нежорстку структуру, що дозволяє робити їх ефективну регенерацію. До таких коалесциючих елементів при відповідному конструктивному виконанні можна віднести тканинні фільтруючі елементи, мембранні фільтруючі елементи і коалесциючі елементи, що виконані у вигляді шару гранул. Суттєвий вплив на якість очищення спричиняє тип пристрою, що перекачує і місце його розташування в системі для очищення вод, що містять нафту.

Найбільш ефективним технічним рішенням для цієї сфери застосування є динамічні системи очищення ВМН, в яких використовується метод відцентрової сепарації, реалізований за допомогою високошвидкісних тарілчастих сепараторів [5, 6].

Діюча в статичних системах сепарації природна сила гравітації (навантаження $1g$) в таких динамічних системах може бути збільшена в тисячі разів. Один звичайний відцентровий тарілчастий сепаратор дорівнює по ефективності традиційній статичній системі з площею відстою 20000 $м^2$.

Крім того, гіроскопічний ефект рідини, що обертається з високою швидкістю усередині барабана сепаратора, нівелює дію кільової і бортової хитавиці. Результат – незмінно висока ефективність розподілу компонентів. Відцентрові тарілчасті сепаратори вже впродовж десятків років демонструють прекрасну ефективність очищення дизельного палива і мастила від води та твердих часток в морській індустрії [6].

Як сепаратор, що забезпечує виконання всіх вимог по якості очищення ВМН, доцільно використання сучасного сепаратору BWPX307 в комплексі з сепараційною установкою PureBilge.

Принцип дії установки сепарації PureBilge з сепаратором BWPX307 показаний на рис. 1. Установка працює в такій спосіб. Живильний насос з регулюванням частоти направляє води, що містять нафту або трюмні води тільки з відстійного танка. Далі лляльна вода проходить через сітчастий фільтр, який затримує великі часток з рідини перед входом в теплообмінник, який піднімає температуру рідини на необхідному рівні, як правило, між 60° і 70°С, для оптимальної ефективності розподілу. Потім триходовий перемикальний клапан направляє рідину на сепарацію, якщо дотримані усі умови технологічного процесу, такі, як температура, тиски подачі і швидкість сепаратора. Якщо який-небудь процес умов не виконується, клапан знову перемикає циркуляцію рідини знову у відстійний танк лляльних вод. Високошвидкісний відцентровий сепаратор безперервно обробляє великі об'єми льяльних вод. Випуск масла безперервно відводиться в резервуар відпрацьованого масла. Тверді частки, які збираються на периферії чаші сепаратора відводяться з перервами в шламовий танк.

Розвантаження, яке зазвичай встановлюється на 20 хвилин, відбувається в задані інтервали залежно від установки. Вбудований водяний насос, або диск дифузора, постійно розвантажує відділену лляльну воду через вихід чистої води з сепаратора. Відведення лляльних вод залежить від вмісту нафти в них, яке безперервно контролюються на точці відбору проб. Якщо вміст нафти нижче заданої межі (яка може бути встановлена в межах 5…15 млн$^{-1}$), відділена ВМН може бути видалена безпосередньо за борт або в «чистий» танк ВМН для зливу за борт пізніше.

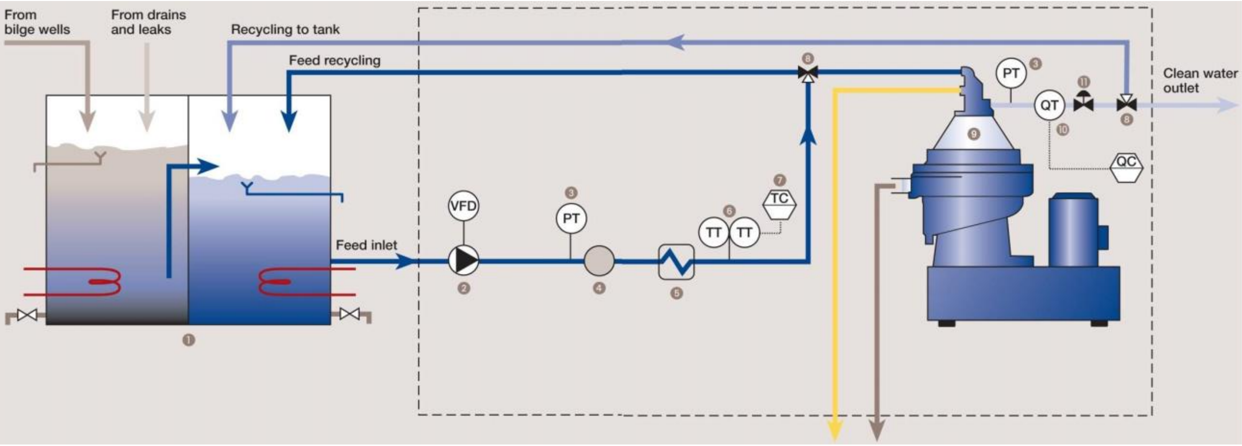


Рис. 1. Сепараційна установка PureBilge:
1 – двохстадійний відстійний танк льяльних вод; 2 – живильний насос;
3 – манометр; 4 – фільтр; 5 – нагрівач; 6 – температурний трансмітер;
7 – температурний контролер; 8 – триходовий клапан переключення;
9 – BWPX 307 високо швидкісний відцентровий сепаратор; 10 – водо-мастильний колектор; 11 – моделюючий клапан постійного тиску

Експлуатація сепараційного та фільтруючого обладнання повинна здійснюватися в суворій відповідності з наявними на них інструкціями. Перевищення, наприклад, швидкості перекачування, заданою інструкцією, може стати причиною збільшення вмісту нафти в водах, що скидаються. Максимальну швидкість перекачування слід застосовувати при низькій концентрації нафти та воді, а при обробці сильно забрудненої води швидкість перекачування рекомендується знижувати. Усі відмови в роботі сепараційного та фільтруючого обладнання необхідно фіксувати у формулярах на це обладнання. У разі коли встановлене на судні обладнання через свої технічні характеристики або через несправність не може знизити вміст нафти в ВМН та / або баластових водах до максимально допустимого рівня (15 млн–1), скидання за борт не проводиться. В цьому випадку ВМН необхідно збирати в суднові відстійні цистерни з подальшим здаванням в портову приймальну споруду.

Висновки і перспективи подальших досліджень. При експлуатації суднових енергетичних установок необхідно суворо дотримуватися вимог конвенції МАРПОЛ73/78, а також впроваджувати в суднову енергетику технічне обладнання, яке не лише забезпечує виконання нормативних вимогу цієї конвенції, але і гарантує їх виконання з високим ступенем резервування. Як таке обладнання можливо використання сучасної системи сепарації вод, що містять нафту – PureBilge, в склад якої включений сепаратор BWPX307. Ця система забезпечує рівень очищення вод, що містять нафту у діапазоні 5…7 млн–1, що дозволяє безпечне скидання очищених вод в будь-яких районах Світового океану та дозволяє судновласникам виконувати відповідні існуючи на теперішній час екологічні вимоги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

2. Sagin S. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe / S. Sagin, O. Kuropyatnyk, A. Sagin, I. Tkachenko, O. Fomin, V. Píštěk, P. Kučera // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. 10, 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331/

3. Ткаченко И.В. Использование гидродинамической суперкавитации для разделения и очистки нефтесодержащих вод морских судов / И.В. Ткаченко // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Т. 2. – С. 59-62.

4. Ткаченко І. В. Розробка технології розділення і очищення вод, що містять нафту / І. В. Ткаченко // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 24-30. DOI : 10.31653/smf340.2020.24-30.

5. М’ягкий М.М. Вдосконалення процесу очищення вод, що містять нафту / М.М. М’ягкий, І.І. Ткаченко // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 26-29. DOI : 10.31653/smf341.2020.26-29

6. Ткаченко І. В. Використання в суднових енергетичних установках технології гідродинамічної суперкавітації для розділення і очищення вод, що містять нафту / І. В. Ткаченко // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць, 2020. – № 2(62). – С. 130-141. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-130-141.

УДК 629.5

Тігінян В., Фрасинюк І.І.
Національний університет "Одеська морська академія"

Аналіз змін експлуатаційних показників роботи суднових дизелів під час використання хімічної обробки палива

Постановка проблеми в загальному вигляді. Двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) займають домінуюче положення на суднах морського та внутрішнього водного транспорту, де вони забезпечують рух судна та постачання електроенергією суднових механізмів та приладів. Отримання корисної роботи в ДВЗ (як в будь-якому тепловому двигуні) неможливо без використання палива, основним типом якого щодо суднових енергетичних установок є та буде залишатися на протязі найближчих років рідке паливо нафтового походження. Використання подібного палива в суднових ДВЗ пов’язано з його попередньої обробкою, одним з видів якої є хімічна, або використання присадок. Провідні фірми, що виробляють присадки до суднових палив та постачають їх на морські судна, надають лише загальні рекомендації щодо їх використання. При цьому залишаються невирішеними питання визначення оптимальної концентрації присадок для різних типів палива та різних за характеристиками дизелів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до стандарту на паливо DIS DP-8217, розробленого міжнародною організацією по стандартизації ISO, в суднових двигунах внутрішнього згоряння використовуються два сорти дистилятного палива – чисте дизельне паливо DMB і змішане паливо DMC, а також очищене паливо RM. Діапазон в’язкості палив класу DMB і DMC за 100 °С лежить в межах 5...10 сСт, а їх густина за 15 °С становить 820...850 кг/м^3. В зв'язку з цим дані сорти палива називають легкими. Палива класу RM (RMG, RMH, RMK) мають в'язкість 35...55 сСт за 100 °С і густину 990...1010 кг/м^3 за 15 °С і називаються важкими. Важкі сорти мають більш низьку вартість в порівнянні з легкими, що визначає їх використання в суднових дизелях для скорочення фінансових витрат на придбання палива. Також необхідно відзначити, що важкі сорти палив застосовуються для забезпечення роботи суднових дизелів на всіх режимах роботи, в тому числі на режимах пуску та реверсування [1].

В деяких дослідженнях було визначено позитивний вплив хімічної обробки палива на процес його згоряння, а також на екологічні показники роботи дизелів. Найбільш частіше ці дослідження виконувались для номінального, або ближчих до номінального режимів роботи дизелів, тому їх результати не можуть буту поширені на весь діапазон експлуатаційних режимів роботи ДВЗ, якій знаходиться в межах (0,45…1,1)$N_{еном}$ для головних та (0,3…0,85)$N_{еном}$ для допоміжних двигунів, де – $N_{еном}$ номінальна потужність дизеля [2].

Постановка завдання. Різноманіття способів підготовки палива повністю не вирішує основної мети цього процесу – забезпечення якісного очищення палива з одночасною мінімальною витратою енергіє на цій процес. Одним зі способів, що забезпечує ці вимоги, є хімічна обробка палива, під якою в більшості випадків розуміють використання паливних присадок.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для покращення якості підготовки палива та паливної економічності на багатьох морських суднах використовується хімічна обробка палива, при якої в паливну систему за допомогою спеціальних дозуючих пристроїв вводяться спеціальні реагенти (присадки), яки сприяють активації різноманітних властивостей палива. Однією з таких присадок є паливна присадка Fuelcare фірми Unitor, яка додається в паливо підвищеної в’язкості, покращує процес передполум'яних перетворень і тим самим полегшує та прискорює займання палива. Як найбільш доцільне точка введення присадки до палива – витратна паливна цистерна, безпосередньо перед паливної апаратурою високого тиску (паливним насосом високого тиску в випадку використання присадки для двигунів з механічним впорскуванням палива, або системою common rail та їй подібній під час електронного впорскування). Використання присадки Fuelcare можливо для палива з будь яким вмістом сірки. Саме через ці обставини вона використовувалась в паливної системі суднового двигуна 6S60ME фірми MAN-Diesel & Turbo [2]. Рекомендоване фірмою Unitor дозування присадки Fuelcare надано в таблиці 1.

Таблиця 1. Дозування присадки Fuelcare залежно від вмісту сірки в паливі

Вміст сірки в паливі, %	≤0,05	0,05…0,1	0,1…0,3	0,3…0,5	≥0,5
Дозування	1:6000	1:3000…1:1500	1:1500…1:500	1:500…1:500	1:500

Рівень дозування присадок варіюється в широких межах і залежить від призначення присадки і характеристик паливної системи, в якій вона використовується. Присадки, які вводяться в паливні цистерни або окремі ділянки паливних магістралей для біологічного впливу на паливо або для зниження гідравлічних втрат, дозуються в співвідношенні 1:8000...1:12500. Присадки, що забезпечують поліпшення процесу згоряння палива, вводяться в нього в пропорції 1:1000...1:8000. І в тому, і в іншому випадку дозування може змінюватися в залежності від конструкції двигуна, експлуатаційного стану паливної системи, рівня забруднення палива в цистернах, елементарного складу палива (в залежності від вмісту домішок ванадію, натрію і сірки) [4].

Оптимальна концентрація присадки Fuelcare фірми Unitor визначалась співвідношенням 1:2500, що відповідала вмісту сірки в паливі 0,48 % та була визначена в результаті попередніх досліджень. Під час використання цієї присадки в паливної системі дизеля 6S60ME фірми MAN-Diesel & Turbo та його індицюванні була отримана індикаторна діаграма, що наведена на рис. 1.

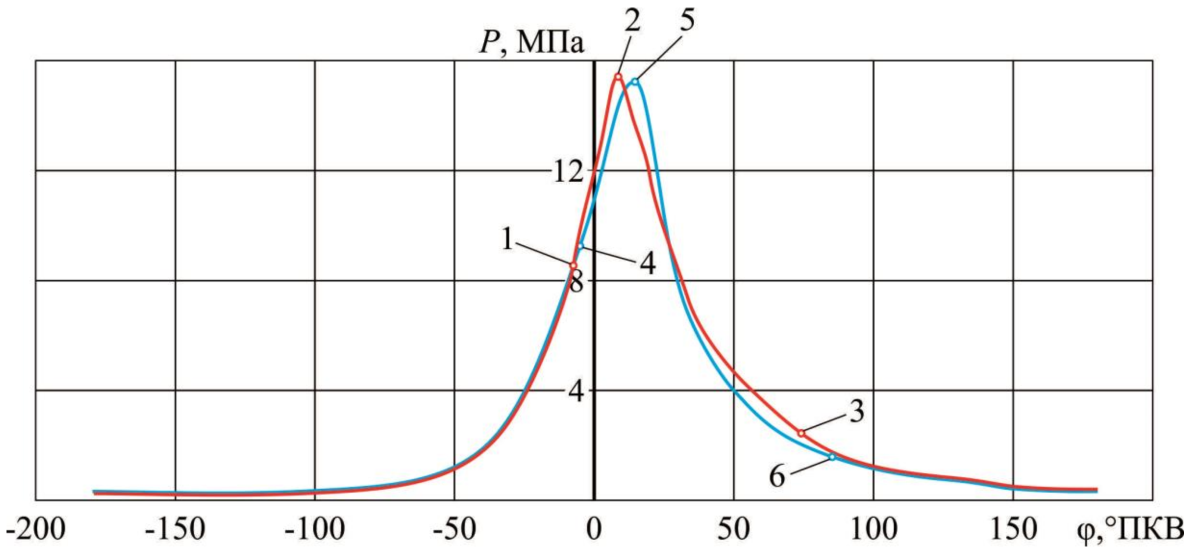


Рис. 1. Результати індицювання суднового дизеля 6S60ME фірми MAN-Diesel & Turbo:
—— – без використання присадки Fuelcare фірми Unitor;
—— – під час використання присадки Fuelcare фірми Unitor

Наведені дані свідчать про покращення процесу згоряння палива, зокрема зниженню період затримки запалювання (яке у разі використання присадки Fuelcare здійснюється у точки *1*, порівняно з точкою *4*, коли дизель працює на паливі без присадки), зміщенню згоряння в бік ізохорного процесу (крива *1–2* на індикаторній діаграмі при використання присадки Fuelcare, та крива *4–5* на індикаторній діаграмі без використання присадки), та скороченню періоду догоряння палива на лінії розширення (крива *2–3* на індикаторній діаграмі при використання присадки Fuelcare, та крива *5–6* на індикаторній діаграмі без використання присадки). Вказане сприяє зниженню питомої витрати палива на всьому діапазоні експлуатаційних навантажень дизеля (рис. 2).

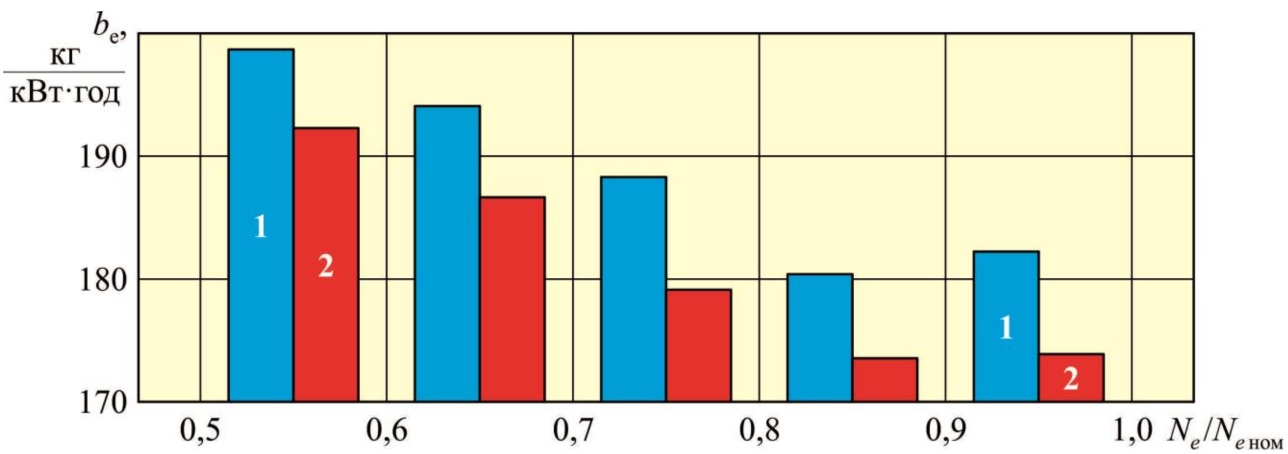


Рис. 2. Залежності питомої витрати палива SFOC дизеля дизеля 6S60ME фірми MAN-Diesel & Turbo від його відносної потужності N_e/N_{enom}:
1 – під час використання присадки Fuelcare фірми Unitor;
2 – без використання присадки Fuelcare фірми Unitor

Також під час експериментальних випробувань визначався вплив присадки до палива на екологічні показники роботи суднового дизеля, а саме вміст NO_X в випускних газах. Вимірювання цього параметру здійснювалось за допомогою переносного газоаналізатору Testo350, що встановлювався на відстані більш ніж 10 м від вихідного перетину газотурбонагнетача, що відповідало вимогам Технічного кодексу з вимірювання оксидів азоту в суднових дизелях. Результати цих досліджень наведені на рис. 3 та свідчать про поліпшення екологічних параметрів роботи дизеля, при цьому найбільше зниження рівня шкідливих викидів спостерігається в діапазоні навантажень 65...85 % – найбільш характерних для експлуатації ДВЗ морських суден [5].

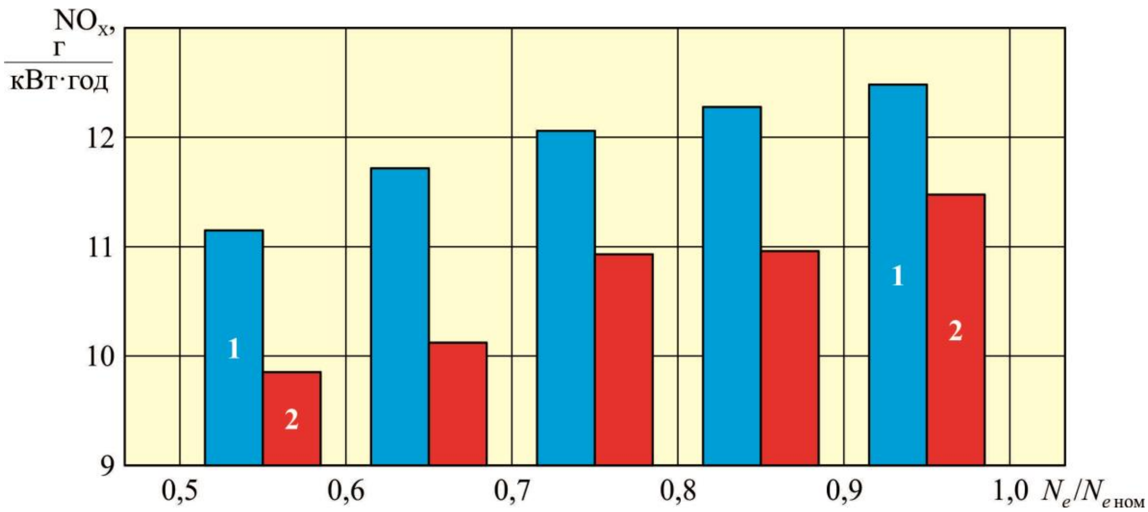


Рис. 3. Зміна концентрації NO_X в випускних газах суднового дизеля дизеля 6S60ME фірми MAN-Diesel & Turbo від його відносної потужності N_e/N_{enom}:
1 – робота на паливі без присадки;
2 – робота на паливі з концентрацією присадки 1:4000…1:6000

Висновки і перспективи подальших досліджень. Дослідження, що були виконані, та результаті, що отримані, дозволяють зробити наступні висновки.

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

2. Використання присадок до палива призводить до підвищення паливної економічності суднового дизеля – зниженню питомої витрати палива від 3,5 до 5,8 %. При цьому максимальне підвищення паливної економічності відбувається в діапазоні 50...60 % навантаження дизеля, тобто режимів, що характеризуються найбільшим експлуатаційним періодом роботи, а також підвищеною тепловою напруженістю.

3. У разі додавання присадок до палива суттєво поліпшуються екологічні показники роботи дизеля. При цьому досягається зниження на 1,4...4,3% концентрації NO_X в випускних газах. Наведені факти особливо важливі в

розрізі виконання вимог AnnexIV MARPOL73/78 та найбільш актуальні для дизелів, що тривалий час працюють у прибережних акваторіях і акваторіях морських портів.

4. Концентрація присадки має оптимальне значення, визначається експериментально та залежить від характеристик дизеля і палива, яке використовується під час його експлуатації.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
3. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.
4. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
5. Zabloysky Yu.V. Sagin S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.
6. 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.
7. 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.

УДК 629.5

Турбін В.О., Міюсов М.В.
Національний університет "Одеська морська академія"

Використання скруберних систем очищення випускних газів суднових дизелів

Постановка проблеми в загальному вигляді. Питання охорони навколишнього середовища від забруднювальних речовин є актуальними для всієї енергетики, включно з судновою. Щорічні викиди шкідливих речовин із вихлопними газами суднових дизелів сягають мільйонів тонн. Основним міжнародним документом, що визначає екологічні параметри роботи суднових енергетичних установок, є Конвенція MARPOL [1].

Додаток VI до Конвенції MARPOL «Правила запобігання забруднення повітря з суден» містить норми, що регламентують зменшення викидів оксидів сірки SO_X та встановлюють граничні значення вмісту сірки в морських паливах під час експлуатації суден морського та річкового транспорту. Крім того, у Додатку VI визначені спеціальні зони контролю викидів оксидів сірки (Sulphur Emission Control Areas – SECAs), де встановлені значно жорсткіші обмеження щодо вмісту сірки в паливі та викидів SO_X, за винятком випадків, коли судно обладнане затвердженою системою очищення вихлопних газів для зниження загальних викидів SO_X до встановлених норм. Відповідно до цих вимог, якщо судновий дизель не має спеціальної системи очищення вихлопних газів від сполук сірки, вміст сірки в паливі не повинен перевищувати 0,5 % за масою при роботі дизелів у звичайних районах світового океану та має бути меншим за 0,1 % за масою при експлуатації в зонах SECAs.

Для країн Європейського Союзу (ЄС) обов'язковим є виконання Директиви Європейського парламенту 2005/33/ЄС, якою встановлені такі обмеження:

- максимальний вміст сірки в морських паливах, що використовуються суднами на рейдах у порти або з портів ЄС, перебуваючи у територіальних водах ЄС поза зоною SECA, не повинен перевищувати 0,5 %.
- максимальний вміст сірки в MGO (морському газойлі) не повинен перевищувати 0,1 %.
- заборонено продаж MGO з вмістом сірки понад 0,1 % на території країн-членів ЄС та їх територіальних водах.
- вміст сірки у всіх морських паливах, що використовуються судами біля причалів портів ЄС, на якірних стоянках та суднами внутрішнього плавання, не повинен перевищувати 0,1 %. Це стосується будь-якого палива, що використовується в основних, допоміжних двигунах і котлах, при цьому екіпажу має надаватися достатньо часу для максимально швидкого завершення необхідної процедури переключення палива після постановки судна до причалу або на якірну стоянку та перед його відходом.

Під суднами біля причалу розуміються судна, надійно пришвартовані або що стоять на якорі в порту ЄС під час проведення вантажних операцій або простою біля причалу.

Вимога ЄС щодо використання суднових палив з вмістом сірки 0,1 % за масою не поширюється на судна у таких випадках:

- якщо на судні застосовуються схвалені технології для зменшення викидів забруднюючих речовин у атмосферу.
- якщо судно замість суднових генераторів використовує електроживлення від берегових джерел.
- коли судно перебуває біля причалу або на якірній стоянці менше двох годин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до вимог MARPOL, судновий дизель повинен забезпечувати такі викиди з вихлопними газами, щоб співвідношення об'ємних концентрацій оксидів сірки SO_X (у млн$^{-1}$) та оксиду вуглецю CO_2 (у % за об'ємом) відповідало значенням, наведеним у таблиці 1.

Таблиця 1. Відповідність вмісту сірки в паливі відношенню SO_X/CO_2

Вміст сірки в паливі (% за масою)	Відношення викидів об’ємних концентрацій оксидів сірки SO_X (в млн$^{-1}$) та оксидів вуглецю CO_2 (в % за об’ємом)
3,5	151,7
1,5	65,0
1,0	43,3
0,5	21,7
0,1	4,3

На сьогодні існують два основні шляхи виконання вимог Конвенції MARPOL. Перший полягає у повному переході двигуна на малосірчисте дизельне паливо. Перевагою цього методу є зниження енерговитрат на бункерування та підготовку палива (підігрів та сепарацію). Недоліком є значне зростання вартості палива. Другий шлях – це ефективне очищення вихлопних газів від SO_X. Його перевага полягає в тому, що при використанні традиційного високосірчистого палива можна досягти рівня викидів, що відповідає вимогам MARPOL (таблиця 1). Недолік – підвищення гідравлічного опору вихлопного тракту через встановлення очисного обладнання [2].

Для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) морських та річкових суден загальний опір вихлопного трубопроводу не повинен перевищувати 4 кПа, включаючи опори утилізаційного котла (1,2 кПа), глушника шуму (0,1 кПа) та іскрогасника (0,1...0,4 кПа). Отже, максимально допустимий опір газоочисника не повинен бути більшим за 1,3 кПа.

За цим критерієм дуже перспективними є газоочисники, що працюють за «мокрим» інерційним методом – суднові скрубери, опір яких становить 0,7...1,2 кПа.

Принцип дії «мокрих» методів очищення газів ґрунтується на розчиненні та хімічній взаємодії токсичних компонентів вихлопних газів ДВЗ при пропусканні їх через воду. Перевагою цього способу є те, що такі очищувачі надійно працюють на змінних режимах, мають низьке енергоспоживання та пожежобезпечні. Після очищення воду, використану для обробки, можна скидати за борт. Крім того, очисник додатково виконує функції глушника шуму, «мокрого» іскрогасника та охолоджувача газів [3].

Постановка завдання. Метою дослідження було визначення технологічної схеми, яка забезпечує виконання вимог MARPOL щодо викидів оксидів сірки SO_X з вихлопними газами суднових дизелів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним із найпоширеніших способів зниження викидів SO_X у вихлопних газах суднових дизелів є використання скруберної системи очищення. Для зменшення викидів SO_X може застосовуватися система очищення вихлопних газів дизеля шляхом їх промивання прісною водою з додаванням каустичної соди NaOH. Схема такої системи представлена на рис. 1.

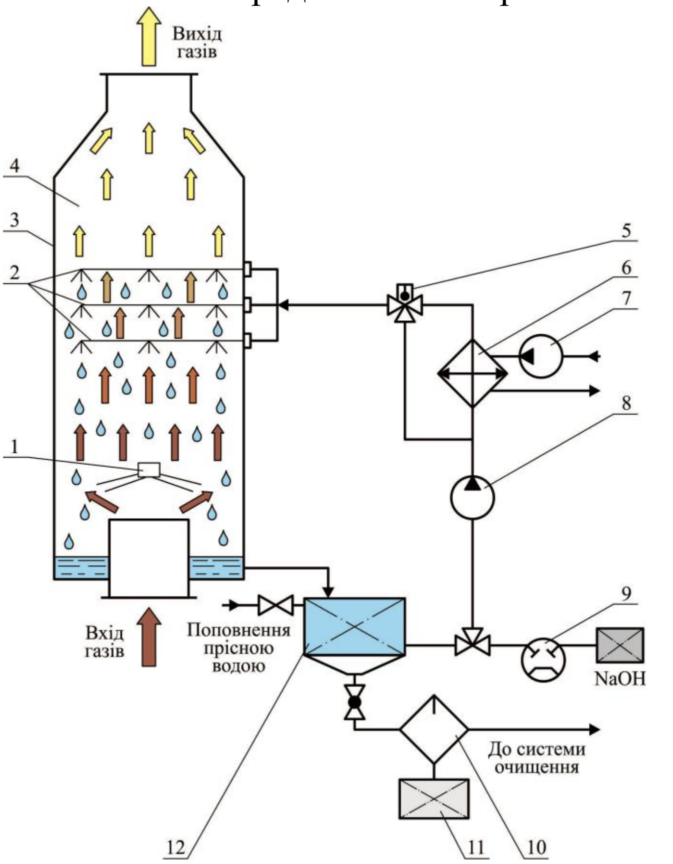


Рис. 1. Система очищення випускних газів дизеля:
1 – розподільник рівномірного потоку газів; 2 – форсунки;
3 – корпус скрубера; 4 – секція відділення крапель;
5 – терморегулюючий клапан;
6 – охолоджувач; 7 – насос забортної води; 8 – циркуляційний насос прісної води; 9 – насос-дозатор; 10 – сепаратор;
11 – шламова цистерна;
12 – циркуляційна цистерна

До складу системи входить газоочисник, встановлений на вихлопному трубопроводі після утилізаційного котла, та допоміжне обладнання для його обслуговування.

У середній частині очисника розміщені три яруси зрошення прісною водою, яка розпилюється всередині корпусу 3 за допомогою форсунок 2. Вода надходить до очисника з циркуляційної цистерни 12 за допомогою насоса 8 через охолоджувач 6. Температура води контролюється терморегулюючим клапаном 5. Каустична сода NaOH для нейтралізації SO_X подається в систему насосом-дозатором 9.

Гази з вихлопного трубопроводу надходять у нижню частину газоочисника, рівномірно розподіляються за допомогою розпилювача 1 та піднімаються вгору по корпусу 3.

Краплі водяного розчину, що утворюються, падають під дією сили тяжіння назустріч забрудненим газам, змочують тверді домішки, тим самим відокремлюючи їх від газів. В результаті контакту NaOH з SO_X відбувається хімічна реакція, продуктом якої є сульфат натрію Na_2SO_4. Очищені гази відокремлюються від крапель води в секції 4 та відводяться через газохід, розміщений у верхній частині очисника. Відпрацьована вода самопливом повертається до циркуляційної цистерни.

Поповнення цистерни прісною водою необхідно в об'ємі, що компенсує випаровану та винесену вологу. Шлам, що збирається в конічній частині цистерни 12, періодично відокремлюється від води в сепараторі 10, накопичується в шламовій цистерні та передається на утилізацію на берегові станції або судна-збирачі. Вода з сепаратора 10 направляється до суднової системи очищення стічних вод. Нейтралізація та очищення газів відбуваються безперервно під час роботи дизеля [4].

Залежність витрати концентрату NaOH від потужності головного двигуна показана на рис. 2.

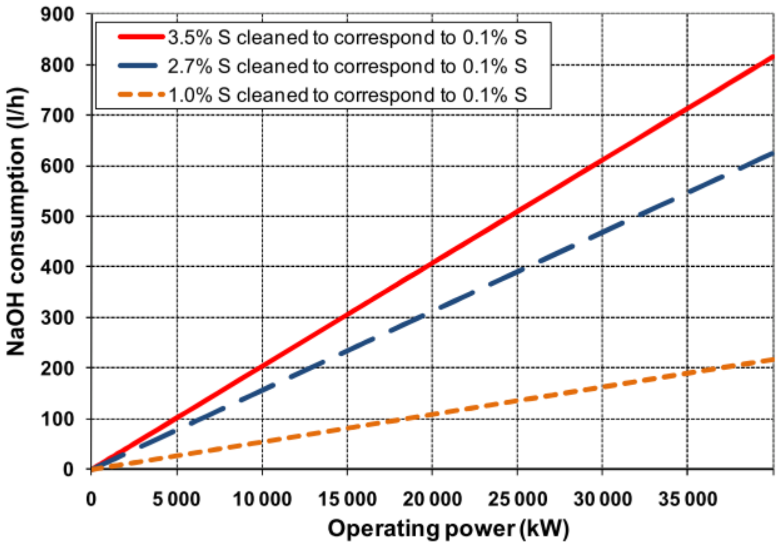


Рис. 2. Залежність витрат NaOH від потужності головного двигуна та вмісту сірки в паливі

Висновки і перспективи подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження можна зробити наступні висновки.

Прагнення до захисту навколишнього середовища від забруднень, у тому числі від суднових енергетичних установок, встановлює суворі вимоги щодо забезпечення екологічної безпеки під час експлуатації суднових дизелів. До стандартних обмежень щодо захисту довкілля від забруднення нафтою, нафтовими водами, сміттям та побутовими відходами додаються вимоги щодо запобігання забрудненню повітря, зокрема викидами оксидів сірки SO_X.

Окрім заборон на використання палива з вмістом сірки від 0,1 % (для зон SECA) до 0,5 % (для відкритого океану), існують суворі вимоги до вмісту SO_X у вихлопних газах суднових дизелів. Зниження викидів SO_X досягається або шляхом зменшення вмісту сірки в паливі, або шляхом застосування технологій видалення оксидів сірки з вихлопних газів у спеціальних пристроях – скруберах.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. (2022). Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters. *Naše more : International Journal of Maritime Science & Technology, 69(1),* 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

2. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. (2022). Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *Journal of Maritime Science and Engineering, 10(9),* 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

3. Sagin, S.V., Sagin, S.S., Madey, V. (2023). Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport. Technology Audit and Production Reserves, 4 (3 (72)), 33–42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.

4. Sagin, S.; Chymshyr, V.; Karianskyi, S.; Kuropyatnyk, O.; Madey, V.; Rusnak, D. (2025). Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases. *Energies*, *18*(17), 4756. https://doi.org/10.3390/en18174756.

УДК 629.5

Чуйкін І.С., Колегаєв М.О.
Національний університет "Одеська морська академія"

Підвищення ефективності процесу мащення циліндрової групи суднових крейцкопфних дизелів

Постановка проблеми в загальному вигляді. Суднові двигуні внутрішнього згоряння (ДВЗ) є найпоширенішими типами теплових машин, що перетворюють енергію рідкого палива в механічну роботу і передають її на рушій. Практично 100 % транспортних суден використовують суднові дизелі як головні двигуни (ГД). На всіх без винятку сучасних засобах транспорту річкового і морського флоту ДВЗ виконують функції допоміжних двигунів, забезпечуючи енергією генератори суднової електростанції. Зростаючі потреби в перевезення вантажів морськими шляхами сприяють будівництві судів підвищеного тоннажу, на яких в якості ГД встановлюють малообертові двигуни (МОД), що працюють по двохтактному циклу і передають свою корисну потужність на гвинт, крок якого фіксований. Забезпечення функціонування суднових дизелів неможливо без спеціальних систем, однієї з яких є система мащення. Для МОД до її складу входять система циркуляційного мащення (що забезпечує подачу мастила до підшипників колінчастого валу, крейцкопфа та зубчастих з'єднань) та система циліндрового мащення (мастило в якої подається виключно до дзеркала циліндрової втулки). Тому забезпечення процесу мащення циліндрової групи суднових дизелів є актуальним науково-прикладним завданням, розв'язання якого сприятиме функціонуванню та надійної роботи суднових МОД.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із способів підвищення циліндрової потужності суднових дизелів є збільшення ходу поршня *S*, яке в сучасному дизелебудуванні реалізується за рахунок збільшення відносини ходу поршня до діаметру циліндра – *S*/*D*. Значення даного відносини для дизелів 2-ий і 3-ій (Mk-2 і Mk-3) модифікацій дизелів фірми MAN-B&W становило 500/1100, 620/1400, 740/1600. Ця ж величина для сучасних моделей фірми MAN Diesel & Turbo (Mk-8 і Mk-9) лежить в межах 500/2000, 600/2400, 700/2800, а в деяких моделях (G-модифікація) 500/2500, 600 / 2790, 700/3256 [1].

Однак підвищення потужності суднових дизелів за рахунок збільшення ходу поршня пов'язане з вирішенням ряду конструкційних і технологічних проблем, однією з яких є необхідність забезпечення якості мащення циліндропоршневої групи, площа поверхні якої (в зв'язку з підвищеним ходом поршня) принципово збільшується. Наприклад, для суднового дизеля VTBF62 (D=0,62 м, S=1,4 м) площа внутрішньої поверхні циліндрової втулки складає $S_{пов}$=2,72 м^2, а для відповідного йому сучасного дизеля G60ME-C Mk9 (D=0,6 м, S=2,79 м) $S_{пов}$=5,26 м^2. При цьому кількість точок циліндрового мащення (кількість плунжерів лубрикатора, розташованих у втулці циліндра) залишається незмінним. Одночасно зі збільшенням ходу поршня у сучасних дизелів підвищені значення всіх показників робочого циклу, зокрема тиску наддувочного повітря p_s (з яким свіже повітря надходить в циліндр) і тиску в кінці згорання p_z, що також негативно впливає на стан тонкого масляного шару, що знаходиться на дзеркалі циліндрової втулки

Зокрема суднові МОД з підвищеним відношенням ходу поршня до діаметру циліндра (довгоходові дизелі) характеризуються великим ходом розширення при тій же кількості змін напрямку руху поршня. При цьому система циліндрового мащення повинна забезпечити наявність мастильної плівки на більшій площі втулки циліндра [2, 3].

Проведений аналіз основних проблем застосування циліндрових мастил в довгоходових МОД і шляхи їх розв’язання показані в таблиці 1.

Таблиця 1.1. Використання мастил для мащення ЦПГ довгоходових крейцопфних МОД

Проблема	Шлях розв’язання	Засоби вирішення
Збільшена площа змазування	Поліпшення розтікання мастила;	Базове мастило і присадки
	поліпшення змочуваності металу	
Збільшення тиску на поршневі кільця	Збільшення міцності і товщини мастильної плівки	Базове мастило і присадки
Великий час контакту з полум'ям і газами при згорянні	Забезпечення високої термічної стабільність	Базове мастило і присадки
Тенденція до корозійного зносу	Підвищення швидкості нейтралізації кислот	присадки (нейтралізатори)
Тенденція до зростання вуглецевих відкладень	Підвищення рівню миючих властивостей	присадки (детергенті)

Аналіз сучасних тенденцій розвитку МОД показує, що для забезпечення необхідної довговічності і надійності сучасних двигунів до циліндрового мастила висуваються особливі вимоги, багато в чому більш жорсткі, ніж ті, які висувалися до МОД попередніх моделей. Зокрема, вимоги до забезпечення плинності мастила і змочуваності металу набувають нового значення, якщо врахувати, що менше 1 г мастила подається в циліндр двигуна за кожен оборот колінчастого вала, при цьому площа поверхні мащення становить до 10 м^2, а хід поршня до 4,5 м. Ці властивості повинні забезпечувати рівномірність розподілу мастила по втулці циліндра. У довгоходових МОД збільшено в порівнянні зі звичайними МОД час знаходження мастильної плівки до її поновлення на поверхні втулки, в результаті чого мастило повинне витримувати більшу термічну навантаження,

Постановка завдання. Завданням дослідження були визначення найбільш сприятливого методу, за допомогою якого можливо забезпечити режим гідродинамічного мащення циліндрової групи суднових МОД.

Виклад основного матеріалу дослідження. Уявлення про режими змащування циліндрової групи можна проілюструвати з прикладу моделі, показаної на рис. 1. Гідродинамічний режим мащення спостерігається в тих місцях, де мастильний матеріал поділяє поверхні поршня та втулки. У парі тертя поршневе кільце – циліндрова втулка переважним режимом тертя та мащення є граничний. Це пов'язано з тепловим розширенням кільця (завдяки наявності «кільцевого» замку), а також з виконанням кільцем компресійної дії, коли на верхню та внутрішню частину кільця діють гази, а зовнішня поверхня кільця притискається до поверхні циліндрової втулки. При цьому зазори в парах тертя поршень – втулка $\Delta_п$ та кільце – втулка $\Delta_к$ мають різне значення та відповідають різним режимам мащення.

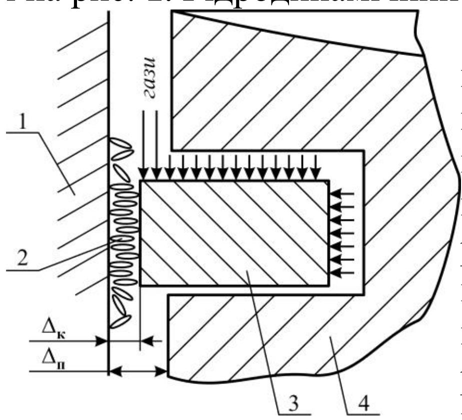


Рис. 1. Модель системи циліндрова втулка – мастильний матеріал – поршневе кільце:
1 – втулка циліндра; 2 – мастило; 3 – кільце; 4 – поршень

Основним компонентом системи, показаної на рис. 1, на який можна накладати керуючий вплив, є мастильний матеріал. Його властивості та характеристики визначаються не лише його власною структурою, а й залежать від впливу металевих поверхонь, які він поділяє. Відмінною характеристикою мастильного матеріалу, що входить у цю систему, є його здатність утворювати структурно впорядковані граничні мастильні шари, що призводить до виникнення додаткового розклинюючого тиску. При цьому забезпечується перехід від граничного режиму мащення до гідродинамічного або робота системи в граничному режимі мащення без фрикційних контактів між поверхнями [3].

Дослідження виконувались на судновому дизелі 6S60ME-C9. Для мащення циліндрової групи дизеля використовувалися моторні мастила Texaco Special HT 40 та Castrol CL 40.

Принципова схема системи цилінрового мащення дизеля наведена на рис. 2.

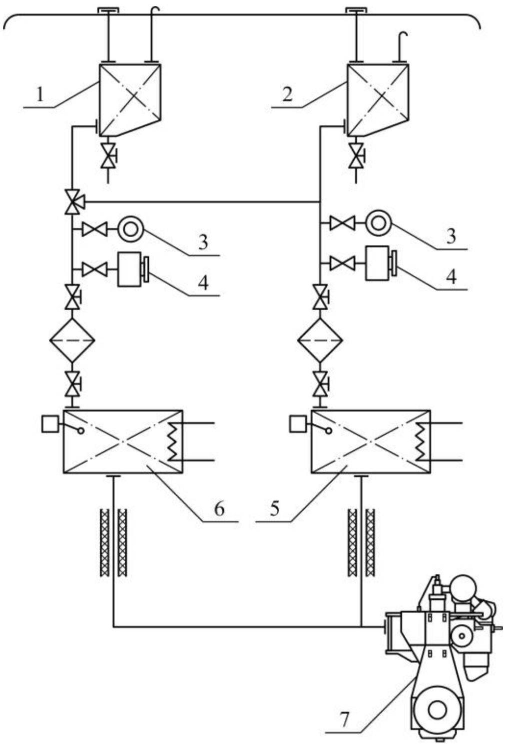


Рис. 2. Схема мащення суднового МОД:
1, 2 – танк лубрикаторного мастила;
3 – витратомір; 4 – контролер;
5, 6 – витратна цистерна; 7 – дизель

Наявність двох цистерн моторного мастила (позиції 1 і 2) давало можливість використання різних мастил для різних груп циліндрів. Експерименти виконувались під час океанського переходу судна тривалістю 11...12 днів тільки на усталених режимах роботи дизеля. Постійність навантаження на дизель визначалося незмінною частотою обертання колінчастого валу та постійною цикловою подачею палива. Протягом усього експерименту судновий дизель 6S60ME-C9 MAN-Diesel&Turbo працював на одному сорті палива RMC350 (з вмістом сірки 0,37 %). Подача мастила Castrol CL 40 здійснювалася в циліндри 1-3, а мастила Texaco Special HT 40 – в циліндри 4-6. Попередніми дослідженнями з визначення структурних характеристик моторних мастил було встановлено, що товщина впорядкованого (граничного) мастильного шару для мастила Texaco Special HT 40 складає 13,6 мкм, для мастила Castrol CL 40 – 15,4 мкм.

Непряму оцінку режимів тертя та мащення, що перебігають у трибологічної системи втулка циліндра – мастильний шар – поршневе кільце, можна виконати за аналізом відпрацьованого мастила, що надходить у підпоршовий простір дизеля. Циліндрова група дизелів відноситься до об'єктів постійного контролю технічного стану. Виконання візуальних інспекцій циліндрових втулок не завжди є можливим. Насамперед, це пов'язано з періодом безперервної роботи головних двигунів морських суден (наприклад, тривалість океанських переходів може досягати 20 ... 30 діб), і також з великими витратами на їх виконання. Тому для діагностування технічного стану циліндрових втулок застосовуються непрямі методи. Найпоширенішим і доступним для умов морського судна є визначення залишкового лужного числа (base number – BN) і кількості металевих домішок в мастилі. Відбір проб мастила та їх подальший аналіз виконувався в судновій технічній лабораторії фірми Cylinder Scrape-Down Oil Analysis через кожні 20 годин роботи дизеля відповідно до рекомендованих технологій та послідовності. При цьому для кожного циліндра дизеля встановлювалося своє значення подачі циліндрового мастила. Відхилення її величини за циліндрами не перевищувало 5 % від середнього значення. З підпоршневого простору кожного циліндра виконувався відбір проб відпрацьованого мастила з наступним визначенням в судновій технічній лабораторії вмісту в мастилі наступних компонентів: PQI (Particle Quantity Index), Fe (Iron), V (Vanadium), Ni (Nickel), Si (Silicon) та BN. Результати досліджень узагальнено на рис. 3.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки.

Тонкі шари моторних масел (які поділяють поверхні тертя та забезпечують гідродинамічний або граничний режим мащення трибологічних систем суднових дизелів) характеризуються впорядкованою структурою молекул.

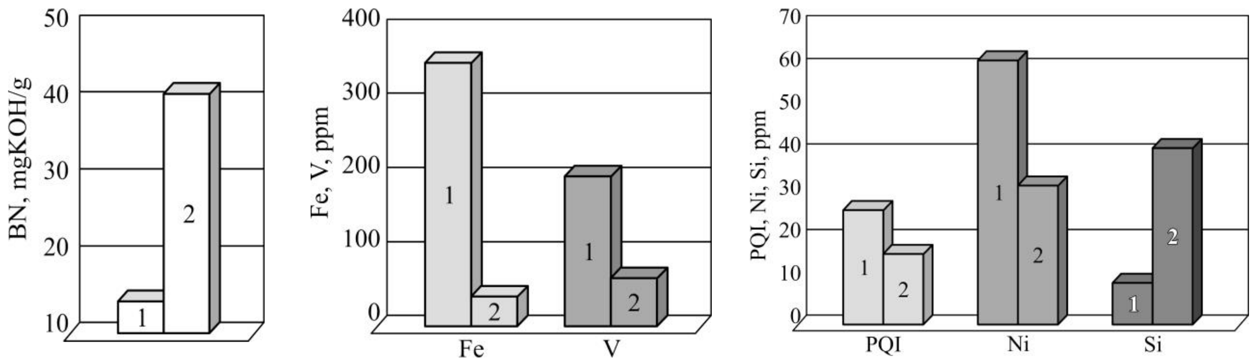


Рис. 3. Значення BN (base number), Fe (Iron), V (Vanadium), PQI (Particle Quantity Index), Ni (Nickel), Si (Silicon) в пробах відпрацьованого мастила суднового дизеля 6S60ME-C9:
1 – під час використання моторного мастила Texaco Special HT 40;
2 – під час використання моторного мастила Castrol CL 40

Оцінку зносу деталей циліндрової групи доцільно виконувати за кількістю механічних домішок, які надходять у моторне мастило, і залишковим лужним числом моторного мастила. За допомогою експериментальних досліджень, виконаних на судновому дизелі 6S60ME-C9, було встановлено, що моторні мастила, структура граничних шарів, які характеризуються більшою товщиною граничного шару, забезпечують менший знос деталей дизеля. Для моторного мастила Castrol CL 40 (з товщиною граничного шару 15,4 мкм) забезпечується 7,5 … 8,3 кратне зниження домішок заліза, 3,5 … 3,8 кратне зниження домішок ванадію, 1,6 … 1,8 кратне зниження домішок нікелю в порівнянні з моторним мастилом Texaco Special HT 40 (з товщиною граничного шару 13,6 мкм).

Таким чином, гідродинамічний режим змащування в трибологічних системах суднових дизелів (зокрема циліндрової групи) можливо забезпечити за рахунок керованого впливу на граничний шар моторного мастила, який розділяє поверхні, що контактують.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАННОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

2. Sagin, S.; Madey, V.; Sagin, A.; Stoliaryk, T.; Fomin, O.; Kuˇcera, P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal of Maritime Science & Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373

3. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 108 - 119.

УДК 629.5

Ушаков О.І., Заблоцький Ю.В.
Національний університет "Одеська морська академія"

Підвищення екологічності роботи морських суден

Постановка проблеми в загальному вигляді. Функціонування суден морського та внутрішнього водного транспорту нерозривно пов'язано з транспортуванням вантажу та забезпеченням відпочинку пасажирів. Основним джерелом енергії, яка необхідна для при цьому необхідна, є двигуні внутрішнього згоряння (ДВЗ). До складу суднових енергетичних установок входять ДВЗ різного типу та призначення, але на будь якому судні морського або внутрішнього водного транспорту встановлюються дизелі, що працюють за чотиритактним циклом. В деяких випадках вони виконують функції головних двигунів та забезпечують рух судна, в більшості чотиритактні дизелі використовуються як допоміжні, входять до складу суднової електростанція,а є приводами генераторів змінного струму, тому встановлюються на всіх без винятку суднах [1].

Як будь-якої тепловий двигун чотиритактні дизелі під час здійснення кругового робочого циклу викидають в атмосферу значну кількість випускних газів, які містять в своєму складі екологічно небезпечні компоненти, насамперед оксиди азоту NOX та сірки SOX. На сьогоднішній момент існуючі зони контролю викидів NOX із суден (Emission Control Area – ECA) та зони контролю викидів SOx (Sulphur Emission Control Area – SECA) закріплені у Додатку VI до конвенції МАРПОЛ [2, 3]. Розширення зон екологічного моніторингу морського транспорту та вжиття заходів щодо зниження антропогенного впливу на довкілля з боку морських суден та їх енергетичних установок вимагають від судновласників виробити стратегію з даного питання для відповідності суднових дизелів як діючим, так і перспективним нормам міжнародних конвенцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зниження емісії оксидів азоту, що потрапляють з випускними газами суднових чотиритактних дизелів, можливо за допомогою різних способів, одним з яких є їх перепуск (Exhaust Gas Wastegate – EGW) [4].

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

Для двоступеневих систем наддуву (рис. 1, б) перепуск частини потоку газів, який із циліндрів дизеля рухається у бік ГТН високого 2 та низького 7 тиску, може здійснюватися або до ГТН високого тиску 2 (за допомогою клапана перепуску 1), або за ГТН 2 (за допомогою клапана 9). За допомогою охолоджувача 8 знижується температура повітря після компресора ГТН низького тиску 7. Інші елементи установки забезпечують функції, аналогічні одноступеневій системі наддуву. Під час перепуску потоку газів здійснюється його дроселювання до тиску меншого за тиск газів за ГТН. Це попереджує явище закиду газів та гальмування потоку газів, який виходить з газової турбіни.

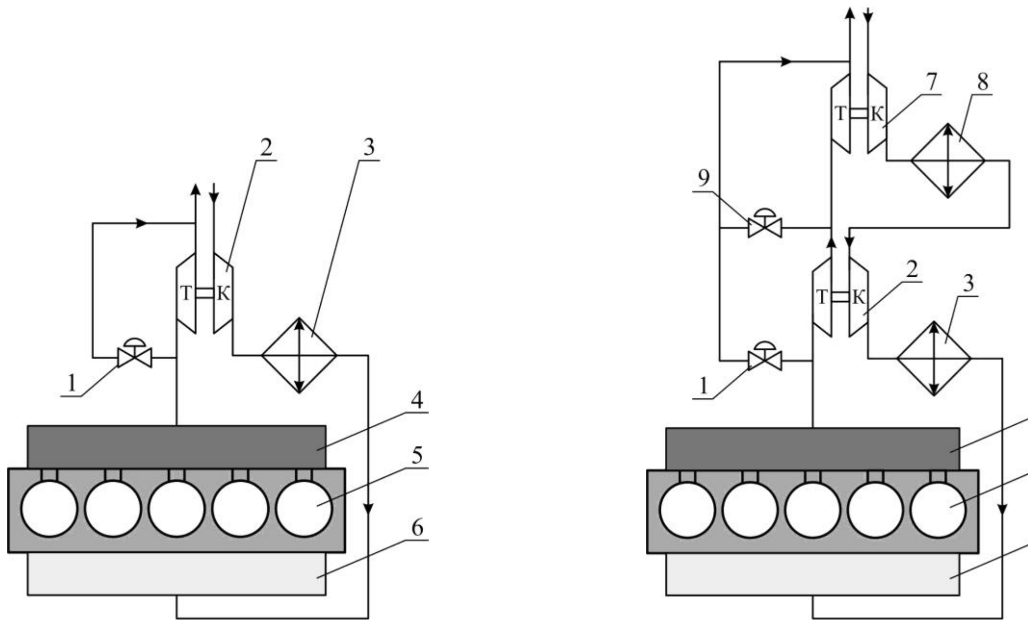


Рис. 1. Технологічні схема перепуску газів минаючи газову турбіну ГТН: 1, 9 – клапан EWG; 2, 7 – ГТН; 3, 8 – охолоджувач повітря наддуву; 4 – випускний колектор, 5 – циліндри дизеля; 6 – ресивер повітря наддуву; *а* – одноступеневий наддув; *б* – двоступеневий наддув

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення оптимальних режимів експлуатації системи перепуску випускних газів – як одного із способів забезпечення екологічності роботи чотиритактних дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на судновому чотиритактному дизелі 6L26 фірми Wartsila з основними характеристиками: кількість циліндрів – 6; діаметр циліндру – 0,26 м; хід поршню – 0,32 м; максимальний тиск згоряння – 16,7 МПа; частота обертання – 1000 об/хв; номінальна потужність $N_{eном}$=2040 кВт; питома ефективна витрата палива – 0,189 кг/(кВт·год); система газотурбінного наддува – імпульсна; система керування подачею палива, випуском газів та постачанням повітря – електронна.

Принципова схема системи EWG суднового дизеля 6L26 фірми Wartsila показана на рис. 2.

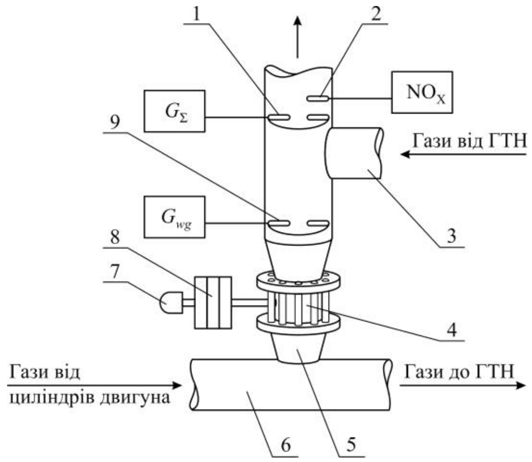


Рис. 2. Принципова схема суднового чотиритактного дизеля 6L26 Wartsila з системою управління випускними газами EWG:
1, 9 – точки контролю основної і перепускної витрати газів; 2 – точка контролю концентрації NO_X; 3, 6 – випускні магістралі основного потоку газів; 4 – перепускний клапан (wastegate); 5 – випускні магістралі перепускного потоку газів; 7 – контролер положення перепускного клапана; 8 – пневматичний привід перепускного клапана

Під час проведення дослідження контролювалися і вимірювалися параметри, що дозволяють визначити емісію NOX, питому ефективну витрату палива be, а також ефективну потужність дизеля Ne. Ступінь перепуску випускних газів δEWG і змінювався в межах 0...10 %. Значення витратив загальної кількості газів та GΣ кількості газів, що спрямовувалась на перепуск Gwg вимірювалися за допомогою витратоміра в точках 1 і 9 (рис. 2) відповідно. Концентрація NOX у випускних газах визначалася в точці 2 (рис. 2) за допомогою газоаналізатора. Крім того, виконувався контроль температури випускних газів tг (як по окремих циліндрах, так і її неузгодженість від середнього значення за всіма циліндрами) [5].

Результати експерименту наведені на рис. 3.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Система перепуску випускних газів (Exhaust gas wastegate – EWG) забезпечує покращення екологічних параметрів роботи ДВЗ (зокрема сприяє зниженню емісії NOX з випускними газами) в усьому діапазоні експлуатаційних режимів роботи дизеля.

Для суднового середньообертового дизеля 6L26 фірми Wartsila, що працює в діапазоні навантажень Nераб=(0,55...0,83)Nеном під час використання системи EWG зі ступенем перепуску випускних газів δEWG=4...10 % були отримані наступні результати:

1) підвищення ступеня перепуску випускних газів в діапазоні 0...10 % сприяє зниженню емісії оксидів азоту з 8,72 г/(кВт·год) до 6,53 г/(кВт·год) і залежить від навантаження на дизель; при цьому відносне зниження викидів NOX знаходиться в межах 1,15...13,85%;

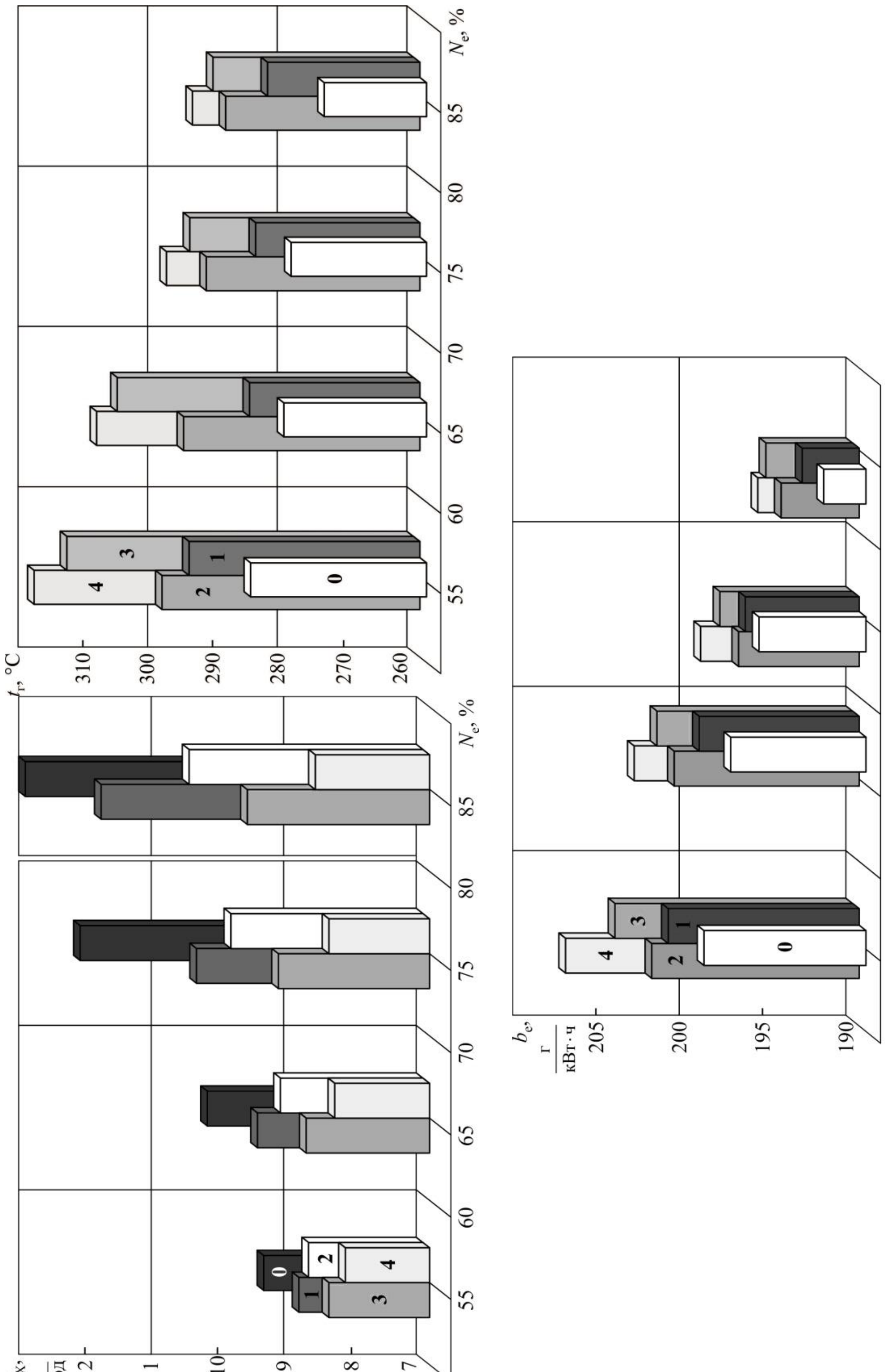


Рис. 3. Зміна емісії NOX, г/(кВт·год), температури випускних газів tr, °C, та питомої витрати палива, be, г/(кВт·год) для різних навантажень Ne, %, суднового дизеля 6L26 Wartsila та різного ступеня перепуску газів δEWG: 0 – відсутність перепуску; 1 – 4 %; 2 – 6 %; 3 – 8 %; 4 – 10 %

2) найбільший рівень зниження концентрації NO_X у випускних газах відповідає максимальному ступеню перепуску газів і режиму максимального навантаження на дизель (у проведених експериментах 9,6% і 0,83$N_{еном}$ відповідно);

3) для режимів роботи дизеля, близьких до номінального (у проведених дослідженнях 74...83 % номінальної потужності дизеля), під час використання перепуску випускних газів збільшення питомої ефективної витрати палива складає 0,8...1,9 г/(кВт·год) або у відносних значеннях 0,26...1,05 %; при цьому, з огляду на максимальне зниження емісії NO_X на даних режимах експлуатації, саме поліпшення екологічних показників роботи дизеля є переважаючим фактором для даного діапазону навантажень, тому використання системи EWG у цьому випадку доцільне і може бути рекомендовано як спосіб забезпечення екологічних вимог до суднових дизелів;

4) на навантаженнях (0,55...0,67)$N_{еном}$ збільшення витрати палива під час використання системи EWG може досягати 1,83...2,52 %; враховуючи, що в даній варіації навантажень використання EWG забезпечує зниження емісії NO_X на 1,15...5,5 %, застосування системи перепуску газів для цього діапазону не є доцільним.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Куропятник О.А. Оцінка екологічності морських суден під час використання комплексних систем управління випускними газами суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 51. – С. 22-44. DOI: 10.31653/smf 51.2025.22-44.

2. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more. – 2019. – Vol. 66. – № 1. – P. 1 - 9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.

3. Сагін С.В., Куропятник О.А. Використання системи рециркуляції випускних газів низького тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів // Розвиток транспорту. – 2025. – № 3. – С. 87-99. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.06.

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

5. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

УДК 629.5

Вишталюк М.О.
Національний університет "Одеська морська академія"

Забезпечення процесу мащення підшипникових вузлів суднових дизелів

Постановка проблеми в загальному вигляді. Ефективне використання сучасного форсованого суднового двигуна внутрішнього згоряння (СДВЗ) значною мірою залежить від технічного стану та надійності роботи його деталей. Збільшення інтенсивності експлуатації СДВЗ призвело до значного підвищення вимог щодо їх надійності [1, 2]. Аналіз експлуатації СДВЗ показує, що терміни проведення поточних та середніх ремонтів визначаються технічним станом деталей кривошипно-шатунного механізму, серед яких найбільш відповідальні та швидко зношуються – підшипники ковзання колінчастого валу. Саме тому підвищення експлуатаційної надійності СДВЗ багато в чому визначається безвідмовною роботою та технічним станом підшипників ковзання колінчастого валу.

У процесі роботи підшипників ковзання СДВЗ має місце знос робочих поверхонь, який обумовлений тим, що під час експлуатації неминуче виникають режими граничного мащення. Граничний режим мащення характеризується наявністю безпосереднього контакту поверхонь в зоні тертя, що сприяє збільшенню адгезійних зв'язків. Таким чином, взаємодія поверхонь супроводжується підвищеним тепловиділенням (внаслідок високотемпературних спалахів у дискретних контактах), деформаціями та втратою загальної маси, що переходять у зовнішнє середовище. Зношування, як результат контактної взаємодії деталей, призводить до незворотної зміни їх геометричних параметрів і втрати працездатності [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час існують два основні наукові напрями, метою яких є вирішення проблем адаптації роботи підшипників у складі СДВЗ, що забезпечують мінімальні втрати на тертя та мінімізацію величини зношування. Одне займається вдосконаленням антифрикційних матеріалів, у тому числі виготовляються підшипники, а друге спрямовано на поліпшення властивостей мастильних матеріалів [4]. На наш погляд, найбільш перспективним напрямом підвищення надійності підшипників ковзання у складі СДВЗ, з урахуванням мінімізації витрат, є покращення триботехнічних властивостей мастильних матеріалів [5]. З цією метою розроблені функціональні присадки в моторне мастило, основним принципом роботи яких є самоорганізація наноструктурних плівок пластичного металу на поверхнях тертя, що реалізують ефект беззносності. Присадки містять у своєму складі дрібнодисперсну фазу нанопорошків міді та алюмінію із середньою величиною частинок 50 нм у середовищі жирних кислот у певних пропорціях [6].

Постановка завдання. У зв'язку з вищевикладеним, метою дослідження було визначення впливу функціональних присадок до моторних мастил на енергетичні втрати, що виникають в підшипниках ковзання суднових дизе-лів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на суднових середньообертових дизелях 6L18/24 фірми MAN-Diesel&Turbo. Три подібних дизеля використовувались в складі допоміжної енергетичної установки судна водотоннажністю 16740 тонн. Кожний з дизелів мав окрему систему мащення, що дозволяло для кожного з дизелів використовувати мастильні матеріали з різними характеристиками [7]. Принципова схема система циркуляційного мащення дизелів надана на рис. 1.

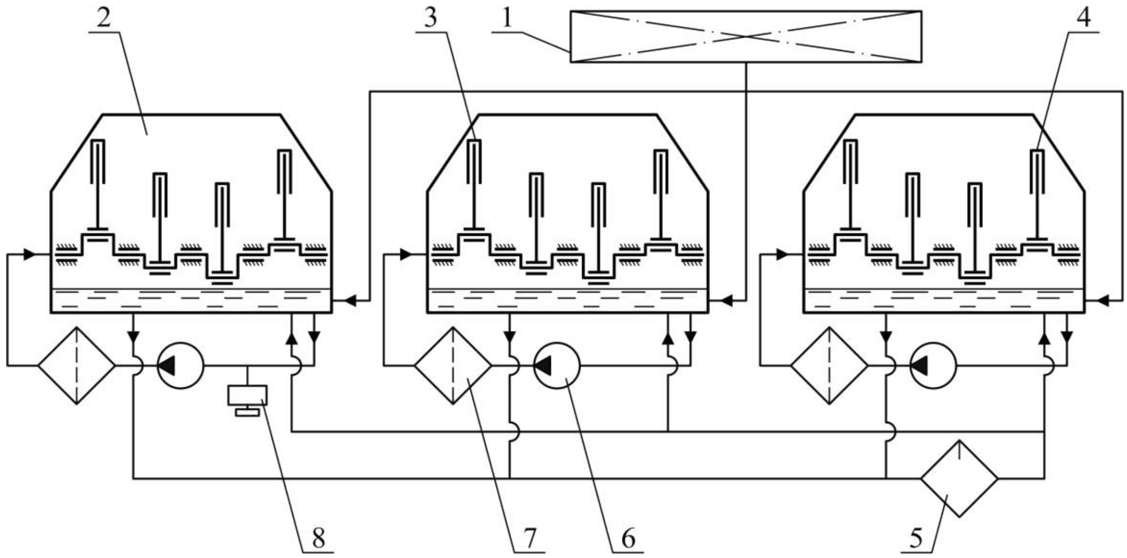


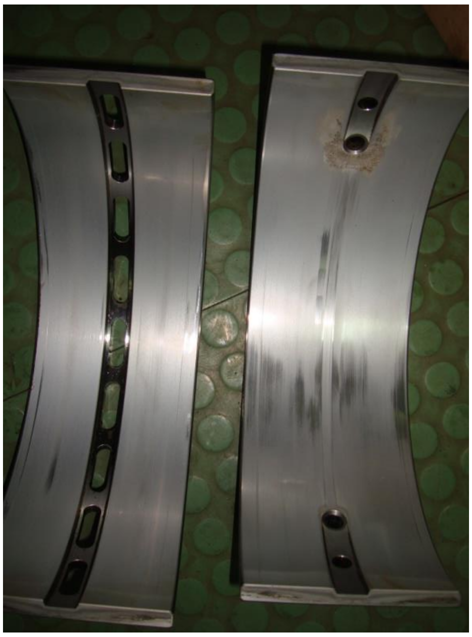
Рис. 1. Схема суднової системи циркуляційного мащення під час проведення експериментальних досліджень:
1 – цистерна циркуляційного мастила; 2 – дизель № 1; 3 – дизель № 2;
4 – дизель № 3; 5 – сепаратор мастила; 6 – циркуляційний мастильний насос; 7 – мастильний фільтр; 8 – дозерний пристрій

Подача мастила до вузлів мащення колінчатого валу та підшипників дизелів 2, 3, 4 забезпечувалась циркуляційним насосом 6 (окремо для кожного з дизелів). Очищення мастила виконувалось за допомогою фільтра 7 (також окремо для кожного дизелю) та сепаратора 5 (який послідовно підключався до систем мащення кожного з дизелів). Поповнення обсягу мастила в картері дизелів здійснювалось з цистерни 1.

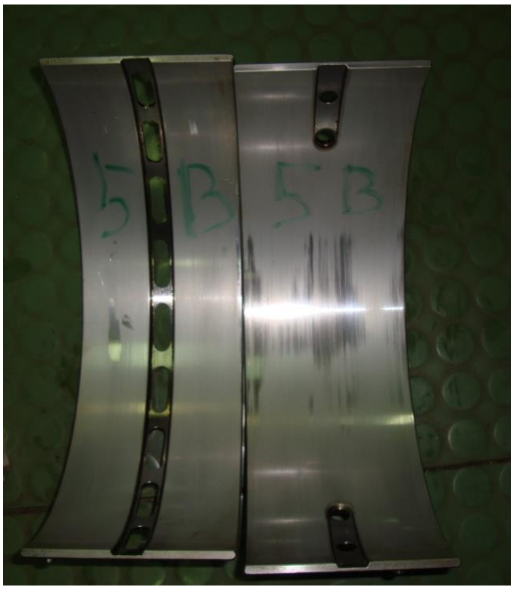
Дослідження виконувались на двох дизелях, що на початок випробувань мали однаковий ресурс (позиції 2, 3 на рис. 1). Під час випробувань дизелі експлуатувались на рівних між собою навантаженнях. У випадку, коли потужності двох дизелів (на яких проводились дослідження) було недостатньо для забезпечення суднових потреб в електричної енергії, використовувався третій дизель (позиція 4 на рис. 1). Також лише цей дизель використовувався у випадку, коли для забезпечення потрібності судна в електричної енергії вистачало потужності одного дизелю.

Як спосіб, що забезпечує підвищення структурних характеристик моторного мастила, було обрано додавання поверхнево-активних речовин (ПАР). В науково-дослідницької лабораторії було визначена оптимальна концентрація ПАР в об'ємі моторного мастила, при якої забезпечуються максимальна самоорганізація наноструктурних плівок пластичного металу на поверхнях тертя.

До системи мащення одного з дизелів (позиція 1 на рис. 1) за допомогою дозерного пристрою (позиція 8 на рис. 1) додавалась ПАР. Для визначення впливу ПАР на технічний стан вкладишів підшипників по закінченні регламентного терміну експлуатації підшипникових вузлів проводилась оцінка зносу їх несучих поверхонь. Для цієї мети визначався знос вкладишів підшипників. Стан вкладишів підшипників СДВЗ в системі мащення якого не використовувалась ПАР показано на рис. 2.



Циліндр № 1



Циліндр № 2

Циліндр № 5

Циліндр № 6

Рис. 2. Стан підшипників дизеля 6L18/24 фірми MAN-Diesel&Turbo, в системі мащення якого не використовувалась ПАР

Стан вкладишів підшипників в системі мащення якого використовувалась ПАР показано на рис. 3.

Циліндр № 1

Циліндр № 2

Циліндр № 5

Циліндр № 6

Рис. 3. Стан підшипників дизеля 6L18/24 фірми MAN-Diesel&Turbo, в системі мащення якого використовувалась ПАР

Ураховуючи нерівномірність навантаження на різні циліндри дизеля, технічний стан підшипникових вузлів відрізняється один від одного. Це особливо проявляється у нерівномірному зносі вкладишів підшипників. При цьому вкладиші циліндрів підшипників, що розташовані ближче до споживача енергії (гвинту або електричному генератору), мають більший знос порівняно з вкладишами, що знаходяться далі від споживача енергії. Тому як найбільш інформативні на рис. 2 та рис. 3 подані вкладиші 1-го та 2-го циліндрів, знос яких був мінімальний, та 5-го та 6-го циліндрів, знос яких був максимальний.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведеними дослідженнями встановлено взаємозв'язок самоорганізації наноструктурних плівок пластичного металу на поверхнях тертя з енергетичними втратами, що виникають під час експлуатації підшипників ковзання суднових дизелів. Підвищення самоорганізації наноструктурних плівок, яке досягається шляхом додавання до моторних мастил поверхнево-активних речовин, сприяє зменшенню енергетичних втрат в суднових дизелях, яка виражається в зниженні зносу вкладишів підшипників.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
3. Sagin S., Madey V., Sagin A. Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. –Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.
4. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Дослідження впливу органічних нанопокрить на забезпечення процесів мащення підшипникових вузлів суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 2(43). – С. 177-195. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.15.
5. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – Vol. 5(1(67)). – P. 22-32. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868.
6. Сагін С.В., Сагін А.С., Заблоцький Ю.В., Фомін О.В. Забезпечення технічного стану підшипників суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 138-151. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.13.
7. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pištˇek V., Kuˇcera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. – Vol. 13(4). – P. 146. doi.org/10.3390/lubricants13040146.

УДК 629.5

Воронков Г.С., Заблоцький Ю.В.

Національний університет "Одеська морська академія"

Зниження емісії оксидів азоту з під час експлуатації дизелів суден морського транспорту

Постановка проблеми в загальному вигляді. Двигуні внутрішнього згоряння / дизелі знаходять безліч застосувань у багатьох областях транспортної енергетики. На морському та внутрішнього водному транспорті суднові дизелі використовуються як пропульсивні двигуни та як приводи електрогенераторів, працюючи при цьому на самих різноманітних паливах, як рідких, так і газоподібних. Усі двигуни повинні відповідати певним екологічним вимогам. Водночас час рівень викидів конкретного двигуна може залежати, наприклад, від його призначення, виду і складу застосовуваного палива. Так, два по суті однакових двигуни, встановлених на одному об’єкті, можуть бути використані за різними призначеннями, один – як головний судновий, інший – у функції дизель-генератора. Вони можуть працювати на одному і тому ж паливі, при цьому відрізнятися за рівнем шкідливих викидів. Уже сьогодні вимоги до викидів від одного і того ж судна можуть відрізнятися залежно від його місцезнаходження. Існують зони контрольованих викидів: (Emission Control Areas – ECA) за оксидом сірки SO_X, при знаходженні в яких двигуни або повинні працювати тільки на мало-сірчистому паливі, або відпрацьовані гази повинні проходити очистку в скрубері; та за оксидами азоту NO_X, під час роботи в яких нормуються концентрація саме цієї складової випускних газів. Цілком ймовірно, що в подальшому кількість зон ECA буде зростати, при цьому число нормованих компонентів викидів також буде збільшуватися. Існують думки про необхідність введення більш детальних рівнів нормативів залежно від місцевих умов і реальних умов роботи судна. У портах і прибережних зонах будуть вводитися (і вже вводяться) більш жорсткі обмеження, водночас, як при плаванні у відкритому морі доцільно використовувати високосірчисті палива. Це хоча і викличе деяке зростання викидів SO_X і NO_X, але водночас буде в певній мірі парирувати ефект глобального потепління. Звідси випливає, що необхідно засвоїти методи вимірювання безлічі різних компонентів викидів, як твердих, так і газоподібних, причому в широкому діапазоні [1].

Однією з особливостей експлуатації морських суден є їх підзвітність міжнародним класифікаційним товариствам (наприклад, Lloyd’s Register of Shipping – England, Bureau Veritas – France, Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd – Germany, The American Bureau of Shipping – USA). Причому одне морське судно може бути під наглядом відразу декількох товариств. Ці організації на базі емпіричного досвіду, статистичного обліку та наукових досліджень розробляють свої власні Правила класифікації морських суден і ведуть систему безперервного контролю над дотриманням цих правил на класифікованих суднах. Це обмежує можливість виконання конструкційних змін в устрої суднового енергетичного устаткування (як теплових і механічних двигунів, так і систем, що забезпечують їхню роботу) без відповідного погодження з цими наглядовими органами. Судновий екіпаж при виконанні своїх функціональних обов'язків позбавлений можливості самостійного переобладнання як самої енергетичної установки, так і систем, що її обслуговують. Тому завданням і суднових механіків, і представників науково-дослідних організацій є визначення оптимальних умов експлуатації суднової енергетичної установки без внесення будь-яких удосконалень і модернізацій в її конструкцію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час використання вуглеводневих палив нафтового походження, які спалюють в циліндрі з надлишком кисню, приблизно 80...95 % загальної маси токсичних домішок відпрацьованих газів припадає на частку п'яти основних токсичних компонентів: CO, NO_X, SO_2, альдегідів і вуглеводнів [2].

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

І-ша група – методи внутрішньої нейтралізації (первісні методи), які характеризується:

- використанням малотоксичних робочих процесів;
- подачею води в циліндр;
- рециркуляцією відпрацьованих газів;
- регулюванням подачі палива [3];

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

- сажових фільтрів;
- термічних реакторів;
- рідинних нейтралізаторів;
- каталітичних нейтралізаторів;
- присадок (антідимних, антісажевих);
- ультразвукової коагуляції сажі [4].

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення оптимальних режимів роботи суднової системи рециркуляції випускних газів за якими забезпечується максимальне зниження емісії оксидів азоту.

Виклад основного матеріалу дослідження. В останнє десятиліття одним з розповсюджених способів забезпечення вимог Annex VI MARPOL щодо попередження забруднення довкілля оксидами азоту під час експлуатації дизелів морських суден є системи рециркуляція випускних газів. Даними системами обладнуються як головні суднові двигуни, що передають потужність безпосередньо на гребний гвинт, також і потужні допоміжні двигуни, що забезпечують енергією суднову електростанцію (останні активно застосовується для круїзних суден великої пасажиромісткості, які часто виконують заходи в прибережні води і райони екологічного контролю) [3].

Експериментальні дослідження щодо впливу системи рециркуляції випускних газів на екологічні показники роботи двигуна внутрішнього згоряння виконувалися на судновому мало-обертовому дизелі 7UEC60LS фірми Mitsubishi. Дизелебудівна корпорація Mitsubishi Heavy Industries Ltd. є однією з перших світових фірм, які почали впроваджувати системи рециркуляції випускних газів на морські судна [4].

Основні характеристики дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi:

• діаметр циліндра – 600 мм;
• хід поршня – 2400 мм;
• кількість циліндрів – 7;
• номінальна потужність – 12600 кВт;
• частота обертання, відповідна номінальній потужності – 82 об/хв.

Принципова схема дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi з системою рециркуляції випускних газів низького тиску (LP-EGR) показана на рис.1.

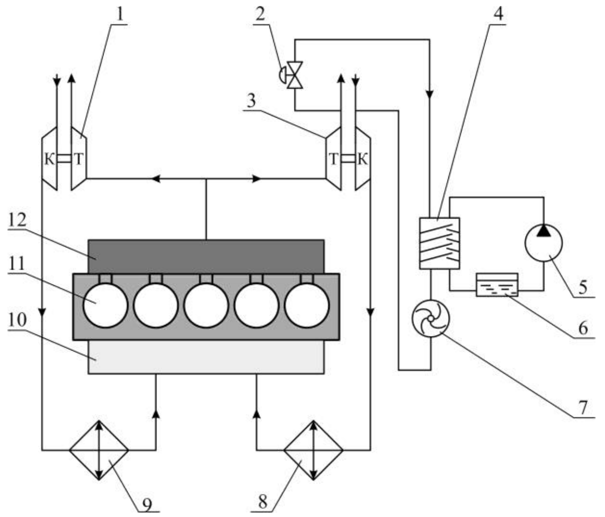


Рис. 1. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів суднового малообертового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi:
1, 3 – ГТН; 2 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів; 4 – скрубер; 5 – водяний насос; 6 – водяна цистерна; 7 – газовий нагнітач з електричним приводом; 8, 9 – охолоджувач наддувочного повітря; 10 – повітряний ресивер; 11 – циліндри дизеля; 12 – випускний колектор; Т, К – газова турбіна і повітряний компресор ГТН

Функціювання системи рециркуляції відбувається в такий спосіб. Випускні гази з циліндрів дизеля 11 надходять у загальний випускний колектор 12 і далі до ГТН 1 і 3, після чого через газовипускну трубу видаляються в атмосферу. ГТН 1 і 3 забирають повітря з машинного відділення і після стиснення спрямовують його через охолоджувачі 8 і 9 у повітряний (продувний) ресивер 10. При цьому ГТН 3 обладнаний системою рециркуляції випускних газів, яка складається з керуючого клапана 2, скрубера очищення газів 4, газового нагнітача 7, водяної цистерни 6 і водяного насоса 5. У разі використання системи рециркуляції випускних газів їх кількість регулюється клапаном 3. Випускні гази очищуються і попередньо охолоджуються в скрубері 4, після чого додатковим нагнітачем 7 подаються до повітряного компресора ГТН 3 і разом зі свіжим повітрям стискаються і надходять до охолоджувача 8, повітряного ресивера 10 і далі в циліндр дизеля 11.

Експериментальні дослідження з визначення емісії NO_X у ВГ виконувалися відповідно до вимог Технічного кодексу з контролю за викидами окислів азоту з суднових дизельних двигунів, згідно з яким випробування проводилися за випробувальним циклом Е3 (що застосовується до головних і допоміжних двигунів, які працюють за гвинтовою характеристикою). Режими роботи дизеля задавалися частотою обертання колінчастого вала, яка визначалася становищем паливної рейки.

Експерименти виконувалися за умови стабілізації зовнішніх збурень тв. навантажень для наступних швидкісних режимів роботи дизеля: 80, 75, 65 і 55 об/хв, що відповідало значенням відносної потужності дизеля: $0{,}93N_{eном}$, $0{,}77N_{eном}$, $0{,}5N_{eном}$ і $0{,}3N_{eном}$. Як $N_{eном}$ приймалася номінальна потужність, відповідна своїм значенням коефіцієнта надлишку повітря α. Ступінь рециркуляції випускних газів під час експерименту змінювалась в діапазоні 0… 18,8 %. Результати дослідження наведені на рис. 2.

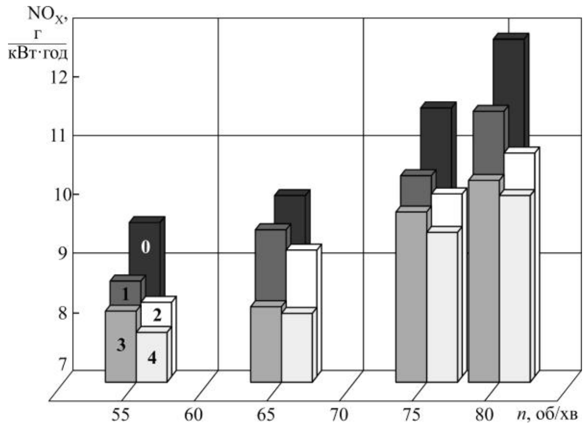


Рис. 2. Зміна концентрації оксидів азоту NO_X, г/(кВт·год) у випускних газах суднового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi залежно від частоти обертання n, об/хв для різного ступеня рециркуляції газів δ_{EGR}, %
0 – робота без рециркуляції, δ_{EGR}=0 %; 1 – δ_{EGR}=5 %; 2 – δ_{EGR}=10 %;
3 – δ_{EGR}=15 %; 4 – δ_{EGR}=20 %

Використання системи рециркуляції випускних газів зменшує кількість «чистого» повітря, що надходить в циліндр дизеля, що призводить до зниження ефективної потужності дизеля. Зміна її значень для різного ступеня рециркуляції показано на рис. 3.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Зміна ступеня рециркуляції випускних газів в діапазоні 4,7...18,8 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту NOX в випускних газах на всьому діапазоні експлуатаційних навантажень, але при цьому спостерігається зниження ефективної потужності дизеля, що обумовлено відносним зменшенням кисню в газоповітряної суміші, що потрапляє до циліндрів дизеля під час

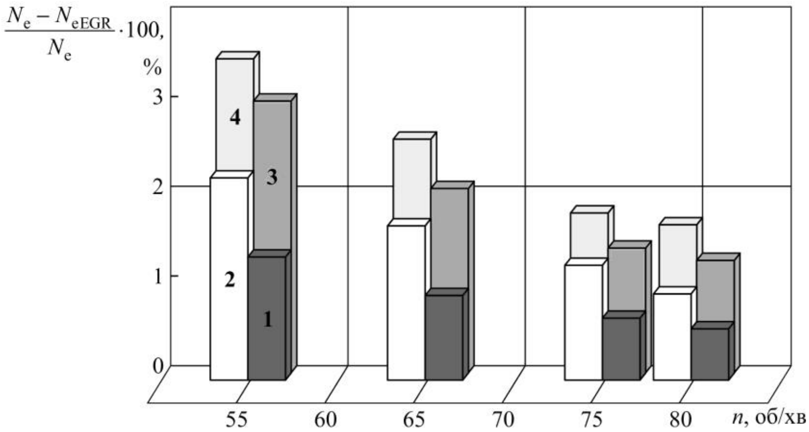


Рис. 3. Відносне зниження ефективної потужності $\frac{N_e - N_{eEGR}}{N_e} \cdot 100$, %, суднового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi залежно від частоти обертання n, об/хв для різного ступеня рециркуляції газів δ_{EGR}, %:
0 – робота без рециркуляції, δ_{EGR}=0 %; 1 – δ_{EGR}=5 %; 2 – δ_{EGR}=10 %;
3 – δ_{EGR}=15 %; 4 – δ_{EGR}=20 %

використання системи рециркуляції випускних газів. Подальші дослідження необхідно спрямувати на визначення найбільш раціональних режимів системи рециркуляції випускних газів за яких з одного боку як найбільш знижується емісія оксидів азоту, з іншого – як найменш знижуються втрати ефективної потужності дизеля в порівнянні з аналогічним навантаженням без використання системи рециркуляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

2. Сагін С.В., Куропятник О.А. Використання системи рециркуляції випускних газів високого тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів // Розвиток транспорту. – 2025. – № 2. – С. 86-98. https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.07.

3. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331

4. Куропятник О.А. Оцінка екологічності морських суден під час використання комплексних систем управління випускними газами суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 51. – С. 22-44. DOI: 10.31653/smf 51.2025.22-44.

УДК 629.5

Елефтеріаді К.К., Колегаєв М.О.
Національний університет "Одеська морська академія"

Забезпечення екологічності роботи морських суден під час їх експлуатації в особливих районах

Постановка проблеми в загальному вигляді. Щорічне збільшення споживання вуглеводневої сировини, превалювання використання рідкого та газоподібного палива над твердим, відсутність реальних альтернатив нафти та газу як основного джерела теплової енергії призводить до поступового виснаження їх континентальних родовищ. Подальше зростання споживання енергії у промисловості, на транспорті та у повсякденному житті підвищує дефіцит палива нафтового походження, який може бути забезпечений лише континентальними запасами. Тому останнім часом велика кількість країн розвивають та розширюють освоєння ресурсів континентального шельфу Світового океану. Основні запаси шельфових нафтових родовищ знаходяться у Мексиканській затоці, Перській затоці, Гвінейській затоці, а для Європейського континенту – у Норвезькому морі (в акваторіях Норвегії та Шотландії). Видобуток нафти здійснюється за допомогою спеціальних суден, що відносять до класу Drillships. Енергетичні установки цих суден забезпечують як рух судна та постачання його устаткування й механізмів електричної енергії, а й функціонування спеціального устаткування (яке виконує буріння свердловин і видобуток нафти). У зв'язку з цим потужність енергетичних установок Drillships перевищує потужність енергетичних установок інших судів рівного їм дедвейту.

Суднові дизелі (як головний компонент суднової енергетичної установки) є джерелами забруднення навколишнього середовища випускними газами, до складу яких входять токсичні компоненти: вуглекислий газ CO, вуглеводні C_nH_m, сажа, оксиди сірки SO_X, оксиди азоту NO_X [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міжнародна морська організація (IMO) встановила морські райони суворішого контролю викидів оксидів сірки SO_X та оксидів азоту NO_X. Ці спеціальні екологічні райони називаються SECA (Sulfur Emission Control Area), NECA (Nitrogen Emission Control Area). Особливі екологічні райони Європи наведено на рис. 1.

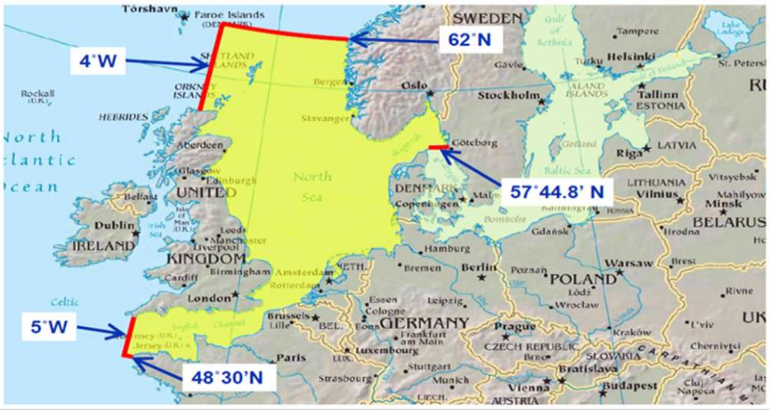


Рис. 1. Особливі екологічні райони Європи

Морські, прибережні та континентальні райони Північної Європи характеризуються високою вологістю, зниженою температурою, високою інтенсивністю вітру. Це прискорює перетворення оксидів азоту в азотну кислоту та її подальше потрапляння з природними опадами (дощем та снігом) на поверхню землі та моря. Інтенсивні вітри сприяють поширенню токсичних компонентів випускних газів великої території. Тому райони наведені на рис. 1, відносять до особливих екологічних районів і приділяють підвищену увагу суднам морського транспорту під час роботи у них [2, 3].

Постановка завдання. Метою дослідження було визначення оптимального ступеня рециркуляції випускних газів суднового дизеля 16V32 STX-MAN як одного із способів забезпечення екологічності їх роботи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на судні класу Drillships з такими основними характеристиками: довжина – 228,1 м, ширина – 41,8 м, осідання – 11, дедвейт – 60086 тонн.

Суднову енергетичну установку складали шість однотипних дизелів 16V32 STX-MAN з такими основними характеристиками: діаметр циліндра – 320 мм; хід поршню – 460 мм; частота обертання – 720 об/хв; номінальна потужність – 7000 кВт, питома витрата палива – 192 г/(кВт·год). Дизелі виконували функції головних і допоміжних двигунів [4].

Особливістю експлуатації дизелів 16V32 STX-MAN у складі суднової енергетичної установки Drillships є великий експлуатаційний період роботи на часткових режимах – в діапазоні потужностей N_{ework}=(0,25...0,95)N_{enom}. Дані дизелі були обладнані штатною системою рециркуляції газів низького тиску (LP-EGR), в якій гази після газової турбіни турбонагнітачів повертаються в продувний ресивер дизеля через охолоджувач наддувного повітря. Схема газоповітряної системи дизеля 16V32 STX-MAN із системою рециркуляції газів низького тиску наведена на рис. 2.

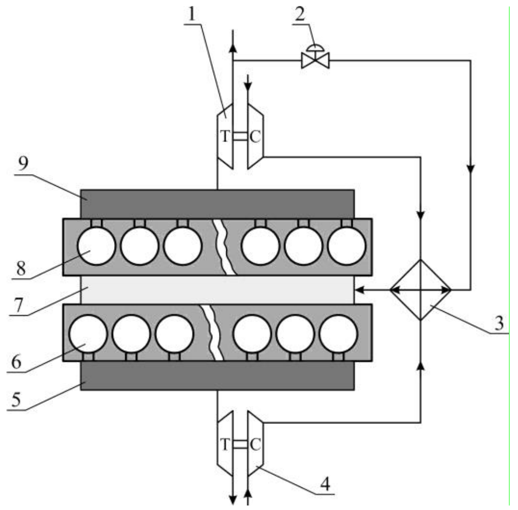
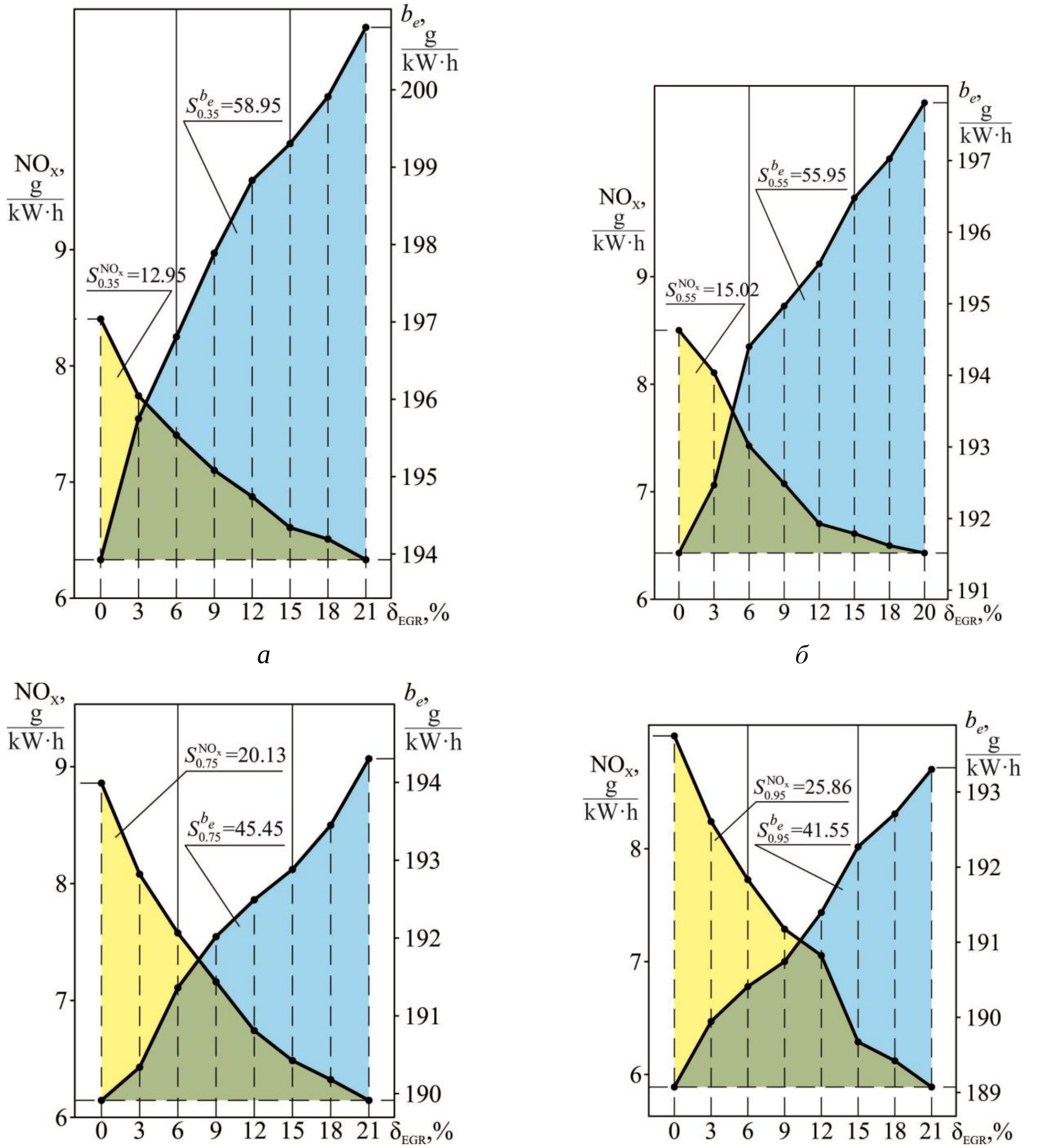


Рис. 2. Схема газоповітряної системи дизеля 16V32 STX-MAN: 1, 4 – турбонагнітач (Т – газова турбіна, С – повітряний компресор); 2 – клапан системи рециркуляції; 3 – охолоджувач наддувного повітря; 5, 9 – випускний колектор; 6, 8 – робочі циліндри; 7 – ресивер наддувного повітря

Завданням дослідження було визначення оптимального ступеня EGR, при якому забезпечується максимальне зниження емісії оксидів азоту за одночасної мінімальної зміни енергетичних та економічних показників дизеля. Дослідження виконувались для різного ступеня рециркуляції випускних газів (δ_{EGR}=0…21 %) та різного навантаження на дизель – 35, 55, 75, 95 % від номінального навантаження. Результати дослідження наведено на рис. 2 [5].



в *г*

Рис. 3. Емісія оксидів азоту NO_X та питома ефективна витрата палива b_e суднового дизеля 16V32 STX-MAN за різних навантажень: *а* – 35%; *б* – 55%; *в* – 75%; *г* –95 %

Ефективність та економічність використання системи рециркуляції випускних газів на різних режимах її експлуатації можна оцінити визначивши площу під залежностями. $S_{0,35}^{NO_X} = f(\delta_{EGR})$, $S_{0,55}^{NO_X} = f(\delta_{EGR})$, $S_{0,75}^{NO_X} = f(\delta_{EGR})$, $S_{0,95}^{NO_X} = f(\delta_{EGR})$ та $S_{0,35}^{b_e} = f(\delta_{EGR})$, $S_{0,55}^{b_e} = f(\delta_{EGR})$, $S_{0,75}^{b_e} = f(\delta_{EGR})$, $S_{0,95}^{b_e} = f(\delta_{EGR})$, де індекси 0,35…0,95 відповідають навантаженню на дизель.

Екологічна ефективність роботи дизеля різних режимах оцінюється за значенням площі $S^{\mathrm{NO_X}}$, економічна – за значенням площі S^{b_e}. Площа під залежністю $S^{\mathrm{NO_X}} = f(\delta_{\mathrm{EGR}})$ прямо пропорційна зниженню екологічності роботи дизеля. Чим більше значення $S^{\mathrm{NO_X}}$ тим ефективніша система EGR забезпечує зниження концентрації NO_X у випускних газах дизеля. Площа під залежністю $S^{b_e} = f(\delta_{\mathrm{EGR}})$ обернено пропорційна економічності роботи дизеля. Збільшення значення S^{b_e} призводить до зростання питомої ефективної витрати b_e палива на розглянутому режимі [6].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Під час експлуатації дизелів морського транспорту повинні забезпечуватися не тільки енергетичні та економічні, а й екологічні показники їх роботи. Особливо це актуально під час експлуатації морського транспорту у спеціальних екологічних районах. Одним із показників, величина якого регламентується вимогами IMO, є емісія NO_X з випускними газами суднових дизелів. Одним із способів зниження емісії NO_X є використання їх рециркуляції. При цьому частина випускних газів (після газовипускного ресивера або після газової турбіни газотурбонагнітач) перенаправляється в циліндр дизеля. Це зменшує максимальну температуру згоряння та сприяє зниженню інтенсивності утворення NO_X. Одночасно з цим збільшується період догоряння палива на лінії розширення, що призводить до збільшення питомої витрати палива та підвищення температури випускних газів.

Конструкційне виконання сучасних дизелів дозволяє варіювати рівень рециркуляції системи випускних газів в діапазоні 0…21 %. Вибір оптимального ступеня рециркуляції випускних газів забезпечується виконанням наступних критеріїв:

- екологічного – як максимальне зниження (для конкретного експлуатаційного режиму) емісії оксидів азоту із випускними газами;
- економічного – як мінімальне зростання витрати палива (віднесеного або до часу роботи і потужності дизеля, або до пройденого судном відстані);

Рециркуляцию выпускных газов, как способ обеспечения экологических показателей судовых дизелей, целесообразно использовать в диапазоне 6…15 % – на режимах обеспечивающих максимальное снижение эмиссии оксидов азота при минимальном повышении удельного расхода топлива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Куропятник О.А. Оцінка екологічності морських суден під час використання комплексних систем управління випускними газами суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 51. – С. 22-44. DOI: 10.31653/smf 51.2025.22-44.

2. 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. – 2021. – С. 25-40. doi: 10.31653/smf343.2021.25-40

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

4. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331

5. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

6. Сагін С.В., Куропятник О.А. Використання системи рециркуляції випускних газів низького тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів // Розвиток транспорту. – 2025. – № 3. – С. 87-99. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.06.

УДК 629.5

Мошківський А.А.
Національний університет "Одеська морська академія"

Підвищення екологічності роботи суднових дизелів шляхом перепуску випускних газів

Постановка проблеми в загальному вигляді. Теплові двигуни, що забезпечують автомобільні, залізничні, річкові та морські транспортні перевезення, є джерелами шкідливих викидів у довкілля [1]. Найпоширенішим тепловим двигуном, який використовується на морських та річкових суднах, є дизель [1]. Його коефіцієнт корисної дії більший, а питома ефективна витрата палива менша в порівнянні з іншими типами енергетичних установок (газотурбінними та паротурбінними, яки також застосовуваних на морському транспорті). Здійснення термодинамічного циклу дизеля неможливе без утворення випускних газів, до складу яких входять токсичні компоненти: вуглекислий газ CO, вуглеводні C_nH_m, сажа C, оксиди азоту NO_X, оксиди сірки SO_X, а також сполуки важких металів, що знаходяться у паливі.

Оксиди азоту NO_X є одним із найбільш токсичних компонентів випускних газів [2]. Норми викидів оксидів азоту дизелями суден морського та внутрішнього водного транспорту регламентуються вимогами Annex VI MARPOL і залежить від року побудови судна і частоти обертання валу дизеля – таблиця 1.

Таблиця 1. Граничні викиди оксидів азоту, г/(кВт·год),

Рік побудови судна	Стандарт	Частота обертання дизеля, хв$^{-1}$		
		n<130	130<n<2000	n>2000
2000	Tier I	17	$45n^{-0.2}$	9.8
2011	Tier II	14.4	$44n^{-0.23}$	7.7
2016	Tier III	3.4	$9n^{-0.2}$	2.0

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забезпечення вимог стандартів Tier I та Tier II можливе за рахунок регулювання дизелів (шляхом зміни фаз подачі палива, випуску газів та продування), за рахунок зміни характеристик палива (у тому числі шляхом використання газового палива та паливних сумішей), а також вибору оптимальних режимів роботи дизелів. Забезпечення вимог стандарту Tier III можна досягти тільки шляхом використання додаткового обладнання, яке забезпечує очищення випускних газів від оксидів азоту (методи селективного відновлення – SCR, рециркуляції газів – EGR, електролізу газів – $CSNO_X$, зволоження повітря – HAM) [3, 4].

Одним із додаткових методів, використання якого забезпечує виконання вимог стандарту Tier II, є перепуск / скидання випускних газів (Exhaust gas wastegate – EWG). Фірма Wartsila рекомендує EWG в першу чергу для обмеження тиску наддувного повітря та запобігання помпажним явищам за умовою виникнення високих навантажень та як додаткову функцію – для зниження емісії NO_X [5, 6].

Постановка завдання. Метою роботи було визначення оптимальних режимів роботи системи EWG суднового дизеля, за якими забезпечується максимальне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах та мінімальне збільшення питомої ефективної витрати палива.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження проводилися на трьох однотипних суднових середньообертових дизелях 6L26 фірми Wartsila з електронною системою управління фазами паливоподачі, повітро- та газорозподілу. Номінальна потужність дизелів становила N_{enom}=1200 кВт за частоти обертання 1000 хв$^{-1}$. Дизелі входили до складу суднової електростанції та передавали свою потужність на електрогенератори. Дизелі мали однаковий моторесурс роботи та експлуатувалися на рівновеликих навантаженнях. Як система управління випускними газами на цих дизелях встановлена система EWG. Згідно з проектною документацією, система EWG забезпечує перепуск газів у діапазоні 0 … 10 %. Принципова схема системи EWG суднового дизеля 6L26 фірми Wartsila показана на рис. 1.

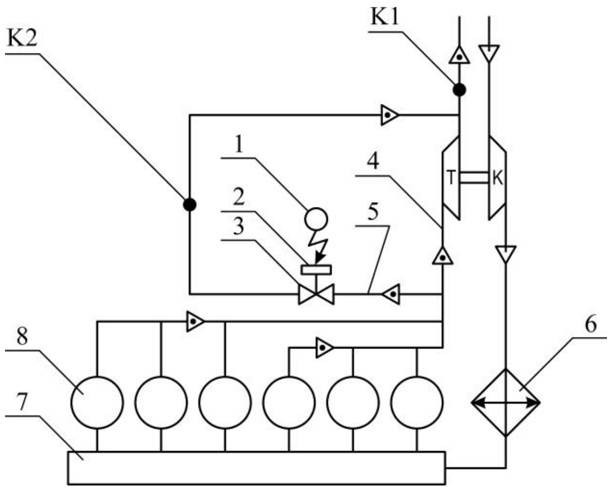


Рис. 1. Принципова схема системи керування випускними газами EWG суднового середньооборотного дизеля 6L26 Wartsila:
1 – контролер; 2 – сервомотор перепускного клапана; 3 – перепускний клапан;
4 – основний потік газів; 5 – перепуск газів; 6 – охолоджувач наддувного повітря;
7 – продувний ресивер; 8 – циліндри дизеля; K1, K2 – точки контролю витрати газів;

Під час проведення дослідження контролювалися та вимірювалися параметри, що дозволяють визначити емісію NO_X, питому ефективну витрату палива b_e, а також ефективну потужність дизеля.

Ступінь перепуску випускних газів δ_{EWG} змінювалася в межах 0…10 % і визначалася за виразом

$$\delta_{EWG} = \frac{G_{wg}}{G_{\Sigma}} \cdot 100\%,$$

де G_{wg} – кількість випускних газів, що пройшли через перепускний клапан, кг/с (вимірювалась в точці K2);

G_{Σ} – сумарна кількість випускних газів, що надходять у газовипускну магістраль за умовою повністю закритого перепускному клапані, кг/с (вимірювалась в точці К1).

Концентрація NO_X у випускних газах визначалася в газовипускній трубі, на відстані більш ніж 10 м від газотурбонагнітачів, що відповідало вимогам Технічного кодексу щодо NO_X.

Зниження емісії NO_X під час використання системи EWG показано на рис. 2.

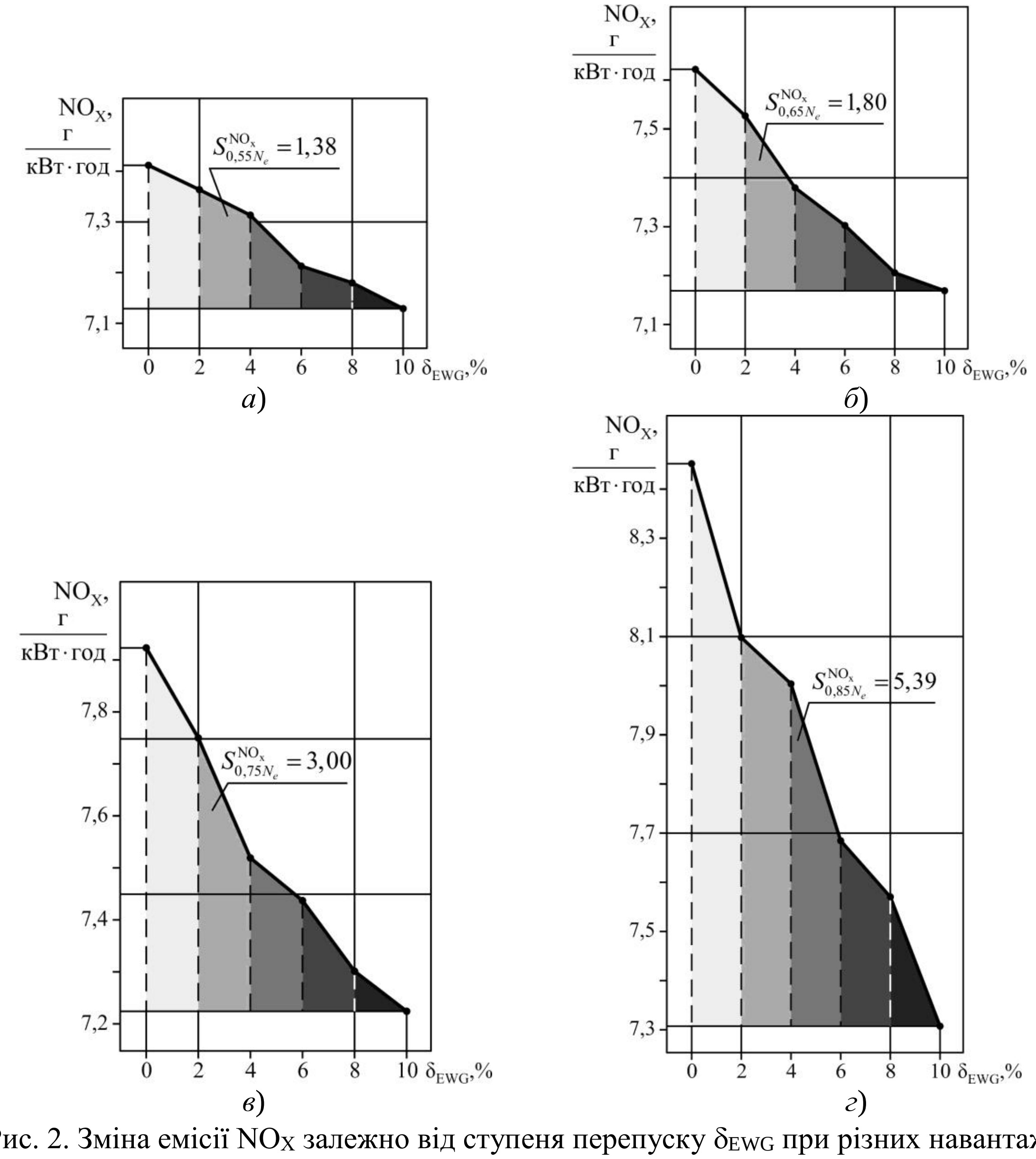


Рис. 2. Зміна емісії NO_X залежно від ступеня перепуску δ_{EWG} при різних навантаженнях дизеля 6L26 Wartsila:
a – 55 %; *b* – 65 %; *c* – 75 %; *d* – 85 %

Ефективність використання системи EWG для кожного з режимів роботи дизеля оцінювалася площею під кривою NO_X=*f*(EWG), яка визначалася методом трапецій як певний інтеграл (1)

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2}\left[f(x_0)+2f(x_1)+...+2f(x_{n-1})+f(x_n)\right], \quad (1)$$

де $f(x)$ – безперервна функція з аргументом x;

a, b – межі інтегрування ($a \le x \le b$);

$h = (b - f)/n$ – крок інтегрування;

x_0, x_1, …, x_{n-1}, x_n – значення аргументу з кроком збільшення h в інтервалі інтегрування $[a, b]$;

n – число площ.

Значення інтеграла (1), що визначає площу під кривою $NO_X=f(\delta_{EWG})$, наведені на рис. 2.

Площа під кривою $NO_X=f(\delta_{EWG})$ може бути прийнята як критерій екологічної ефективності застосування системи EWG. Збільшення цієї площі свідчить про більшу екологічну ефективність режиму перепуску газів. Таким чином, збільшення ступеня перепуску випускних газів на всіх режимах роботи дизеля сприяє підвищенню його екологічної ефективності.

Екологічну ефективність режимів системи EWG також можна оцінити за запасом екологічної стійкості роботи дизеля, %, на вибраному режимі роботи, який визначається за виразом

$$\Delta NO_X^{+} = \frac{NO_X^{Tier} - NO_X^{екс}}{NO_X^{Tier}} \cdot 100\% \qquad (2)$$

де NO_X^{Tier} – граничне значення концентрації оксидів азоту у випускних газах (визначається для відповідного стандарту Tier залежно від характеристик дизеля), г/(кВт·год);

$NO_X^{екс}$ – концентрації оксидів азоту у випускних газах на вибраному режимі роботи дизеля, г/(кВт·год).

Діаграма, що ілюструє екологічну стійкість режимів системи EWG за різних умов експлуатації наведено на рис. 3.

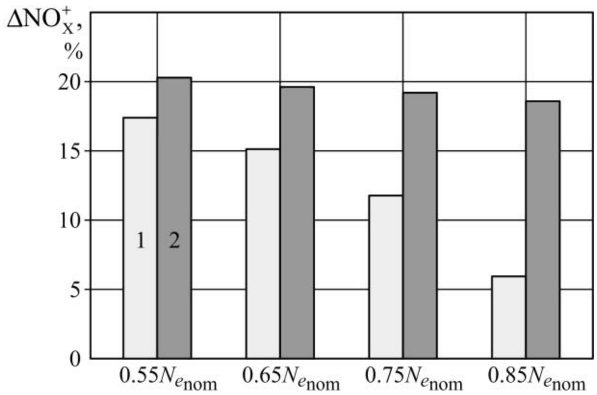


Рис. 3. Екологічна стійкість роботи дизеля 6L26 Wartsila:
1 – без EWG; 2 – δEWG=10 %

Використання системи EWG зменшує кількість випускних газів, що надходять до турбокомпресора. При цьому пропорційно зменшується кількість повітря, що надходить у циліндри дизеля, що призводить до погіршення згоряння палива та збільшення питомої ефективної витрати палива. Це збільшення може бути визначене як

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{\text{EWG}} - b_e}{b_e} \cdot 100\% \qquad (3)$$

де b_e^{EWG} – питома ефективна витрата палива на вибраному режимі роботи дизеля, г/(кВт·год);

b_e – питома ефективна витрата палива без використання системи EWG, г/(кВт·год).

Відносне збільшення питомої витрати палива Δb_e для різних режимів роботи дизеля наведено на рис. 4.

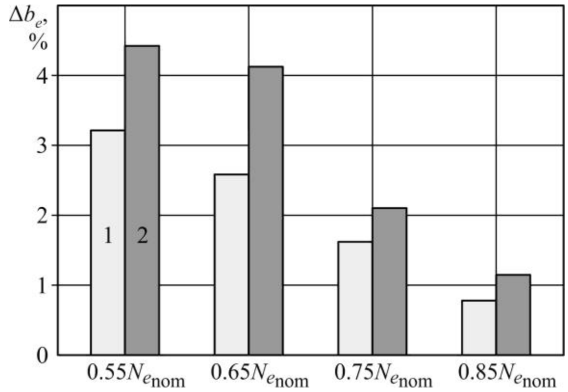


Рис. 4. Діапазон збільшення питомої витрати палива Δb_e для різних режимів роботи дизеля 6L26 Wartsila:
1 – δ_{EWG}=2 %; 2 – δ_{EWG}=10 %

Висновки і перспективи подальших досліджень. Наведені результати дозволяють зробити такі висновки.

1. Використання перепуску випускних газів сприяє поліпшенню екологічних показників роботи суднових середньооборотних дизелів, зокрема для суднового дизелю 6L26 Wartsila у діапазоні експлуатаційних навантажень (0,55…0,85)N_{enom} на 3,3…15,4 % знижується рівень емісії NO_X у випускних газах.

2. Використання системи EWG зменшує кількість випускних газів, що надходять до газової турбіни, це призводить до зниження продуктивності турбокомпресора, зменшення кількості повітря, що надходить у циліндр дизеля, і зростання питомої ефективної витрати палива. При цьому для режимів, що відповідають навантаженню (0,55…0,65)N_{enom}., зростання цього показника збільшується пропорційно ступеню перепуску випускних газів δ_{EWG} і становить 2,7…4,4 % (в діапазоні δ_{EWG}=2…10 %). Для навантажень близьких до номінальної потужності – 0,85N_{enom} збільшення питомої витрати палива не перебільшує 1,2 % (для максимальної величини перепуску газів δ_{EWG}=10 %).

3. Оцінка ефективності використання системи EWG, як одного із способів забезпечення вимог Annex VI MARPOL щодо обмеження емісії NO_X, повинна проводитись шляхом комплексної оцінки наступних параметрів роботи дизеля: кількість оксидів азоту у випускних газах, збільшення питомої ефективної витрати палива, температура випускних газів. Як оптимальний ступень перепуску газів слід приймати значення, яким відповідає максимальне зниження емісії NO_X при мінімальному підвищенні витрат палива та одночасному підтримці температури випускних газів у межах, що не перевищують допустимий рівень теплової напруженості.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuˇcera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. Journal of Maritime Science & Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.

2. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more. – 2019. – Vol. 66. – № 1. – P. 1 - 9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.

3. Сагін С.В., Куропятник О.А. Використання системи рециркуляції випускних газів низького тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів // Розвиток транспорту. – 2025. – № 3. – С. 87-99. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.06.

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

5. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

6. Куропятник О.А. Оцінка екологічності морських суден під час використання комплексних систем управління випускними газами суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 51. – С. 22-44. DOI: 10.31653/smf 51.2025.22-44.

УДК 629.5

Однолько Б.Ю.

Національний університет "Одеська морська академія"

Забезпечення експлуатаційних характеристик палива для суднових дизелів

Постановка проблеми в загальному вигляді. В останні 3...5 років перед судновласниками знову гостро постала проблема зростання цін на бункерувальне паливо. У зв'язку з цим багато компаній-судновласників знову почали розглядати питання застосування на суднах більш дешевих важких сортів палива, альтернативних дорогим легким сортам. Ситуація, що склалася, посилюється ще й тим, що якість суднових важких палив загалом погіршується, через те, що нафтопереробні заводи прагнуть підвищення вироблення з нафти легких фракцій. Одночасно зі зростанням цін та зниженням якості палива посилюються вимоги до рівня викидів шкідливих речовин із відпрацьованими газами суднових дизелів. На думку експертів, це додатково вплине і на так складну ситуацію на бункерному ринку, а особливо на вартість низькосірчистих палив.

Останнім часом співвідношення ціни різні види рідкого палива дещо нормалізувалося. Завдяки цьому переведення дизелів на важкі сорти палива знову стає актуальним завданням. Переведення великотоннажних суден виключно на високов'язкі сорти палива може знизити витрати на бункерувальне паливо на 35...40 %. При цьому нормальна робота суднових двигунів з певними характеристиками може бути забезпечена досить широким діапазоном марок важкого палива. Наприклад, це можуть бути не тільки палива марок RME180 або RME350, а й порівняно дешевші RME500 і навіть RME700. Зазначені палива виготовляються із залишкових та середньодистилятних продуктів переробки нафти [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основною проблемою при переведенні дизелів на важке паливо, як відомо [3, 4], є погіршення якості робочого процесу, що призводить до зростання витрати палива та мастильних матеріалів, збільшення швидкості зношування циліндропоршневої групи і паливної апаратури. Під час роботи на важких сортах палива, крім усього іншого, виникає проблема вкрай низької якості палива, що іноді за густиною перевищує щільність води, що створює додаткові труднощі у випадку очищення даного палива.

Процес підготовки важкого палива складається з декількох ступенів, що вимагають установки спеціального обладнання: очищення в сепараторах і фільтрах, підігріву, що виконується на основі електропідігрівачів, парових кожухотрубних або пластинчастих теплообмінників, і безпосередньої підготовки в'язкості, відповідно до вимог заводом-виробником суднових дизелів, що забезпечується за допомогою бустерних модулів.

Під час використання лише важких палив потрібна складніша система паливопідготовки. Система має бути обладнана додатковими блоками очищення, здвоєним повнопотоковим фільтром з паровим підігрівом, віскозиметром, паливним витратоміром, трубопроводом рециркуляції з редукційним клапаном підтримки постійного тиску палива перед паливною апаратурою високого тиску. Паливні трубопроводи повинні мати супутникове обігрів та теплову ізоляцію. Сепарацію важких палив слід здійснювати у дві стадії: пурифікація та кларифікація у режимі 25…30 % номінальної продуктивності кожного сепаратора. Рекомендується додаткова фільтрація з відсіванням частинок розміром до 5 мкм, а також хімічна обробка важких палив. З'являється необхідність частіших регулювань паливної апаратури. При цьому паливну апаратуру високого тиску регулюють на рівномірність подачі палива по циліндрах для малообертових дизелів через 500…600 годин роботи, для середньообертових – через 850…1000 годин, а також по куту випередження подачі палива [2,5].

Постановка завдання. Завдання дослідження полягало в розробці варіанту дообладнання паливної системи суднового дизеля з урахуванням можливості використання ультразвукової обробки палива.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним із додаткових методів підготовки важких палив є обробка палива ультразвуком. Цей спосіб насамперед сприяє поліпшенню дисперсних якостей палива, а явище кавітації, що супроводжує цей процес, призводить до додаткової активації його вуглеводневих складових та розщепленню C-S зв'язків. Одним із варіантів застосування ультразвукової обробки палива є дообладнання штатних систем паливопідготовки додатковими модулями, які здійснюють цей процес [3].

Таким модулем була доукомплектована система паливопідготовки дизелів 6NSD-M Nigita Power Systems, які мають номінальну потужність 480 кВт за частотою обертання валу 1450 об/хв, та входили у кількості трьох штук до складу суднової допоміжної енергетичної установки. Фрагмент ділянки дообладнання паливної системи дизелів показаний на рис. 1.

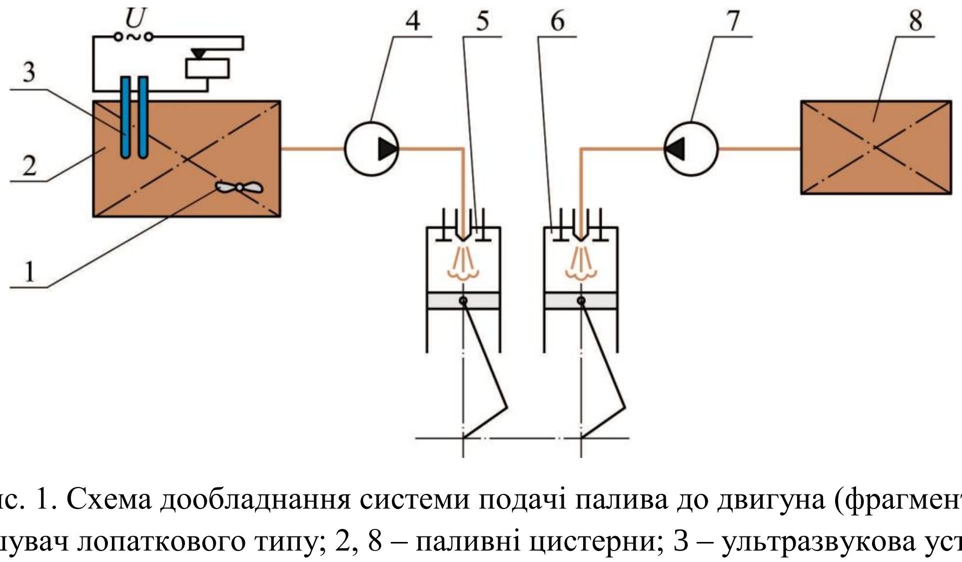


Рис. 1. Схема дообладнання системи подачі палива до двигуна (фрагмент):
1 – змішувач лопаткового типу; 2, 8 – паливні цистерни; 3 – ультразвукова установка;
4, 7 – паливні насоси; 5, 6 – двигуни

Дизелі мали кожен свою автономну систему паливоподачі, що давало можливість проводити дослідження для окремого дизеля з паливом, що пройшов різні етапи підготовки. Паливна система одного з двигунів не піддавалася перекомплектації та експлуатувалася у «штатному» стані, при цьому даний дизель приймався за «контрольний». Паливо до двох інших дизелів подавалося після додаткової обробки за допомогою ультразвукових хвиль.

Двигун 6 був «контрольним» і експлуатувався в «штатному» режимі, при цьому паливо, пройшовши стандартну процедуру підготовки, подавалося до нього насосом 7 з цистерни 8. Двигуни 5 були «експериментальним». Паливо до них подавалося насосом 4 з цистерни 2, в якій паливо піддавали вплив ультразвукових хвиль за допомогою генератора УЗГ-5-М з фазовою корекцією та магнітострикційним випромінювачем. Генератор складається з кількох силових осередків та загальної системи управління. Система дозволяє регулювати різницю фаз вихідної напруги осередків, домагаючись необхідного розподілу картини ультразвукового поля. Під час синфазної роботи генератор дозволяє набрати модульно будь-яку потужність у діапазоні $N_{УЗГ}$=20...5000 Вт, а також забезпечити вихідну частоту ультразвукового сигналу в діапазоні $\nu_{УЗГ}$=7...35 кГц з точністю завдання частоти до 1 Гц.

При цьому експлуатація одного з дизелів проводилася на мінімально можливій температурі охолоджувальної води та мастила з точки зору забезпечення умов експлуатації та запобігання досягненню температури точки роси. Значення температури охолоджуючих середовищ, а також температури точки роси розраховувалися за виразами (1) та (2).

Ультразвукова установка 3 експлуатувалася в режимі $N_{УЗГ}$=3200 Вт с застосуванням магнітострикційного випромінювача $\nu_{УЗГ}$=22 кГц. Дані величини були визначені у попередніх лабораторних дослідженнях та забезпечували найкращі дисперсні показники палива [3]. У паливній цистерні 2, в якій відбувалася ультразвукова обробка палива, додатково встановлювався лопатковий змішувач 1, що забезпечувало однорідність палива у всьому обсязі.

Завданням дослідження було визначення зносу циліндрових втулок і верхнього поршневого кільця для «стандартного» палива, і палива, що піддалось додаткової обробки за допомогою ультразвукових хвиль.

Вимірювання зносу проводилося для двох крайніх циліндрів, які, як відомо, більш ніж інші (центральні циліндри) схильні до цього явища. Отримані в такий спосіб значення усереднювалися. Крім того, вимірювання лише на двох циліндрах суттєво скорочувало час монтажних робіт, що обмежувалося умовами експлуатації. З цих причин дослідження виконували після 170, 360, 580, 780 і 990 годин роботи двигунів – за якими було можливе тимчасове виведення дизелів з експлуатації. Результати вимірювання зносу циліндрових втулок та поршневих кілець наведено на рис. 2 та 3.

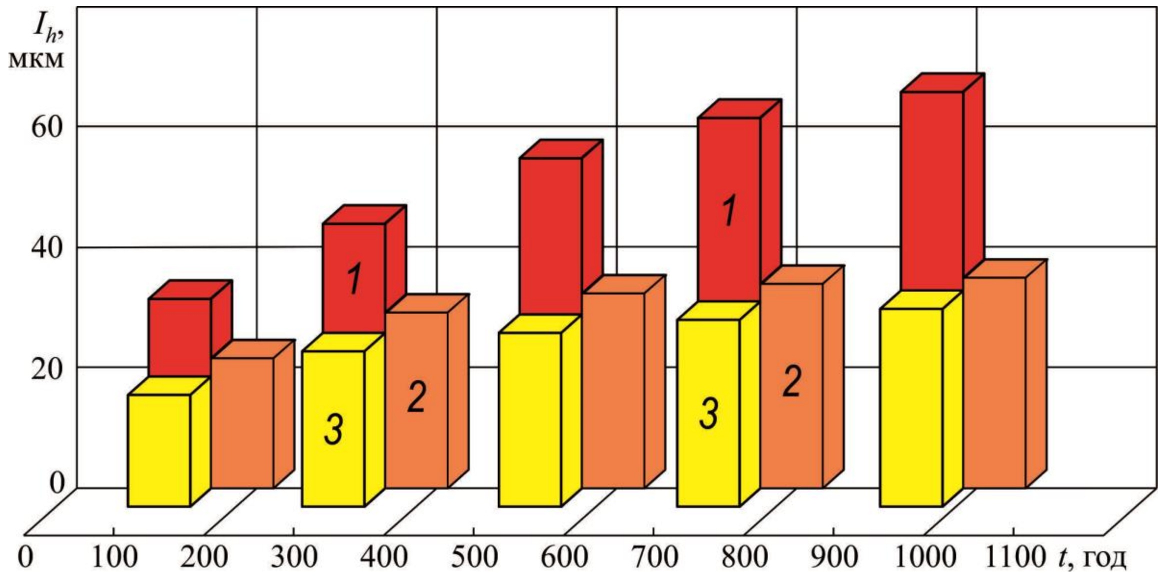


Рис. 2. Корозійний знос циліндрових втулок суднового дизеля 6NSD-M Nigita Power Systems за різних умов експлуатації:
1 – паливо без додаткової обробки (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 2 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 3 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля на мінімально допустимих температурних режимах)

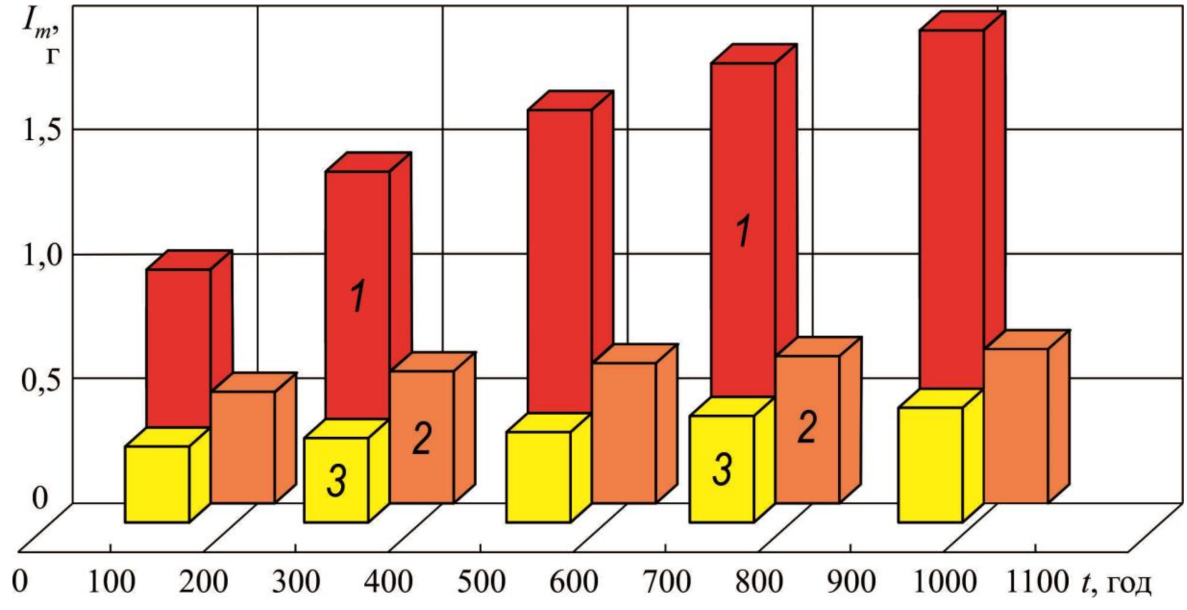


Рис. 3. Корозійний знос поршневих кілець суднового дизеля 6NSD-M Nigita Power Systems за різних умов експлуатації:
1 – паливо без додаткової обробки (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 2 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 3 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля на мінімально допустимих температурних режимах)

Висновки і перспективи подальших досліджень. Сучасні схеми побудови паливних систем суднових дизелів в модульному варіанті дозволяють проводити модернізацію і перекомплектацію окремих модулів. При цьому найбільшу ефективність приносить перекомплектація модуля (системи) підготовки. Додаткове включення в цей модуль вузлів ультразвукової обробки і гідродинамічної активаці палива призводить до зниження зносу циліндропоршневої групи дизеля.

Проведені експериментальні дослідження свідчить про те, ультразвукова кавітаційну обробка палива призводить до зниження сірчистого зносу деталей ЦПГ, при цьому найбільше зниження цього параметра спостерігається для поршневих кілець, що особливо актуально, враховуючи важливість даного вузла в забезпеченні як якісного перебігу процесів стиснення, згоряння та розширення, так і надійності роботи сполучення поршневі кільця – втулка циліндра.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – С. 17-30. doi: 10.31653/smf45.2022.17-30.

2. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз ефективності використання в суднових дизелях палив різного фракційного та структурного складу // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – С. 31-42. doi: 10.31653/smf45.2022.31142-42.

3. Мадей В.В., Волков О.М. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – С. 43-56. doi: 10.31653/smf45.2022.43-56.

4. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 40. – С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

5. Солодовніков В Г., Руснак Д.Ю. Використання ультразвукової обробки палива у паливних системах суднових середньообертових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – С. 126-136. DOI : 10.31653/smf48.2024.126-136.

УДК 629.5

Сиваєв М.М.

Національний університет "Одеська морська академія"

Підвищення ефективності очищення суднових важких палив

Формулювання проблеми у загальному вигляді. Підготовка палива на суднах морського та річкового транспорту ґрунтується на методах обробки, які поділяються на дві основні категорії:

• методи, спрямовані на зміну фізичного стану палива;

• методи, що забезпечують зміну фізико-хімічного стану палива.

Для корекції фізичного стану палива застосовуються такі способи теплової обробки:

• паровий, електричний та індукційний підігрів;

• гомогенізація палива.

Методи, що впливають на фізико-хімічний склад палива, поділяються на три підкатегорії:

• видалення домішок з палива;

• хімічна обробка палива;

• змішування різних видів палива.

Теплова обробка палива застосовується для корекції його в'язкості з використанням таких засобів, як теплообмінники, парові змійовики у витратних цистернах, а також парові та електричні супутники трубопроводів.

Підкатегорія методів очищення палива від домішок включає такі способи:

• відстоювання палива у відстійних та витратних цистернах;

• сепарація палива у відцентрових сепараторах;

• фільтрація палива у фільтрах грубого та тонкого очищення.

Підкатегорія методів хімічної обробки охоплює:

• рідке інгібування палива (введення рідких присадок);

• тверде інгібування (введення твердих присадок).

До підкатегорії методів гомогенізації належать такі способи обробки палива:

• гідродинамічний;

• вібромеханічний;

•магнітний;

• електричний;

• ультразвуковий.

Підкатегорія методів змішування палив складається з таких способів:

• механічне змішування за допомогою електроприводного пристрою;

• кавітаційний;

• ультразвуковий [1].

Огляд останніх досліджень і публікацій. Дослідження в галузі підготовки суднового палива перед його спалюванням у циліндрах дизелів свідчать, що традиційні методи очищення (відстоювання, сепарація, фільтрація) вже вичерпали свій потенціал. Отже, використання лише цих методів не дозволяє кардинально змінити процес очищення палива та підвищити ступінь його використання. На сучасних суднах поширюється впровадження додаткових методів очищення, таких як адсорбція, абсорбція, хімічне збагачення тощо [2, 3]. Однак, застосування подібних додаткових методів не завжди є можливим у судновій енергетиці.

Постановка завдання. Під час експлуатації двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) на суднах морського та річкового транспорту все частіше використовуються відносно дешеві залишкові сорти палива. До їх складу входять не лише «корисні» елементи, такі як водень (Н) та вуглець (С), згоряння яких вивільняє тепло, але й «паливний баласт». Це, перш за все, зола та коксові залишки, згоряння яких не супроводжується виділенням теплоти, а також механічні домішки. До складу останніх можуть входити: залізо (Fe) з концентрацією 2...25 %, кремній (Si) та його сполуки (4...30 %), алюміній (Al) з вмістом до 4,5...5 %, мідь (Cu) та цинк (Zn) з вмістом до 1,0 %, а також органічні сполуки з концентрацією 20...40 %. Зазначені компоненти відрізняються від вуглецю та водню підвищеною електропровідністю. Саме тому існують методи, спрямовані на видалення цих домішок з палива шляхом застосування додаткових електричних полів [4].

Відтак, основним завданням дослідження стало вивчення процесу очищення суднового важкого палива нафтового походження за допомогою електричних полів, а також визначення впливу такого методу на експлуатаційні характеристики палива, процес його згоряння та технічний стан ДВЗ морських і річкових суден.

Виклад основного матеріалу дослідження. Електричні методи очищення палив належать до відносно нового наукового напрямку — електрогідродинаміки, яка вивчає взаємодію електричного та гідродинамічного полів у різних багатофазних системах (рідинах, емульсіях, суспензіях тощо). Однак багато фундаментальних положень електродинаміки ще недостатньо розроблені й не повною мірою відображають фізику процесу очищення досліджуваних рідин. Це стосується й палив, для яких розробка засобів електричного очищення проводиться переважно емпіричним шляхом з подальшим тлумаченням отриманих результатів.

Метод очищення палива з використанням електричного поля є одним з найперспективніших для суднових умов. Незважаючи на значну кількість вітчизняних та зарубіжних публікацій з цієї теми, жодна з них не містить повних теоретичних та практичних рекомендацій щодо очищення суднових палив за допомогою електричного поля. Водночас, методи очищення суднових палив із застосуванням електричного поля (електросепарація та електрофільтрація) не вимагають від обслуговуючого персоналу глибоких теоретичних знань, є досить простими, надійними та потребують лише початкового налаштування відповідного обладнання [5].

Вуглеводневі палива є типовими діелектриками, проте частинки домішок, що містяться в них, можуть бути або діелектриками з діелектричною проникністю, відмінною від палива, або провідниками.

Електричні властивості палив та водо-паливних емульсій характеризуються трьома основними параметрами: діелектричною проникністю (ε, Ф/м), питомою електропровідністю (σ, см/м) та напруженістю пробою ($E_{пр}$, В/см).

Суднові палива містять у своєму складі дистилятні та залишкові фракції переробки нафти. Характерною особливістю цих палив є утворення складних структурних систем з вуглеводнів та невуглеводневих домішок. Структурними елементами неполярних палив є насичені вуглеводні (алкени, нафтени) з діелектричною проникністю $\varepsilon\approx(1{,}9\ldots0{,}2)\varepsilon_o$ та ароматичні вуглеводні з $\varepsilon\approx(2{,}4...2{,}6)\varepsilon_o$, де ε_o (Ф/м) — діелектрична проникність повітря. До верхньої межі неполярних елементів також належать асфальтени з $\varepsilon\approx(3...4)\varepsilon_o$. До структурних елементів палив також відносяться механічні домішки, частинки карбенів, карбоїдів та краплі води, тобто всі домішки з діелектричною проникністю, що перевищує діелектричну проникність повітря ($\varepsilon\geq\varepsilon_o$). Внаслідок молекулярних та полярних взаємодій вищезазначених елементів утворюються водо-паливні та асфальто-смолисті структури палива. Дистилятні палива зазвичай містять незначну кількість невуглеводневих домішок, вплив яких на електричні властивості палива є мінімальним. У важких суднових паливах асфальто-смолисті домішки суттєво змінюють їх електричні властивості.

Густина та діелектрична проникність суднових палив нафтового походження знаходяться в таких межах:

- для дистилятного палива: ρ=830...850 кг/м^3, $\varepsilon=(2{,}204...2{,}212)\varepsilon_o$ Ф/м;
- для моторного палива: ρ=880...920 кг/м^3, $\varepsilon=(2{,}442...2{,}557)\varepsilon_o$ Ф/м;
- для важкого палива: ρ=940...980 кг/м^3, $\varepsilon=(2{,}579...2{,}728)\varepsilon_o$ Ф/м.

З наведених даних випливає, що діелектрична проникність суднових палив не перевищує $3\varepsilon_o$, тому їх можна класифікувати як типові неполярні діелектрики.

Таким чином, враховуючи різницю в електричних властивостях власне палива та домішок, що містяться в ньому (насамперед механічних і води), можливе застосування обробки палива електричним полем. При цьому чисте паливо, будучи діелектриком, практично не піддається впливу поля, тоді як механічні домішки та вода під дією поля та додаткових технічних засобів можуть бути видалені з палива.

Очищення важких палив за допомогою електричних полів може здійснюватися в режимах сепарації або фільтрації.

У першому випадку на паливо впливає система електродів, за допомогою яких створюються однорідні та неоднорідні електричні поля. Видалення механічних домішок з потоку палива відбувається одночасно з роботою сепаратора, який накладає на потік палива електричні поля.

Під час фільтрації палива в пристроях, що генерують електричні поля, відбувається накопичення механічних домішок на спеціальних осередках з подальшим їх видаленням при чистці обладнання [5].

Принципові схеми суднових сепараторів та фільтрів, що використовують електричні поля, наведені на рис. 1 та 2.

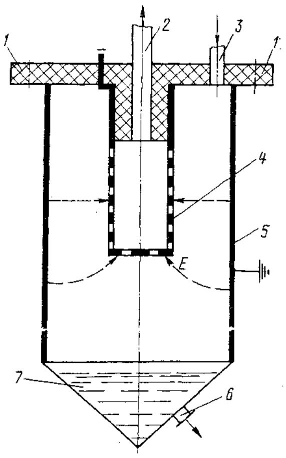


Рис. 1. Сепаратор, що очищує паливо за допомогою електричного поля, із сітчастим електродом:
1 – ізоляційна кришка із електродом;
2 – патрубок для висновку очищеного палива; *3* – прийомний патрубок;
4 – сітчастий електрод; *5* – циліндричний електрод; *6* – відвідної патрубок для води;
7 – водозбірник

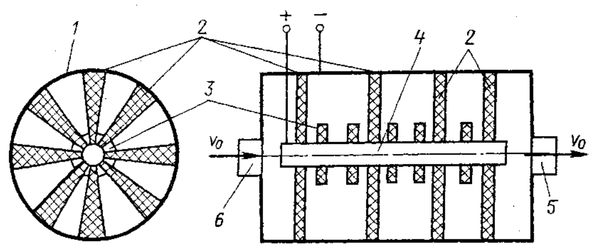


Рис. 2. Фільтр, що очищує паливо за допомогою електричного поля, із діелектричними накопичувачами бруду:
1 – корпус; *2* – діелектричні клинидержателі; *3* – діелектричні кільця;
4 – центральний електрод; *5* – вихідний отвір; *6* – вхідний отвір

Використання методу очищення палива електричними полями має значні переваги порівняно з традиційними методами, такими як фільтрація (у фільтрах грубого та тонкого очищення) та сепарація. Підтвердженням цього служать діаграми, наведені на рис. 3, які відображають відносний кінцевий вміст металевих домішок у потоці палива після застосування відповідних методів очищення.

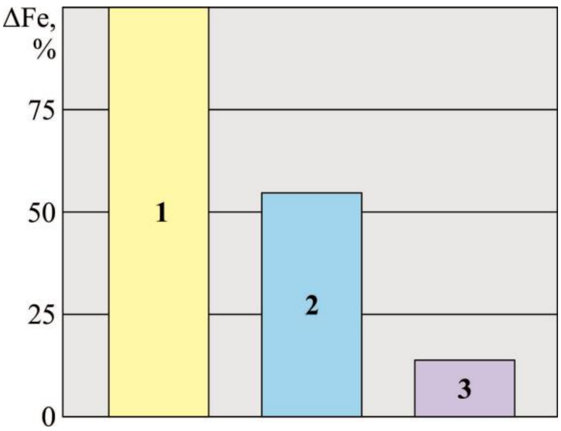


Рис. 3. Порівняння методів підготовки суднових палив:
1 – сепарація; 2 – фільтрація, 3 – очищення (сепарація / фільтрація) за допомогою електричних полів

Як базовий метод, після застосування якого в паливі залишається найбільша кількість металевих домішок, було прийнято сепарацію (залишковий вміст домішок при цьому приймався за 100%). Інші методи (послідовна фільтрація у фільтрах грубого та тонкого очищення з тонкістю відсіву 5 мкм) та очищення за допомогою електричних полів характеризуються меншими значеннями залишкового вмісту домішок, що ілюструється діаграмами на рис. 3.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Дизельні установки суден морського та річкового транспорту споживають значні обсяги рідкого палива. Від його структурного стану та експлуатаційних характеристик залежать перебіг робочого циклу, технічний стан окремих вузлів дизеля, а також енергетична та економічна ефективність його роботи.

Для забезпечення стабільного згоряння палива в циліндрах ДВЗ воно обов'язково проходить попередню обробку, мета якої — видалення води та механічних домішок. Одним із сучасних методів такої обробки є очищення палива шляхом сепарації та фільтрації в обладнанні, що використовує електричні поля. Це сприяє покращенню структурного складу палива, оптимізації процесу його згоряння та поліпшенню технічного стану паливної апаратури високого тиску [6].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.

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. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 139-149.

4. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз ефективності використання в суднових дизелях палив різного фракційного та структурного складу // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 31-42. doi: 10.31653/smf45.2022.31142-42.

5. Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 67 – 78. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78.

УДК 629.5

Сторчеус Е.В.

Національний університет "Одеська морська академія"

Оптимізація роботи паливної апаратури суднових дизелів під час їх експлуатації на часткових режимах

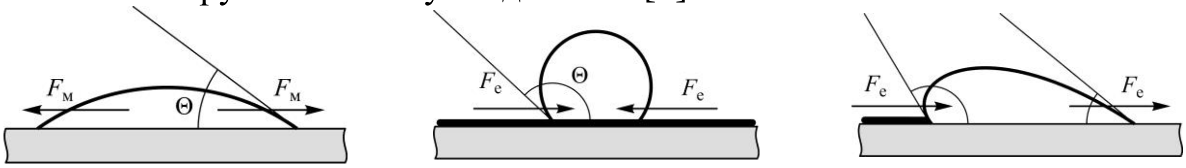
Постановка проблеми в загальному вигляді. Використання в суднових дизелях палива з низьким вмістом сірки ускладнює процес їх експлуатації через постійні операції з переходу з одного сорту палива на інше. Найбільшого негативного впливу при цих переведеннях надається паливній апаратурі високого тиску – розпилювачам форсунок будь яких дизелів та трибосполученням плунжер – втулка паливного насосу високого тиску (для дизелів з розподільним валом, кількість та ресурс роботи яких ще достатньо великі). Зміна сортів палива необхідна під час заходів в Європейські порти та плаванні у спеціальних районах (Sulfur Emission Control Area – SECA). У цих районах необхідно використовуватися паливо вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %. Переведення дизеля з одного сорту палива (з вмістом сірки до 0,5 %) на інший (з вмістом сірки до 0,1 % або на таке, що не містить сірку) має виконуватися відповідно до рекомендацій та вимог щодо заміни палива із заміною палива у всіх елементах системи. Цей процес може відбуватися від кількох годин до доби в залежності від типу паливної системи, витрат палива та технічних показників двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Під час виходу з порту та залишанні спеціальних районів необхідно виконання зворотного переведення дизеля на паливо з високим вмістом сірки. Усі переходи на різні сорти палива (через різні фізико-хімічні властивості) пов'язані зі зміною температурних показників їх експлуатації. Для палива із вмістом сірки 0,5%, експлуатаційна температура знаходиться в межах 90…105°С, для дистилятних палив (з вмістом сірки до 0,1%) 30…40°С. Часті переходи з важкого на дистилятне паливо, постійна зміна температурних режимів негативно впливають на моторесурс та довговічність паливної апаратури високого тиску, особливо на паливні насоси високого тиску (ПНВТ). Це призводить до підвищення зносу деталей паливної апаратури, а також підвищує питому витрату палива [1, 2]. Таким чином, низький вміст сірки в паливі негативно впливає на роботу та довговічність паливної апаратури, а разом із частою зміною палива суттєво скорочує її моторесурс. Все це підштовхує до пошуку вирішення питань, пов'язаних з підвищенням ефективності роботи паливної апаратури високого тиску суднових дизелів через часті зміни сортів палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує кілька шляхів для розв’язання цієї проблеми. Один із них це використання спеціальних присадок до палива з метою підвищення мастильних властивостей та покращення технічного стану прецизійних пар під час роботи на підвищеному навантаженні та використанні палива з низьким вмістом сірки [3, 4]. Також існує варіант поліпшення триботехнічних характеристик палив шляхом додаванні до нього рослинних олій [5, 6]. Принцип дії протизносних присадок полягає в утворенні міцної плівки на поверхні об'єкта, що захищається. Плівка складається із продуктів механохімічних перетворень присадки на поверхні металу. Спосіб формування залежить від режиму тертя. Під час гідродинамічного режиму цілком достатньо ефективної адсорбції (фізична адсорбція, хемосорбція) присадки, яка покращує змащувальні властивості палива. Під час граничного тертя переважними стають міжмолекулярні сили присадки та поверхневі сили, які формують біля поверхні стійкий шар палива, що виконую змащувальну дію. Однак використання цих присадок пов'язане з декількома складнощами. Перше – це безпосередньо самі поверхнево-активні речовини, специфіка їх зберігання та подальша експлуатація. Друге – витрати, підвищення яких у разі їх використання знижують економічність даного варіанту. Іншими можливими варіантами покращення триботехнічних властивостей є додавання мінеральних мастильних матеріалів. В результаті під час додавання такого мастила до палива з низьким вмістом сірки покращуються його змащувальні здібності. Одним із напрямів підвищення працездатності вузлів тертя є використання ультрадисперсних порошків м'яких металів, які розчинені в мастилі або в паливі. Найбільшого поширення набули порошки міді та солей міді, які вводяться в мастильні матеріали [2]. Таким чином, для вирішення цих проблем немає єдино правильного рішення, а можливо комплексне використання методів, при яких суттєво підвищується працездатність та моторесурс деталей паливної апаратури [3, 6].

Постановка завдання. З огляду на викладене, метою дослідження було визначення способу обробки контактуючих поверхонь паливної апаратури високого тиску суднових дизелів, при якому забезпечуються мінімальні втрати енергії в трибологічної системі плунжер-паливо-втулка ПНВТ при одночасній підтримці заданих потужних характеристик ДВС.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час граничного тертя (або граничного мащення) однією з головних характеристик мастильного шару (який формується завдяки орієнтаційної впорядкованості молекул) є його товщина. Для збільшення товщини граничних шарів, що утворюються вуглеводними рідинами (паливом і мастилом), використовують спеціальні поверхнево-активні речовини (ПАР) або присадки, які з різною концентрацією додають в базові палива або мастила [7]. У разі, коли граничний шар утворюється паливом на поверхні плунжера ПНВТ, даний варіант неприйнятний, оскільки для будь-якій концентрації присадок збільшується циклова подача і, відповідно, час впорскування. Крім того, як правило, присадки, що вводяться, мають вартість, яка перевищує вартість як мастила, так і палива. Під час використання ПАР в циркуляційних системах мащення їх функціональні властивості використовуються тривалий період часу та можуть відновлюватися в процесі експлуатації. ПАР, які додаються в паливо, згорають в циліндрі. Тому для палив використовуються ПАР, що активують процес згоряння, а застосування ПАР, що сприяють збільшенню товщини граничного шару палива, якій знаходиться в трибо-сполученні плунжер-втулка є недоцільним ще й з фінансової точки зору.

Для прецизійних пар паливної апаратури високого тиску як метод, що сприяє зниженню зносу їх контактуючих поверхонь, може бути рекомендовано використання спеціальних органічних покрить – епіламів. Як робоче середовище для процесу використання епіламів широкого поширення набули розчини перфторполіефіркіслоти загального вигляду Rf-COOH (Rf – радикал, що містить фтор) в хладонах. Основна функція епіламу полягає в утриманні мастильного матеріалу в зоні тертя енергетичним бар'єром на межії «метал-епілам». Це досягається за рахунок збільшення крайових кутів змочування рідини, що знаходиться біля поверхні металу, покритого шаром епіламу (рис. 1), а також за рахунок переспрямованості вектора дії сили поверхневого натягу рідини. При цьому збільшується товщина граничного мастильного шару та його несуча здатність [4].



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Крайовий кут змочування і напрямок вектора сили поверхневого натягу рідини: *а* – шар палива на поверхні металу; *б* – шар паливо на поверхні епіламу; *в* – шар палива на межі метал-епілам; θ – крайовий кут змочування; $F_м$, $F_е$ – сили поверхневого натягу на металі і епіламі, відповідно

Застосування методу використання епіламів для прецизійної пари плунжер-втулка ПНВТ, не отримало широкого поширення в елементах суднових технічних засобів. Це, в тому числі, пов'язано з консервативністю суднової енергетики як науки і прагненням суднового екіпажу уникнути додаткових ризиків, що виникають під час впровадження інноваційних ідей. Особливо це стосується таких відповідальних вузлів, як паливна апаратура високого тиску. Однак, при якісних попередніх дослідженнях, а також при дотриманні технології нанесення епіламів на поверхні елементів паливної апаратури високого тиску, можливо створити умови, що сприяють підвищенню їх експлуатаційних характеристик та економічності роботи дизелів [8].

При проведенні експериментів були використані наступні епіламы Polisam-05, Polisam-20МСК і Akwaline, що мають максимальну температуру експлуатації 450°C.

Результати даних експериментів наведені на рис. 2, де під позначенням ВП мається на увазі безпосередня товщина граничного шару «чистого» важкого палива, що утворюється на металевій поверхні, а під цифрами 1, 2, 3 – товщина граничного шару важкого палива, що утворюється на тій же поверхні при її покритті шаром епіламу.

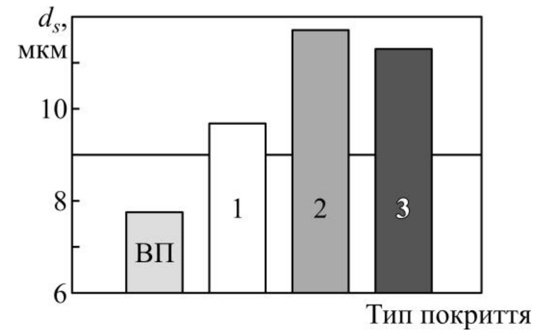


Рис. 2. Зміна товщини граничного шару палива при нанесенні епіламів на металеву поверхню: ВП – відсутність покриття (безпосередня товщина граничного шару важкого палива); 1 – Polisam-05;
2 – Polisam-20МСК; 3 – Akwaline

Як випливає з наведених результатів, використання епіламів забезпечує 1,47...1,52 кратне збільшення товщини граничного шару палива.

Енергетична ефективність будь-якої трибологічної системи оцінюється величиною втрат, до яких відносяться: втрати енергії на тертя (визначені коефіцієнтом тертя) і втрати матеріалу в результаті руйнування поверхонь тертя (визначені інтенсивністю зношування).

Тому, подальші дослідження розглянутого способу зниження енергетичних втрат при терті за рахунок керування структурою мастильного шару палива полягали у визначенні зносу поверхонь плунжерів які були покриті шаром епіламу, а також тих, що знаходяться в звичайному стані.Дослідження виконувалися на судновому дизелі 6L18 MAN-Diesel. На плунжера ПНВТ, що забезпечують подачу палива в циліндри №№ 1 і 4, не наносилися шари епіламу. Як покриття поверхонь плунжерів використовувалася фторорганічні рідини Polisam-20МСК (яка наносилась на плунжера ПНВТ №№ 2 і 5) і Akwaline (яка наносилась на плунжера ПНВТ №№ 3 і 6).

Через проміжки часу, що відповідали 380, 820, 1210, 1640 і 2180 годинам роботи дизеля (тривалість яких обумовлювалася умовами експлуатації, що дозволяють виконати зупинку дизеля і ревізію його ПНВТ) виконувалося визначення площі зносу поверхні плунжерів (як зі шаром епіламу, так і таких, що працюють без нанесення цього покриття). Після чого отримані значення для кожної групи плунжерів усереднювалися, а дизелі знову вводилися в експлуатаційний режим роботи. Результати досліджень надані у вигляді номограми на рис. 3.

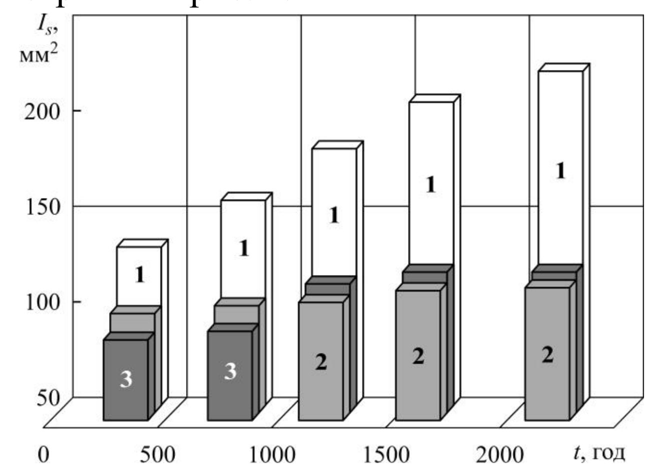


Рис. 3. Залежність зносу I_S плунжерів ПНВТ від часу роботи t суднового дизеля 6L18 MAN-Diesel:
1 – для плунжера без використання епіламу; 2 – для плунжера з нанесеним шаром епіламу Polisam-20МСК; 3 – для плунжера з нанесеним шаром епіламу Akwaline

Під час проведення експериментів через кожні 100 годин роботи проводилося періодичне індиціювання дизеля. При цьому циліндри з однотипним станом плунжерів ПНВТ (без використання епіламу, з нанесеним шаром епіламу Polisam-20МСК, з нанесеним шаром епіламу Akwaline) по черзі відключалися і по зміні частоти обертання виконувалася оцінка розподілу навантаження по циліндрах дизеля. В результаті було встановлено, що при зміні стану поверхонь плунжерів за рахунок використання епіламів навантаження на різні циліндри дизеля не змінюється.

Результати вимірювань наведені на рис. 3, з якого випливає, що реалізація в граничних шарах палива орієнтованої структури молекул і управління його товщиною за рахунок додаткового нанесення епіламів на прецизійні поверхні дозволяє в значній мірі знизити зношування плунжерних пар ПНВТ, підвищивши, таким чином, надійність і довговічність роботи даного вузла дизеля. Зменшення зносу прецизійної пари тертя плунжер – втулка ПНВТ також свідчить про зниження енергетичних витрат на забезпечення роботи цих елементів і підтверджує ефективність застосування методу використання епіламів.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведені дослідження і отримані результати дозволяють зробити наступні висновки.

Експлуатація трибологічної систем плунжер-втулка ПНВТ відбувається в режимі граничного тертя, а шар палива, що розділяє їх поверхні, виконує функції мастильного матеріалу.

Для прецизійної пари паливної апаратури високого тиску плунжер-втулка як метод, що сприяє зниженню контактних навантажень, які виникають на їх поверхнях, може бути використано нанесення епіламів.

Товщина шару епіламу на поверхні плунжерів ПНВТ складає 12,5...18,7 нм, а час, необхідний для його адсорбції не перевищує 10 хв.

Наношар епіламів, нанесений на металеву поверхню, призводить до ~1,5-кратного збільшення товщини граничного шару палива, що сприяє підвищенню пружних властивостей і розклінюючого тиску палива, що розділяє прецизійну пару втулка-плунжер ПНВТ.

Нанесення органічних покриттів на поверхні прецизійних пар ПНВТ сприяє підвищенню енергетичної ефективності даної трибологічної системи, що (в залежності від часу експлуатації ДВЗ) визначається в 24,0...44,6 %-му зниженні зносу плунжерів.

Нанесення епіламів відноситься до категорії сучасних нанотехнологічних методів, вимагає попередніх досліджень щодо визначення оптимальних видів органічних покриттів і часу їх нанесення на прецизійні поверхні, але при цьому не викликає додаткових трудовитрат при його використанні на річкових і морських суднах, підвищує енергетичну ефективність трибологічних систем ДВЗ і може враховуватися при розробці методики визначення параметрів СЕУ.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991

2. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.

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

4. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 17-30. doi: 10.31653/smf45.2022.17-30.

5. Заблоцкий Ю. В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей_//Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – С. 83-92.

6. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26-32.doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698.

7. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз ефективності використання в суднових дизелях палив різного фракційного та структурного складу // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 31-42. doi: 10.31653/smf45.2022.31142-42.

8. Мадей В.В., Волков О.М. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 43-56. doi: 10.31653/smf45.2022.43-56.

УДК 629.5

Маневський В.В.
НУОМА

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Експлуатація суднових дизелів морського та внутрішнього водного транспорту має особливу специфіку, адже безперервність і безаварійність роботи двигуна безпосередньо впливає на безпеку судна й екіпажу. Забезпечити стабільну роботу можливо лише за умови регулярного контролю параметрів робочого процесу в циліндрах. Періодичне вимірювання та аналіз цих параметрів дозволяють оптимізувати роботу двигуна, забезпечувати рівномірний розподіл навантаження між циліндрами та своєчасно виявляти потенційно небезпечні зміни у технічному стані головних систем і механізмів [1].

До типових дефектів, що легко визначаються завдяки індикаторним діаграмам, належать зниження середнього індикаторного тиску або тиску кінця стиснення. Однак існує велика група дефектів, пов’язаних із роботою паливної апаратури високого тиску та механізмом газорозподілу, які важко виявити традиційними індикаторними методами. Це стосується як двигунів із механічним або гідравлічним приводом клапанів, так і двигунів з електронним керуванням фазами упорскування та газорозподілу.

Найбільша кількість відмов у морських дизелях спостерігається саме у паливній апаратурі високого тиску. Прямі вимірювання тиску впорскування, що є найточнішим методом діагностики, неможливі через обмеження ІМО та класифікаційних товариств. Тому альтернативою є застосування вібродатчиків на магнітній основі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед систем, що застосовуються для діагностики суднових дизелів, виділяють:

• систему PED використовується для контролю стану рамових підшипників, поршневих кілець, турбокомпресора та параметрів наддувочного повітря, охолодження та вібрацій;

• систему Vibrometr забезпечує контроль роботи ЦПГ, системи впорскування, турбокомпресора, паливної апаратури високого тиску, а також максимального тиску згоряння;

• систему Mecom – контролює рівні вібрацій механізмів, температури підшипників, втулок, температуру газів та тиск у газоповітряному тракті;

• систему Komos – контролює максимальний тиск згоряння, тиск наприкінці стиснення, індикаторний тиск та характеристики відпрацьованих газів [2].

Постановка завдання. Існує велика кількість суднових систем діагностики, кожна з яких спрямована на забезпечення контроль тих чи інших показників роботи дизеля. При цьому для кожної з них питання ефективної візуалізації даних діагностування й оперативної передачі їх оператору залишається відкритим.

Виклад основного матеріалу дослідження. Протягом експлуатації дизелів поступово відбувається розрегулювання паливної апаратури високого тиску, механізму газорозподілу, а також зношування елементів ЦПГ. Ці зміни призводять до погіршення процесу згоряння, підвищення питомої витрати палива й рівня вібрацій, а також до нерівномірного навантаження між циліндрами.

Компанія MAN-Diesel&Turbo реалізувала концепцію постійної візуалізації параметрів робочого процесу через дві сучасні системи:

• PMI – для дизелів типу MC із розподільним валом;

• CoCoS-EDS – для дизелів ME з електронним керуванням фазами подачі палива й газорозподілу [3].

Елементи системи PMI для вимірювання тиску в циліндрі двигуна показані на рис. 1. Елементи системи CoCoS-EDS показані на рис. 2.

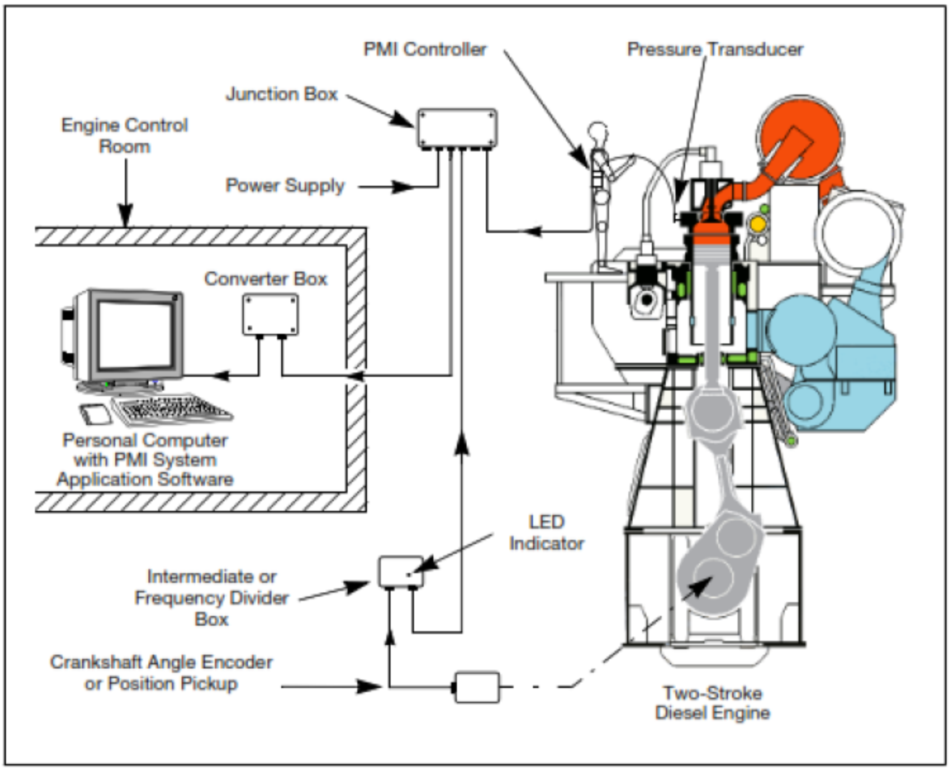


Рис. 1. Елементи системи діагностування PMI

Система CoCoS-EDS складається з програмних модулів:

• EDS — діагностика головного двигуна;

• MPS — планування технічного обслуговування;

• SPC — каталог запасних частин;

• SPO — замовлення та облік запасних частин.

Система забезпечує безперервний контроль робочого процесу та надає оператору детальну діагностичну інформацію [4].

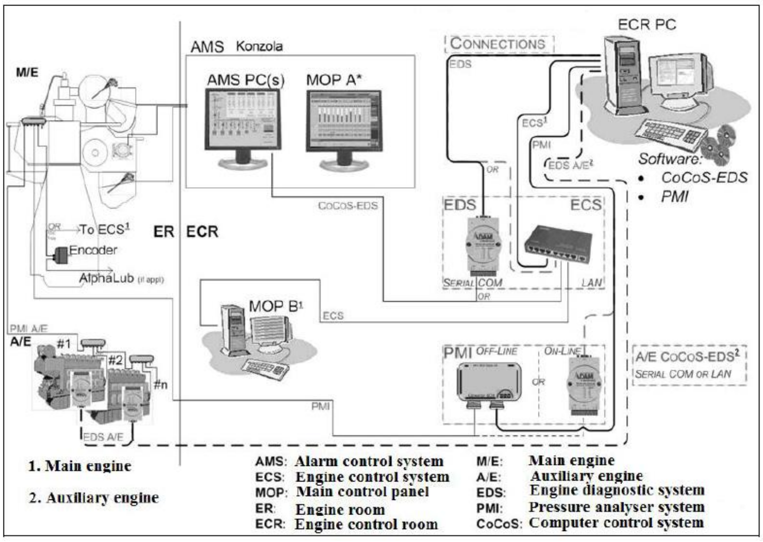


Рис. 2. Елементи системи діагностування CoCoS-EDS

Однією з систем діагностування та контролю робочого процесу суднових дизелів та подальшу візуалізацію їх показників є система DEPAS. Вона ґрунтується на аналізі вібраційних сигналів, що дозволяють реконструювати зміну тиску в циліндрі [5]. Приклад використання цієї системи наведено на рис. 3.

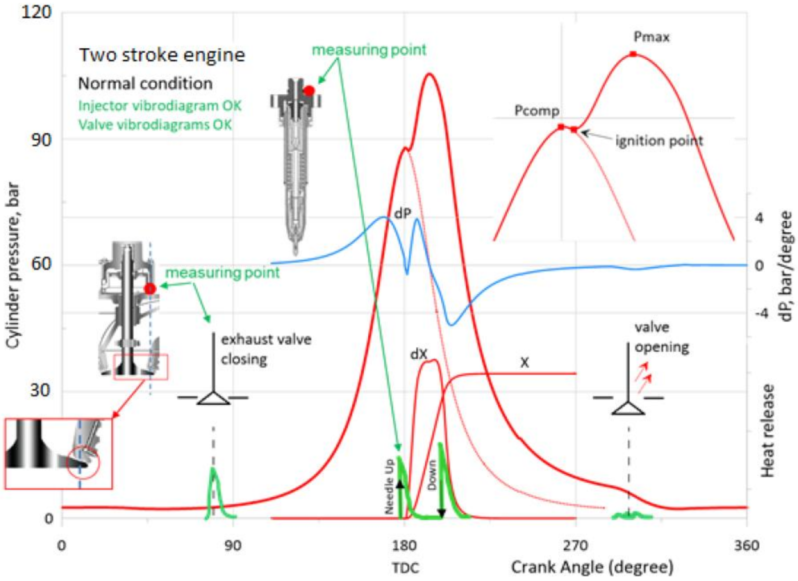


Рис. 3. Модель робочого процесу та вібродіаграми форсунки та клапана двотактного двигуна

Одним із варіантів розв’язання визначеного завдання є використання систем «розділеного моніторингу» робочого процесу суднових дизелів. Аналіз характеристик та функціональних можливостей існуючих систем моніторингу суднових дизелів показав, що високий ступінь інтеграції (повне об'єднання вимірювальної та розрахункової частин) є, у багатьох випадках, надмірною для отримання практично значущих параметрів і одночасно недостатньою для точного моделювання робочого процесу. Таким чином, основною ідеєю розділеного моніторингу суднових дизелів є розбиття системи на два функціональні модулі:

- модуль отримання даних та попереднього розрахунку параметрів у режимі реального часу – апаратна частина системи;
- модуль розрахунку та аналізу робочого процесу в режимі реального часу – зовнішнє програмне забезпечення.

Завданням модуля реального часу є отримання даних від датчиків, встановлених на двигуні, попередній розрахунок та відображення на внутрішній екран наступних параметрів: частота обертання колінчастого валу; середній тиск газів за робочий цикл; максимальний тиск газів за робочий цикл У модулі реального часу записуються дані про кілька послідовних робочих циклів кожного циліндра. Кількість циклів може задаватися з налаштування розрахункового модуля. Такий підхід дозволяє отримувати як середні значення параметрів та його відхилення, а й призводить статистичну оцінку рівномірності роботи паливної апаратури. Зазначені параметри можуть бути розраховані за несинхронізованими тимчасовими записами робочих циклів і є найбільш значущими для експрес-оцінки стану циліндра.

Розрахунковий модуль виконує послідовне розв'язання задач синхронізації даних, що надходять від модуля реального часу і, потім, розрахунку та аналізу робочого процесу. Під синхронізацією даних мається на увазі визначення координат основних положень поршня (ВМТ – верхня мертва точка і НМТ – нижня мертва точка) та подальше переведення індикаторних діаграм з функцій часу до функцій по куту повороту колінчастого валу [5]. При цьому враховується нерівномірність обертання колінчастого валу, що особливо актуально для малообертових сучасних довгоходових двигунів.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Системи діагностування та контролю робочого процесу суднових дизелів мають забезпечувати.

1. Логічний поділ завдань отримання найбільш значимих параметрів та повного розрахунку робочого процесу. У процесі поточної експлуатації суднових дизелів технічному персоналу, зазвичай, немає необхідності проводити повний розрахунок робочого процесу та процесу тепловиділення в циліндрах, але необхідно мати можливість швидкої оцінки кількох найбільш значущих параметрів робочого процесу. З іншого боку, у тих ситуаціях, коли потрібно більш детальний аналіз стану циліндра, необхідно зробити розрахунок та аналіз робочого процесу в ньому. І тому досить мати спеціальне програмне забезпечення, побудоване з урахуванням сучасної ітераційної математичної моделі робочого процесу. Вихідні дані для моделювання та подальшого аналізу можуть бути накопичені в модулі реального часу та передані в розрахунковий модуль по одному з послідовних інтерфейсів комп'ютера.

2. Значне спрощення схеми системи моніторингу. Система розділеного моніторингу фактично є переносним, компактним приладом, виконаним на базі сучасного мікроконтролера з внутрішньою енергонезалежною Flash пам'яттю, і програмне забезпечення, що працює під керуванням Windows. За даними безпосередніх вимірів на двигуні проводиться попередній розрахунок кількох значущих параметрів і їх на внутрішньому екрані модуля реального часу. Тимчасові реалізації робочих циклів, необхідні побудови діаграм і

детального аналізу робочого процесу в циліндрі накопичуються в архіві (Flash пам'яті).

3. Суттєво зменшення вартості системи моніторингу. Одним із аргументів недостатньо широкого використання на судах систем моніторингу суднових дизелів є їхня висока вартість. На суднах з невеликою водотоннажністю та невеликою потужністю енергетичної установки використання систем моніторингу може бути нерентабельним, незважаючи на високу практичну цінність даних про параметри та діаграми робочого процесу під час експлуатації. Поділ функцій системи моніторингу суднових дизелів дає можливість скоротити вартість системи та дати можливість користуватися результатами моніторингу ширшому колу технічних фахівців.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Сагін С.В., Бондар С.А. Метод попередження аварійних ситуацій під час експлуатації суднових дизелів за аналізом потоку відмов його основних вузлів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 101-109. doi: 10.31653/smf46.2023.101-109.

2. Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – С. 67 – 78. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78.

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

4. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Використання інтегрованих діагностичних моделей для оцінки експлуатаційних характеристик суднового пропульсивного комплексу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 133-140. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.15.

5. Varbanets R. etc. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9. – P. 321.https://doi.org/ 10.3390/ jmse9030321.

УДК 629.5

УДК 629.5

Борецький Є.О.
НУОМА

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЖНАРОДНИХ ВИМОГ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ БАЛАСТНИХ ОПЕРАЦІЙ НА СУДНАХ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Проблема перенесення мікроорганізмів з баластної водою, що використовується під час експлуатації суден, звернула на себе особливу увагу ще у 80-х роках минулого століття. З цього часу міжнародне морське співтовариство – Міжнародна морська організація (IMO) – активно займається розв'язанням цієї проблеми. З низки об'єктивних причин формування та впровадження міжнародного морського законодавства є процесом досить тривалим. Багато часу займає процедура розгляду та прийняття державами учасниками законодавчих актів, а крім того, розв'язання проблеми вимагало створення пристроїв для очищення та знезараження баластної води, що у свою чергу ґрунтувалося на початковому накопиченні певного досвіду [1].

У вищезазначеному процесі вимоги законодавства ставали дедалі суворішими. Перші рекомендації для розв'язання проблеми були прийняті у 1991 р. Потім IMO розробляє Міжнародну конвенцію з контролю суднових баластних вод (BWMC), яка покликана регулювати перенесення мікроорганізмів у водному баласті; Конвенцію було прийнято 2004 р. В даний час законодавство у вищезазначеній області визначає необхідність застосування пристроїв (установок) для очищення та знезараження баластної води. У таких пристроях застосовуються різні технології переробки баластної води. Одні з них передбачають лише її очищення, інші – очищення та знезараження [2]. При цьому зниження кількості мікроорганізмів забезпечується у процесах очищення та/або знезараження. Під час забезпечення необхідної якості баласту, що скидається за борт, відмінність полягає в механізмах такого зниження, а також у застосовуваній технології та конструктивних особливостях установок. Очищення забезпечує видалення мікроорганізмів як частинок домішок, а при знезараженні ці організми гинуть, забезпечуючи необхідний ефект зміни якості баластної води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час на суднах використовується близько 300 установок для очищення та знезараження баластної води, застосування яких схвалено IMO [3, 4].

Наприклад, в установці Hyde Guardian (виробник – Hude Marine, США) забортна вода очищається фільтруванням під час її прийому в суднові ємності баластної води. Періодично промиваються фільтри. Під час дебаластирування вода скидається з цих ємностей за борт. Застосовувана в даній установці технологія характеризується відсутністю знезараження, що підвищує ймовірність наявності в баластній воді, що скидається за борт, патогенних живих організмів. Крім того, у разі промивання фільтрів утворюється забруднена живими організмами вода, яка потребує подальшого знезараження.

В установці NK-O3 Blue Ballast System/Nutech O3 (виробник – NK Company, Ltd., Південна Корея) передбачено знезараження забортної води з використанням озонування під час її прийому як баласту. Під час дебаластирування баластна вода відкачується з суднових ємностей відразу за борт. Особливістю технології очищення та знезараження в цій установці є обробка озоном всього об'єму забортної води, що приймається в суднові ємності як баласт, що потребує використання генераторів озону великої продуктивності.

В установці Hitachi ClearBallast System (виробник – Hitachi, Ltd., Японія) очищення забортної води передбачає додавання до забортної води під час прийому її в баластові ємності коагулянтів і магнітного порошку, які призначені для коагуляції зважених частинок, у тому числі і мікроорганізмів, з подальшим механічним фільтром. При цьому технологія, що використовується, не передбачає знезараження, що може призводити до присутності в баластній воді мікроорганізмів, що скидається за борт.

Згідно з наведеними прикладами необхідна якість баластної води, що скидається за борт забезпечується під час видалення мікроорганізмів способами очищення або знезараження. Для цього в існуючих установках для очищення та знезараження баластної води найчастіше використовується фільтрування, ультрафіолетове випромінювання, озонування та деякі інші методи. Іноді підвищення ефективності використання цих операцій додатково застосовується коагуляція.

Необхідно відзначити, що існуючі в даний час установки здійснюють згадані процеси очищення та знезараження в момент прийому забортної води в якості баласту або при відкачуванні за борт, коли виникає необхідність видалення баласту. Ця обставина вимагає забезпечення великої продуктивності роботи очисних та знезаражувальних пристроїв, що може негативно впливати на якість очищення та знезараження баластної води.

Враховуючи, що на прийом баласту та дебаластування відводиться незначний час, фактор часу стає лімітуючим при організації та здійсненні всіх операцій із баластною водою. Аналіз технічних характеристик аналізованих установок підтверджує, що продуктивності становлять від кількох десятків кубічних метрів на годину до кількох тисяч. Для організації ефективних процесів очищення та знезараження за зазначеними значеннями продуктивності потрібні великі обсяги очисних пристроїв, які забезпечать необхідний час, необхідний для організації процесів очищення або знезараження.

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення найбільш раціональної (за продуктивністю та економічністю) технології обробки баластної води на суднах морського транспорту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз стану проблеми захисту водних об'єктів від мікроорганізмів, які можуть бути перенесені з баластною водою, дає змогу резюмувати таке. Характер норм сучасного законодавства вимагає відсутності мікроорганізмів у баластній воді, що скидається за борт, що може бути забезпечено як процесами очищення, так і процесами знезараження. Застосування процесів очищення забезпечує вилучення мікроорганізмів з баластної води, проте вимагає подальшого їх знищення, наприклад, знезараженням за умови забезпечення достатньої знезаражувальної дії.

Особливостями розв'язання проблеми забезпечення необхідної якості очищення та знезараження баластної води є великі обсяги баласту, що приймається, і необхідність швидкого заповнення баластних танків. Сказане вище дозволило сформулювати основні принципи формування технології очищення та знезараження баластної води. З метою забезпечення ефективності очищення та знезараження баластної води, в тому числі і за економічною складовою, мікроорганізми, що знезаражуються, доцільно виділити з усього обсягу баластної води і перемістити в окремий, значно менший обсяг. Після видалення зазначеної субстанції з основного обсягу баласту останній доцільно в суднових танках додатково обробити ультрафіолетовим випромінюванням, що підвищить надійність забезпечення необхідної якості баласту. Здійснення основних операцій у технології очищення та знезараження баласту має бути організовано під час її знаходження в суднових баластних танках під час переходу судна з баластом, тобто в умовах достатнього часу для забезпечення ефективності здійснюваних процесів. Осад з високим вмістом мікроорганізмів необхідно обробити озоном, який потенційно має сильний знезаражуючий ефект.

Враховуючи вищесказане, можлива технологія очищення та знезараження баластної води, що показано на рис. 1. Головною відмінністю запропонованої технології є видалення з основного обсягу баластної води за допомогою коагуляції та седиментації мікроорганізмами та формування осаду цієї суспензії.

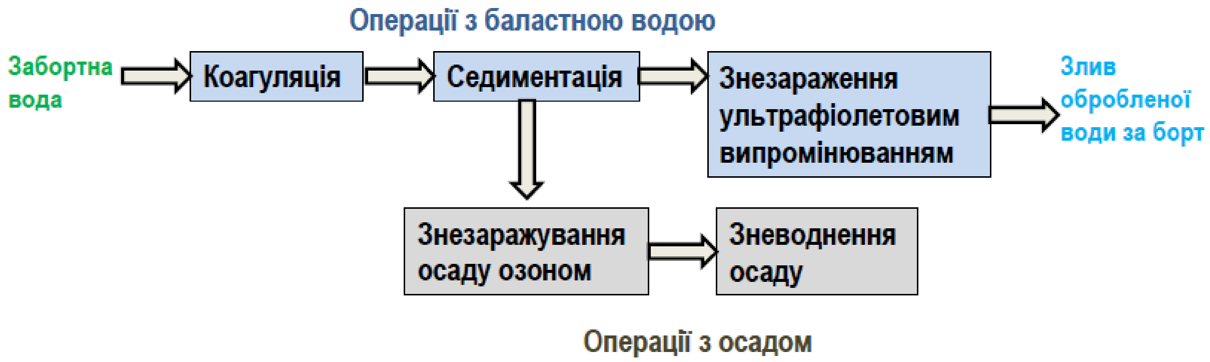


Рис. 1. Технологія очищення та знезараження баластної води

Поділ всього обсягу баластної води на два потоки: основний – це баластна вода 95…98 % від початкового обсягу та осад – 2…5 % дозволяє всі подальші операції з цими потоками здійснювати окремо і незалежно друг від друга. Видалення зваженої субстанції з баластної води седиментацією, інтенсифікованою коагуляцією забезпечує її очищення від мікроорганізмів. Очищений таким способом баласт додатково піддається знезараженню ультрафіолетовим випромінюванням під час знаходження баласту в суднових танках, а не в потоці в момент прийому баласту або його відкачування за борт. Загалом використання цього часу є позитивною особливістю запропонованої технології. Така організація процесу очищення седиментацією та обробки ультрафіолетовим випромінюванням створює найкращі умови для проведення процесу знезараження.

Можливість та достатність застосування ультрафіолетового випромінювання визначається двома наступними факторами. По-перше, виділення зважених домішок знижує рівень бактеріологічної небезпеки баластної води до рівня, який допускає ефективне застосування ультрафіолетового випромінювання. По-друге, наявність достатнього часу для здійснення даної операції, тому що переходи з баластом здійснюються, як правило, протягом кількох діб і більше. Осад накопичується в невеликому обсязі, що дозволяє ефективно знезаражувати його, використовуючи меншу кількість знезаражуючого реагенту, наприклад озону. Після знезараження осад представлятиме бактеріологічно безпечну суспензію, яку можна після зневоднення спалювати в суднових печах для спалювання відходів або зберігати до подальшої передачі на спеціалізовані берегові приймальні пункти. У процесі знезараження осаду, що характеризується великими значеннями coli-індексу, використовується озонування, що знайшло застосування у судновому природоохоронному устаткуванні.

Найбільш помітно переваги пропонованих технологічних рішень проявляються під час їх використанні в суднових установках, оскільки умови їх експлуатації характеризуються значними обмеженнями у просторі та часі. Дана технологія передбачає здійснення частини операцій (коагуляції, седиментації) та знезараження ультрафіолетовими лампами у самих баластних ємностях, що дозволяє значно економити простір суднових приміщень. Розміщення пристроїв, що забезпечують знезараження та подальшу обробку осаду може бути виконано як в агрегатованому варіанті, так і у вигляді окремих пристроїв, розміщених у різних місцях суднового простору. Пристрій, що реалізує цю технологію, може бути розміщений не тільки на судні, але і на позасудових (плавучих або берегових) очисних спорудах. На берегових очисних спорудах можуть бути прийняті й інші компонувальні рішення, у тому числі із застосуванням мобільного комплексу, на якому розміщено обладнання для знезараження осаду.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналіз стану проблеми баластної води, що утворюється під час експлуатації суден, а також особливості умов, у яких ця проблема має вирішуватися, дозволив сформулювати теоретичні принципи розробки технології очищення та знезараження баластної води, які у свою чергу сприяли розробці технології, що характеризується новизною технологічних та технічних рішень. Основні положення зазначених принципів: використання часу руху судна з баластом для організації процесів очищення та знезараження баласту, концентрація мікроорганізмів у невеликому обсязі осаду та відокремлення цього осаду від загального баласту, подальше знезараження виділеного осаду при використанні способів, що характеризуються значним знезаражуючим впливом.

Пропонована технологія з використанням виявлених можливостей підвищення ефективності та надійності очищення та знезараження баластної води включає способи, що забезпечують очищення баластної води від мікроорганізмів, їх переміщення у вигляді осаду в окремий потік води істотно меншого обсягу і подальше знезараження. Зазначені ознаки запропонованої технології роблять її економічнішою внаслідок ефективного витрачання озону, а також надійнішою в порівнянні з іншим обладнанням аналогічного типу.

Основні заходи у пропонованій технології здійснюються в статичних умовах, коли баластна вода знаходиться у судновій ємності. Знезараження передбачає дві стадії: очищення баласту ультрафіолетовим випромінюванням та осаду – озоном. Пропонована технологія може бути реалізована в суднових установках, а також в портових спорудах для прийому баласту з суден перед навантаженням. При реалізації технології в суднових умовах для організації та здійснення деякої частини операцій можуть бути використані власне баластові танки. Для розміщення на берегових спорудах можуть бути також використані різні рішення компонування.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – №4 (3(72)). – P. 33–42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.

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

3. Сагін С.В., Побережний Р.В. Метод управління факторами ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації пропульсивних комплексів засобів водного транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 110-117.

4. 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. – С. 131-147.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ І РЕМОНТ СЕУ

УДК 629.1.07:621.426

Бабак Є. В., Голіков В. А.
Національний університет "Одеська морська академія"

Оптимізація режимів роботи систем охолодження суднової енергетичної установки

Актуальність теми дослідження полягає у подальшому підвищенні ККД суднових дизелів. Оптимізація режимів роботи СЕУ є важливим кроком для забезпечення економічності, надійності, енергоефективності та відповідності стандартам експлуатації судна.

Основні завдання, що виникають у цьому напрямку, наступні: зміни умов експлуатації; цільова оптимізація; складність та взаємозв'язок систем; використання палива низької якості; динамічна поведінка та перехідні процеси; людський фактор; технічний і моральний стан обладнання; їх кібербезпека та інтелект.

Відомо [1, 2], що системи охолодження (СО) поділяються на кілька основних типів, головним чином, виходячи з використовуванного охолоджувача та схеми циркуляції. Основні СО: рідинна, повітряна, прямоточна (відкрита), замкнута (непряма, двоконтурна або багатоконтурна), а також локальна або централізована, тощо.

Об'єктом дослідження став малообертовий двигун, а предметом - процеси енергоперетворення у двоконтурній СО.

Переваги цієї системи полягають у більш точному та ефективному управлінні процесами роботи дизельного двигуна, в недоліки - у підвищеній складності конструкції, вищої вартісті виробництва та обслуговування, підвищенні ризику витоків, збільшенні ваги, потенційної надійності окремих елементів та залежність від роботи контурів.

Мета дослідження полягала у підвищенні ефективності суднових дизелів шляхом оптимізації роботи СЕУ.

Науковою гіпотезою стала можливість оптиміціїї СО шляхом застосування інтегральних показників якості.

Головним завданням було кількісне визначення інтегральних показників якості, які базуються на законах термодинаміки, теплопередачі та автоматичного регулювання.

Для його рішення були поставлені наступні дополіжні задічі:

- визначення термічного ККД цикла дизеля з ГТН;
- аналіз термодинамічних процесів у ємностях великого об'єму;
- оптимізація ПІД - регуляторів температури.

Під час рішення задач аналітичними та чисельними методами були отримані наступні результати:

- методику аналітичного представлення термічного ККД у безрозмірній формі;

- методику визначення зміни тиску у великому об'ємі;
- методику оптимізації ПІД - регулятора.

Науковим резальтатом стала методика розрахунку інтегрального показника якості перехідних процесів у СО суднового дизеля.

ВИСНОВКИ

1. Актуальність підвищення економічності роботи суднових дизелів пов'язана з застосуванням палив низької калорійності.
2. Наукове значення дослідження визначається у розробці методик оптимізації конструктивних особливостей багатоконтурної СО.

Практична цінність дослідження - розрахункові моделі та методики оптимізації.

Наукове положення дослідження полягає у тому, що необхідними умовами оптимізації роботи СО є підтримка теплового балансу у контурах при статичних навантаженнях, а достатніми - мінімум незворотніх теплових витрат.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кіріс А. В. Визначнння термодинамічного ККД цикла дизеля,працюючого з газотурбінним наддувом // Суднові енергетичні установки:наук.- техн. збірник, Вип. 23.- Одеса, ОНМА, 2009. - С.48- 52.

2.Система водяного охолодження [pfri.uniri.hr].

УДК 629.5: 681.5

Баловнєв А.І., Нікольский В.В.

Підвищення надійності роботи двопаливної дизельної енергетичної установки танкера – газовоза

Для збільшення середнього ефективного тиску в циліндрі в сучасних двопаливних ДВЗ W6L34DF використовують турбонагнітач, який завдяки подачі повітря наддуву в циліндри, підвищує ефективність роботи ДВЗ. Принцип його роботи полягає у використанні вихлопних газів головного двигуна для обертання турбіни, з якою з'єднаний компресор, що стискає повітря та подає його в камеру згоряння за допомогою соплового кільця (рис. 1), яке виконує функцію перетворення потенційної енергії вихлопних газів у кінетичну, забезпечуючи обертання лопаток турбіни. Оскільки соплове кільце безпосередньо піддається дії високих температур і тиску, теплові навантаження можуть концентруватися в окремих зонах A, B, C, D (рис.1), що потенційно призводить до теплової деформації та втомного пошкодження матеріалу [1]. В наслідок цих процесів відбувається пошкодження будь-якого з цих елементів, що може негативно вплинути на роботу турбонагнітача, спричиняючи недостатнє постачання повітря наддуву до головного двигуна.

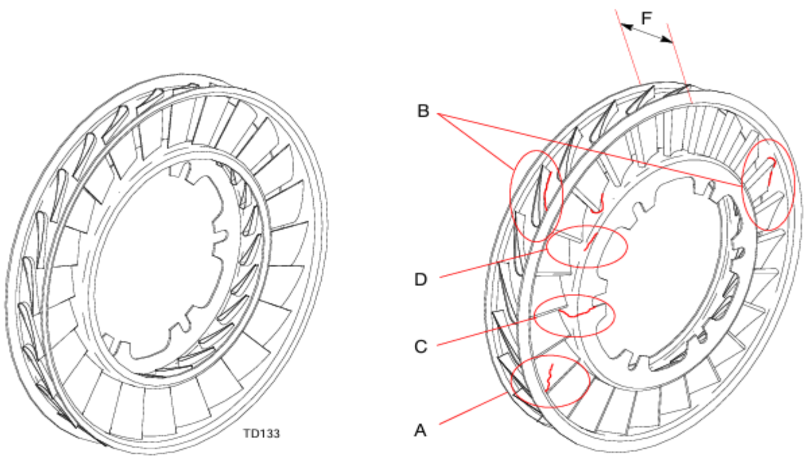


Рис. 1. Типові дефекти соплового кільця двигуна W6L34DF

В таблиці 1 надано розшифровку дефектів в системі турбонагнітача.

Таблиця 1 – Критерії прийнятності форсунок

№ п/п	Дефекти
A	Максимальна довжина тріщини 20 мм - 1 на кожну лопатку
B	Загальна довжина 32 мм
C	Радіальні тріщини - не більше 6 наскрізних, і жодної поруч
D	Кільцеві тріщини – забракувати, якщо безперервно від лопатки до лопатки

Метою цього дослідження є дослідження процесів деградації соплового кільця – одного з ключових елементів турбонагнітача.

Термін служби сопел, обмежений тепловою втомою, безпосередньо залежить від напружень і деформацій, спричинених тепловими градієнтами, що виникають унаслідок потоку газів згоряння, а також циркуляції повітря у внутрішній системі охолодження [2].

Нами проведене дослідження втоми соплового кільця з метою запобігання внутрішнім пошкодженням і подовження строку служби цього компоненту. На рис. 2 наведено створену три-вимірну модель соплового кільця в Autocad.

Рис.2. Три-вимірна модель соплового кільця

Для дослідження створеної моделі залучено програмне середовище Sim-Scale, яке дозволяє провести моделювання динаміки розподілу навантаження і втоми матеріалу при різних потоках рідини при різних граничних умовах. За результатами чисельного моделювання показали наявність локальних концентрацій навантажень у зоні соплового кільця, які безпосередньо впливають на його експлуатаційну надійність та ефективність роботи дизельного двигуна. Отже, доцільним є проведення подальшої модернізації конструкції соплового кільця з метою підвищення загальної надійності та довговічності двопаливного ДВЗ W6L34DF.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Woo-Seok and Il-Cho Jeon - Fatigue Analysis and Solid Particle Erosion Behavior of Nozzle Ring for Marine Turbocharger – URL: https://www.mdpi.com/3376074.

2. Z. Mazur , E.B. Pérez-Hernández, R. Garcia-Illescas - Gas Turbine Nozzle Life Assesment Due To Thermal Fatigue – URL: https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings-abstract/GT2011/54655/2045/352870.

УДК 629.12+621.69

Вожжов О. О., Козьміних М.А.
Національний університет «Одеська морська академія»

Порівняльний аналіз систем скраплення пари вантажу суден LPG.

У наш час рівень автоматизації суднових холодильних установок вторинного скраплення пари вантажу газовозів значно збільшився, завдяки чому, створюються повністю автоматизовані системи управління і що дозволяє поступово відмовитись від постійної вахтової служби.

Впровадження сучасних засобів автоматизації дозволило підвищити загальну ефективність і надійність експлуатації холодильної установки шляхом оптимізації режимів її роботи, організації контролю технічного стану устаткування.

Впроваджуються нові, прогресивніші типи холодильних установок з поліпшеною конструкцією механізмів і устаткування, що дає суднової холодильної техніці безперервно удосконалюватись.

На 2021 рік приходяться дуже багато санкцій, шо до забруднення навколишнього середовища і руйнування озонового шару землі викидами NOx та Sox, які виникають при згоранні мазуту. При згоранні газу, в атмосферу Землі викидається набагато менше забруднюючих речовин, що може зробити його альтернативним пальним для суднових двигунів.

Як відомо, газ є економічним резервом майже кожної держави. Таких великих експортерів газу як: США, Росія, Близький схід – відокремлює від імпортерів великі дистанції, моря та океани. Тому, починаючи з другої половини XX-го століття, безперервно розвивається морське перевезення скрапленого газу. Нині в міжнародній торгівлі більше 75 % скрапленого газу транспортується по трубопроводах, а решта дуже значної кількості перевозиться морським шляхом на великі відстані за допомогою газовозів .

Метою роботи є вибір оптимальних конструкційних і експлуатаційних характеристик для зниження енерговитрат.

Об'єктом дослідження в даній статті є процеси вторинного скраплення газу у каскадних установках та двоступеневе стиснення нафтових газів компресором.

Установки вторинного зрідження, що працюють за комбінованою або каскадної схемою скраплення, найбільш складні і дорогі. Каскадна схема реконденсації газу складається з нижньої гілки каскаду, в якій здійснюється повний цикл низького тиску (стиснення випарувавшого у вантажному танку газу компресором, його конденсація в конденсаторі і дроселювання у вантажний танк), і верхньої гілки каскаду, в якій також здійснюється повний замкнутий цикл високого тиску. При цьому конденсатор нижньої гілки каскаду є випарником верхньої гілки каскаду. Найпростіша схема каскадної установки вторинного зрідження газів представлена на рис. 1

У нижній гілці каскаду випарований у вантажному танку 4 газ засмоктується компресором 5, стискається в ньому і подається в конденсатор-випарник 6. Тут він конденсується, віддаючи тепло холодильному агенту верхньої гілки каскаду. Далі сконденсований газ через регулюючий вентиль 10 до тиску перевезення і повертається назад в вантажний танк 4.

У верхній гілці каскаду рідкий холодильний агент з відділювача рідини 7 насосом 8 подається в конденсатор-випарник 6, де частково випаровується, і надходить назад у віддільник рідини 7. У ньому відбувається поділ фаз і виділившийся пар холодильного агента відсмоктується компресором 1,

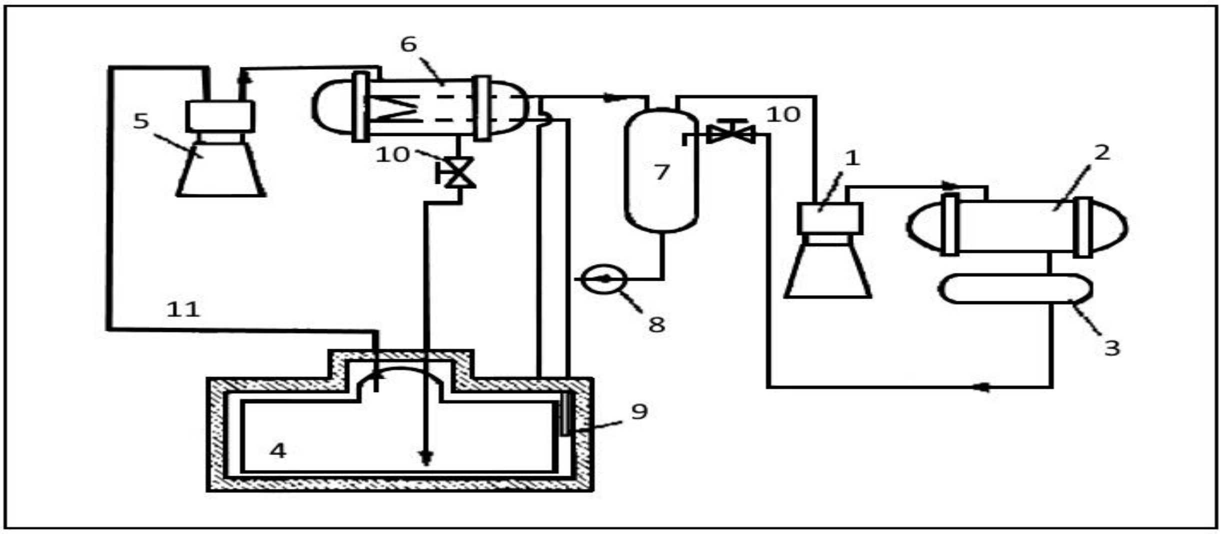


Рис. 1 Схема каскадної установки конденсації газів при ізотермічному способі перевезення: 1 - компресор верхньої гілки каскаду; 2 - конденсатор; 3 - ресивер; 4 - вантажний танк; 5 - компресор нижньої гілки каскаду;

6 - конденсатор-випарник; 7 - відділювач рідини; 8 - насос; 9 - охолоджувач інертного газу; 10 регулюючий вентиль.

На рис. 1 показана конструкція вкладної вантажної цистерни, де між цистерною і ізоляцією циркулює інертний газ (зазвичай азот), який охолоджується спеціальним змійовиком, зв'язаним з конденсатором-випарником.

При ізотермічному перевезенні етану і етилену (температура конденсації відповідно -88,5 ... -104°C) у каскадній установці використаються двоступеневі компресори. Наприклад, на експериментальному багатоцільовому газовозі «Pythagore» каскадна схема включає двоступеневий закритий пропановий цикл і двоступеневий відкритий етиленовий цикл.

Основний же потік конденсату проходить всередині змійовика проміжного охолоджувача, сильно при цьому переохолоджуючи (6-7). І наприкінці, дросселіруючись в регулюючому клапані РВ2, парожидкістна суміш скидається в танк.

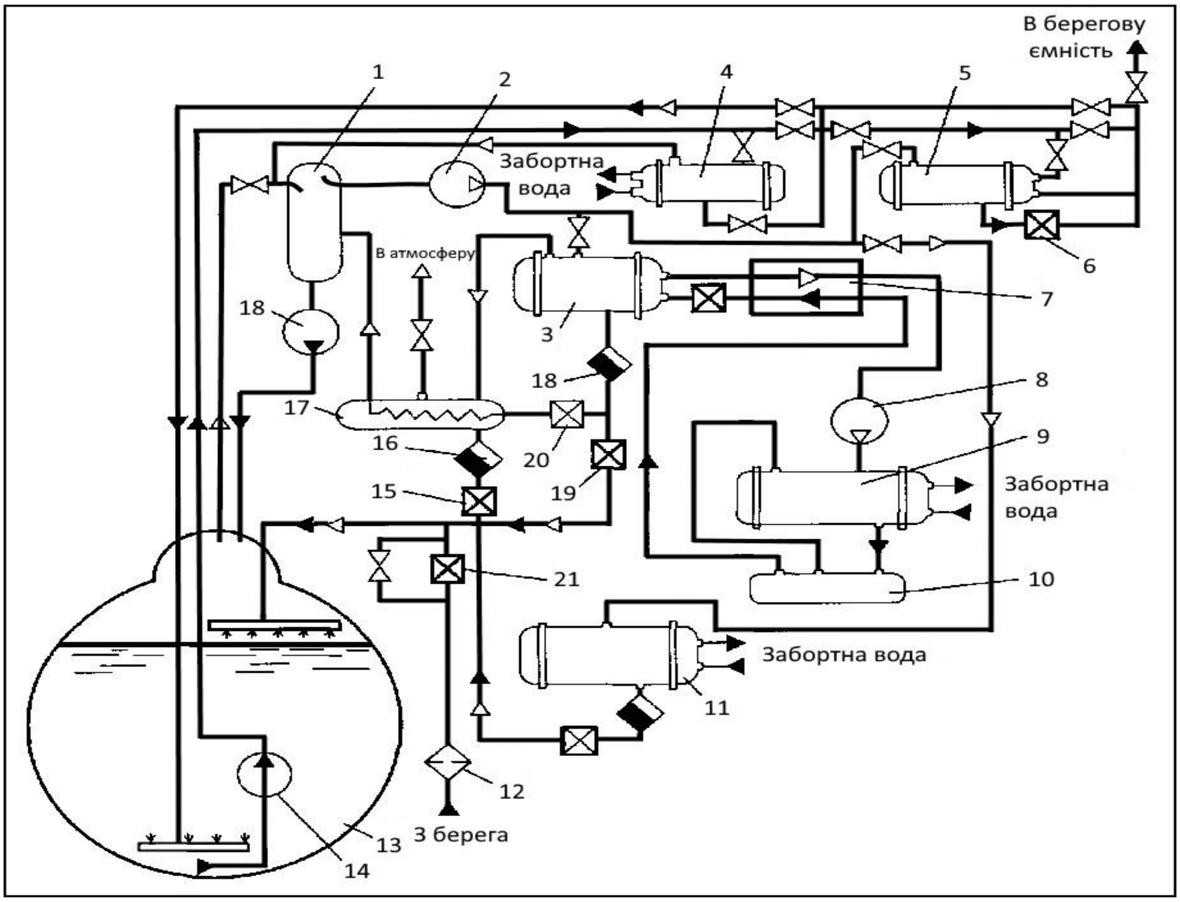


Рис. 2 Схема каскадної установки вторинного зрідження нафтових газів: 1 - відділювач рідини; 2 - газовий компресор нижнього каскаду; 3 - конденсатор-випарник; 4 - газовий випарник; 5 - конденсатор-випарник; 6 - дросельний клапан; 7 - регенеративний теплообмінник; 8- фреоновий компресор; 9- фреоновий конденсатор; 10 ресівер; 11 - конденсатор вантажу; 12- фільтр-грязевик; 13 - вантажний танк; 14- вантажний насос; 15 - дросельний клапан; 16 - конденсатовідвідник; 17-відділювач неконденсуючих або трудноконденцуючих газів; 18- конденсатовідвідник; 19, 20, 21 - дросельні клапани.

На рис. 2 зображена практично повна схема каскадної установки вторинного зрідження нафтових газів, що застосовується на газовозах великої вантажомісткості. Установка легко пристосовується до різноманітних експлуатаційних умов. Наприклад, при перевезенні бутану, для якого не потрібна висока ступінь стиснення, можна відключити верхній каскад і працювати за прямим методом зрідження. Для цього в схемі передбачено конденсатор вантажу 11. У цьому випадку утворений у вантажному танку пар всмоктується через віддільник рідини 1 газовим компресором 2, стискається в ньому і подається у вантажний конденсатор 11. Тут пар конденсується, віддаючи тепло забортної води, дроселюється в дросельному клапані до тиску перевезення і прямує назад у вантажній танк 13.

Двоступеневе стиснення

Режим роботи УВСГ в значній мірі залежить від температури забортної води, що охолоджує конденсатор, температури транспортування вантажу, а також від роду самого вантажу. Так, наприклад, підвищення температури забортної води викликає зростання температури конденсації вантажу, а з нею - підвищення тиску конденсації і тиску нагнітання компресора. І навпаки, зниження температури транспортування вантажу, зменшує тиск на всмоктуванні компресора. У всіх випадках зростання перепаду тисків на поршень компресора негативно позначається як на його роботі, так і на роботі компресорної установки в цілому. При знаходженні поршня компресора у верхній мертвій точці, в обсязі, утвореним дном поршня і нижньою поверхнею кришки циліндра (мертвому просторі), залишаються стислі пари, які розширюються при зворотному ході поршня і займають частину корисного об'єму циліндра. Чим вище тиск в кінці стиснення, тим більша кількість парів залишається в мертвому просторі, і тим більший корисний об'єм циліндра вони займають при розширенні, зменшуючи тим самим дійсну подачу компресора. зниження тиску всмоктування, також зменшує корисний об'єм циліндра компресора, оскільки для всмоктування пари потрібне більше розширення пара і, отже, більша частина корисного обсягу циліндра.

Всі фірми, виробники компресорів, дають граничні значення різниці тиску нагнітання і всмоктування для кожного компресора Так, фірма Зульцер, для своїх поршневих компресорів, які використовуються в установках вторинного зрідження, дає граничне значення різниці тисків всмоктування і нагнітання в 6,5 бар, перевищення цього параметра призводить до значного зростання об'ємних втрат і різкого зниження подачі компресора.

У двоступеневої УВСГ пари вантажу перегріваючись у верхній частині танка, проходять через віддільника рідини ВР на всмоктування 1-го ступеня компресора (рис. 3). На діаграмі Рамзіна цей процес відобразиться лінією (1-2) (рис. 4).

У першому місці пари стискаються до деякого проміжного тиску Рп (2-3) і направляються для охолодження в проміжний охолоджувач (ПО). Проходячи через шар киплячій рідини, гарячі пари повністю охолоджуються до стану насичення (3-4), після чого всмоктуються 2-й щаблем компресора. У другому рівні компресора відбувається остаточне стиснення парів до кінцевого значення тиску конденсації рк (4-5). Стислі гарячі пари вантажу охолоджуються забортної водою в конденсаторі КД до температури конденсації і потім конденсуються при постійному тиску (5-6). Теплий рідкий вантаж у проміжному охолоджувачі ПО ділиться на 2 потоки: невелика частина загального потоку, дроселіруючись в регулювальному клапані РВ1 (6-А), до проміжного тиску Рп, направляється в проміжний охолоджувач для підтримки в ньому необхідного рівня рідини.

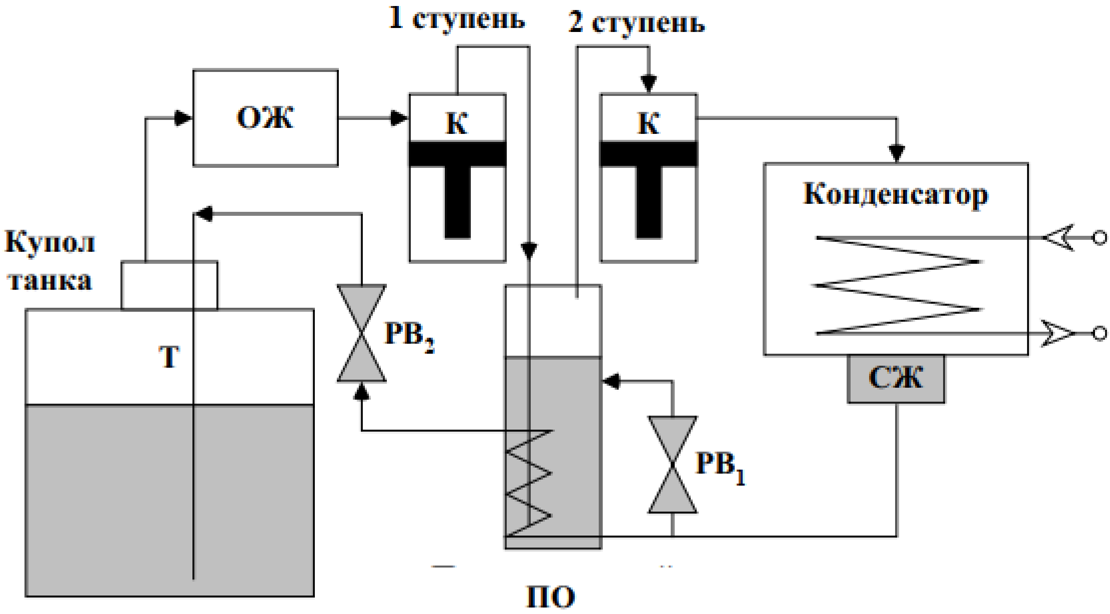


Рис. 3 Двоступенева УВСГ із ПО

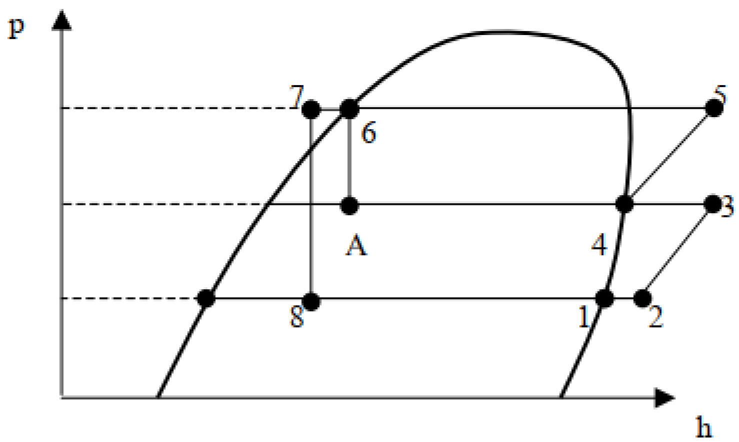


Рис. 4 Цикл двоступеневої УВСГ з ПО

Виконавши аналіз двоступеневої схеми ми можемо зробити висновки про те, що розглянута схема э набагато ефективніша ніж одноступенева. На суднах газовозах при застосуванні розглянутих схем найбільш розповсюдженими залишаються компресори поршньового типу. Основною перевагою є їх помітна дешевизна у порівнянні з компресорами інших типів, відносна простота виробництва, висока ремонтопридатність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Баскаков С.П., Курс лекций по программе Специализированная подготовка персонала газовозов, Санкт-Петербург, 2000, 269 с.

2. Козьминых Н.А., Занько О.Н., Голиков В.А,. Писклов В.Т., Холодильные установки газовозов и их эксплуатация,М. :В/О Мортехинформреклама, 1988.-32 с.

3. Козьміних М.А., Дулдієр О.П., Чепаліс І.В., Системи скраплення газу та вантажні системи суден-газовозів, Одеса: НУ «ОМА»,2018. – 68 с.

УДК 629.123:681

Данілов К. С., Голіков В. А.
Національний університет «Одеська морська академія»

Підвищення ефективності роботи енергетичної установки контейнеров ОЗА

Актуальність теми дослідження полягає у системному підході до комбінування експлуатаційних заходів,застосування енергозберігаючих технологій та модернізації обладнання.

Експлуатаційні заходи не вимагають значних капітальних вкладень і можуть бути запроваджені негайно:оптимізація швидкості судна (Slow Steaming), яка значно, майже на 30%, знижує витрату палива; планування маршрутів, технічне обслуговування та моніторинг стану суднової енергетичної установки (СЕУ), покриття корпусу антиобрастаючими красками.

Тому режим потужності СЕУ визначає економічні показники судна і дозволяє нормувати витрати на паливо,яке споживається.

Аналіз відомих суднових технологічних схем показав,що до цього часу відсутнє універсальне технічне рішення проблеми очистки димових газів та утилізації їх тепла.

Згідно вимогам нормативних документів концентрація шкідливих домішок при викиді димових газів у навколишнє середовище визначається до кожної компоненти індивідуально. Найбільш токсичними компонентами являються оксиди азота і їх концентрація, яка залежить від конструкції дизеля,що використовується.

Припустимі межі вибросів для основних компонент димових газів при роботі суднових дизелів наступні

- NO_2 малообертовий дизель -20 г/кВт×годину, а SO_2 - 12 г/кВт×год.;
- NO_2 середньообертовий дизель -10 г/кВт×год., СО - 0,6 г/кВт×год.;
- NO -75 г/кВт×год., СН - 0,4 г/кВт× год.;
- O_2 - 12,3 г/кВт× год.,сажа - 0,05 г/кВт×год.;
- CO_2 - 5,6 г/ кВт×год., пара H_2O - 6 г/кВт×год.;
- інертні гази - 0,9 г/кВт×год. [1-3].

Аналогічні проблеми виникають від забруднення з суден при очищенні нафтовміщувальних вод до концентрацій у (1- 15)×10*(-6) млн. механічних часток і нижче згідно вимог конвенції MARPOL 72/78 та відповідних стандартів України [4- 5].

Судновими документами,які підтверджують виконання технічних вимог до вищеназваних,являються:

- Міжнародне свідоцтво попередження забруднення моря нафтою;
- Міжнародне свідоцтво про попередження забруднення моря шкідливими рідинними речовинами,які перевозяться наливом;

Міжнародне свідоцтво про забруднення сточними водами;

- Міжнародне свідоцтво про попередження забруднення моря сміттям.

Узагальнюючі актуальні питання роботи контейнеровоза на міжнародних лініях,була звернута увага на спостереження та управління суднами цього типу в рейсах протягом майже 15 - ть років.

Метою дослідження стало забезпечення міжнародних еколого-енергетичних вимог до ефективності експлуатації контейнеровозів.

Для складання прогнозу і планування дослідження була розроблена відповідна технологічна карта (рис.1) [6].

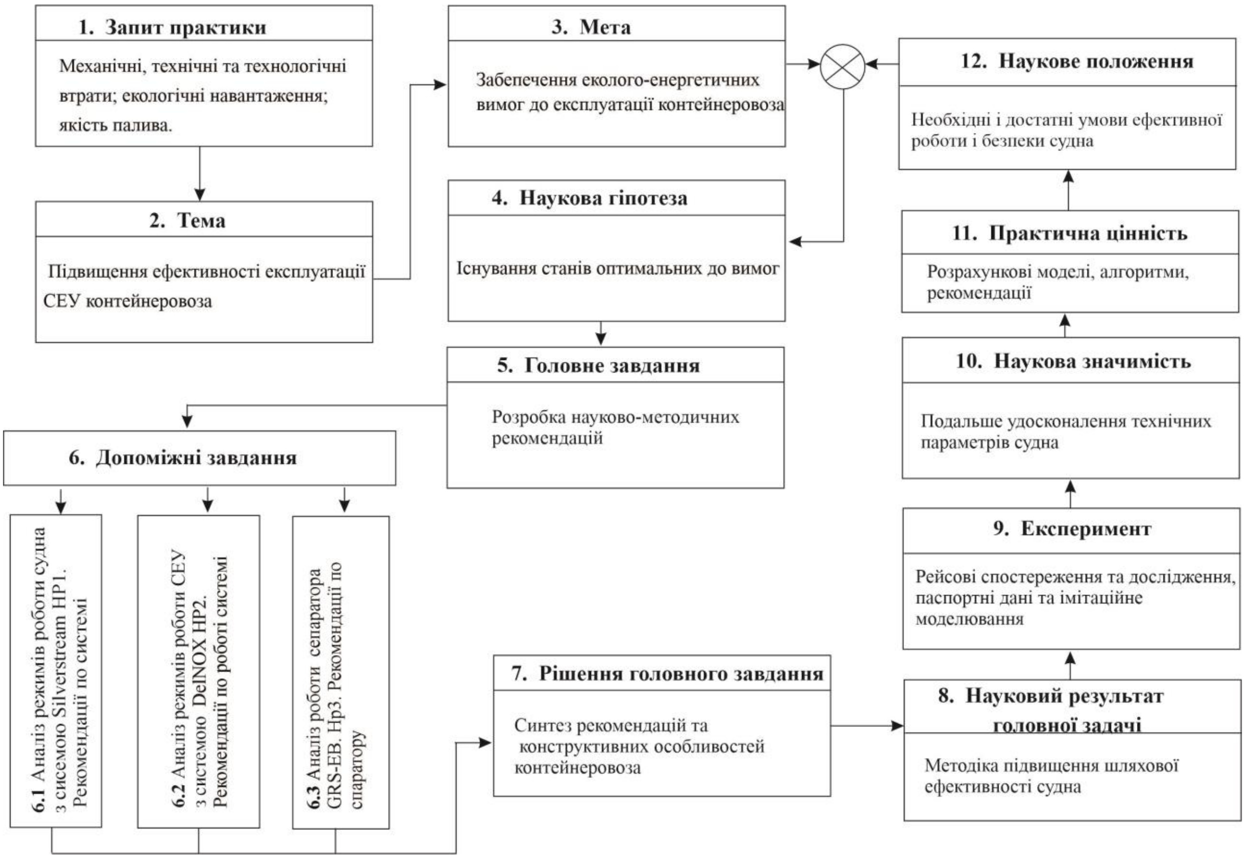


Рисунок 1. Технологічна карта дослідження

Для досягнення мети була висунута гіпотеза про існування конструктивних можливостей і регулюючих впливів на гідропропульсивний комплекс судна,що забезпечують, хоча і не значне,але суттєве скорочення експлуатаційних витрат на переходах.

Головним завданням роботи стала розробка науково- методичних рекомендацій по оптимізації швидкості руху судна на лінійних ділянках відкритого моря.

Для вирішення головного завдання треба було вирішити три допоміжні задачі:

- аналіз результатів спостережень за ходовими характеристиками судна при роботі системи повітряного змащення днища судна;

- аналіз роботи системи очищення димових газів головного малообертового двигуна;

- аналіз тривалої роботи сепаратора нафтоводяної суміші типу GRS 100EB.

Рішення першої допоміжної задачі здійснено в рейсах експериментальним методом у різних погодних умовах.

Науковим результатом рішення першої допоміжної задачі стало кількісне визначення ефективності в'язкого опору тертя: економія палива завантаженим судном склала 3,8 %, а потужність близько 13% без урахування енергії, споживаної компресорами.

Рішення другої допоміжної задачі за послідовністю аналогічне першій. Різницю складали об’єкт і предмет дослідження, які пов'язані з роботою системи очищення димових газів головного двигуна судна.

Під час рішення цієї задачі застосований системний підхід, виявлені недоліки в роботі системи пов'язані з надійністю роботи датчиків NOX, роботою головного двигуна та якості робочих речовин, які задіяні у процесах очищення.

Науковим результатом рішення другої допоміжної задачі стали рекомендації по покращенню ефективності роботи системи очищення DelNOX направлені на регулярне технічне обслуговування, забезпечення належних умов експлуатації та використання високоякісних витратних матеріалів.

Рішення третьої допоміжної задачі пов'язане з очищенням нафтовміщувальних вод з судна.

Вивчались конструкційні та технико-технологічні особливості роботи сепаратора GRS-50 EB/100 EB продуктивністю 5,0/10,0 м^3/год.

Відмічаються наступні переваги в його роботі: високий ефект очищення (нижче 15 ppm); відповідність стандартам IMO, зокрема резолюції MEPC 107/49; багатоступенева система сепарації та широкий діапазон продуктивності.

Недоліки в роботі сепаратора: чутливість до емульгованих олій ти домішок; засмічення фільтрів та коалесцерів; потреба у регулярному обслуговуванні; проблеми з автоматикою, особливо датчиками; витоки у арматурі; обмеження по умовам експлуатації, зокрема, насосів, а також проблеми з калібровкою датчиків.

Науковим результатом рішення третьої допоміжної роботи стали рекомендації по удосконаленню роботи сепараторів.

Рішення головного завдання здійснено в умовах експлуатації на контейнеровозах для перевезення 13500 TEU і більше типу Пост-Пана-Макс. Предметом дослідження стали параметри руху: коефіцієнти корисної дії (ККД) та ефективності роботи судна.

Під час досліджень застосовані графічні, аналітичні та табличні способи отримання ходових характеристик руху судна.

Робоча гіпотеза дослідження полягала у встановлені достовірності між даними експерименту: обробкою, передачею та їх сприяттю, що забезпечує відсутність похибок в процесі верифікації.

Виявлено, що експлуатаційна швидкісна константа судна була визначена на рівні 0,3 вузли, що перевищує паспортне значення на 3,2%. Коефіцієнт вантажної ефективності коливався від 0,6 до 0,67 відн. одиниць, що відповідає варіації від 0,4 до 9,0 %.

Співвідношення між швидкістю судна та обертами машини коливалось від 0,75 до 0,99 відн. один. з допустимим розкидом до 20%. Середня географічна(шляхова) ефективність склала 65%, навігаційна - 67%, а пропульсивна - 61%.

Науковим результатом рішення головного завдання полягає у тому, що ефективність роботи контейнеровозу багатопараметричні і залежить від складності берегової лінії, умов навколишнього середовища, інтенсивності обсервації шляху судна та гідродинамічних характеристик пропульсивного комплексу, які дозволяють оптимізувати роботу і безпеку.

Наукова новизна дослідження полягає у подальшому удосконаленні технічних параметрів судна для розробки стратегій експлуатації та планування морських перевезень з метою досягнення оптимальної ефективності і безпеки.

Практична цінність дослідження полягає у використанні розрахункових моделей, алгоритмів та рекомендацій по оптимізації роботи судна.

Наукове положення дослідження полягає у тому, що необхідними умовами підвищення ефективності експлуатації контейнеровозу є регулюючий плив на характеристики пропульсивного комплексу, а достатніми - безпека судноплавства.

ВИСНОВКИ

1. Ефективність роботи контейнеровоза залежить від різних факторів.

2. Важливим аспектом оптимального маршруту є інтенсивна обсервація шляху судна з використуванням е- навігації. Технологічні розробки в цій галузі дозволяють забезпечити точність контролю за маршрутом судна майже без похибок (в діапазоні від 1,0 до 5,0%).

3. Гідродинамічні характеристики пропульсивного комплексу забезпечують практично 100% ефективність роботи судна, забезпечуючи необхідну тягу та маневреність.

4. Розробка загальнодоступної методики проведення виробничих іспитів дозволяє проводити комплексну перевірку технічних характеристик суден, щодо оптимізації руху і безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Голіков В. А. Енергетична ефективність суднових дизельних установок/ В. А. Голіков., М. В. Голубев // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. збірник, Вип. 12. - Одеса: ОНМА, 2005 - С. 66-75.

2. Internatonal convention MARPOL 73/78.

3. Міжнародна конвенція ОПКР-90.

4. Кодама Y., Какутава А., Такахаші Т., Кавашіма Н. Експериментальне дослідження мікробульбашок та їх застосування для зниження опору шкіркового тертя на суднах // Heat Flued Flow: Iternational J., том 21.

5. Кодама Y. та інші. Повномасштабний експеримент з повітряного змащення з використанням великого цементного вантажовоза для енергозбереження (результати та аналіз) / Матер. конф. японського товариства морських архітекторів та океанічних архітекторів, том 6 (2005).- с.169 - 166. (укр. переклад).

6. Голіков В. А., Козьміних М. А., Онищенко О. А. Методологія наукових досліджень. - Одеса: ОНМА, 2014. - 163 с.

УДК 629.5.03:621.575.3:662.767

Дерев`яний С.С., Шестопалов К. О.
Національний університет «Одеська морська академія»

Аналіз впливу зовнішніх умовна на ефективність роботи азотного контуру установки реконденсації відпарного газу на LNG-танкерах

Метою роботи був аналіз впливу температури забортної води на енергоефективність азотного контуру реконденсації природного газу на LNG-газовозі.

Основною метою суднової системи реконденсації є забезпечення контролю тиску в вантажних танках шляхом зрідження всього газу, що випарився (boil-off-газу - BOG) з вантажних танків під час нормальної експлуатації судна, тим самим захищаючи вантажні танки від надмірного підвищення тиску.

Пари природного газу із вантажних танків збираються у колекторі, стискаються у **двоступеневому відцентровому компресорі BOG**, охолоджуються та конденсуються у **багатопотоковому теплообміннику**. Конденсація відпарного нафтового газу відбувається холодним азотом. Для отримання холодного азоту окремо реалізується зворотній термодинамічний криогенний газовий цикл (цикл Брайтона) в окремому азотному контурі. Саме у цьому контурі виробляється необхідний холод для конденсації відпарного нафтового газу.

Схема технологічного процесу традиційної системи повторного зрідження LNG на борту судна показана на рисунку 1 [1].

При аналізі були виконані розрахунки питомого енергоспоживання на виробництво одиниці холоду (холодильного коефіцієнту, COP) азотного контуру системи, який забезпечує виробництво холоду, необхідного для конденсації відпарного газу. Усі вхідні дані прийняти відповідно [1]. Тиск азоту на вході в компресор був прийнятий 13,3 бар(абс.), на виході третьої ступені стиснення - 56,8 бар(абс.). Після кожної ступені стиснення газ охолоджувався прісною водою, температура якої залежить від температури забортної води та, як наслідок, впливає COP циклу. Властивості LNG (розглядався чистий метан) оцінювалися за допомогою програми RefProp [2]. Вважалося, що максимальна температура забортної води становить 32 °С, що є найвищою температурою за кодексом IMO, мінімальна температура прийнята рівною 8 °С (північні моря → тропіки). Тип компресорі азотного контуру приймався відцентровий, ККД - 75%. Розширення стисненого азоту відбувалося у детандері, ККД якого прийнято 0,8.

Результати розрахунку залежності COP азотного контуру системи реконденсації природного газу від температури забортної води, що непрямо охолоджує стиснений азот, у діапазоні $t_{зв}$=8…32 °С наведені на рисунку 2.

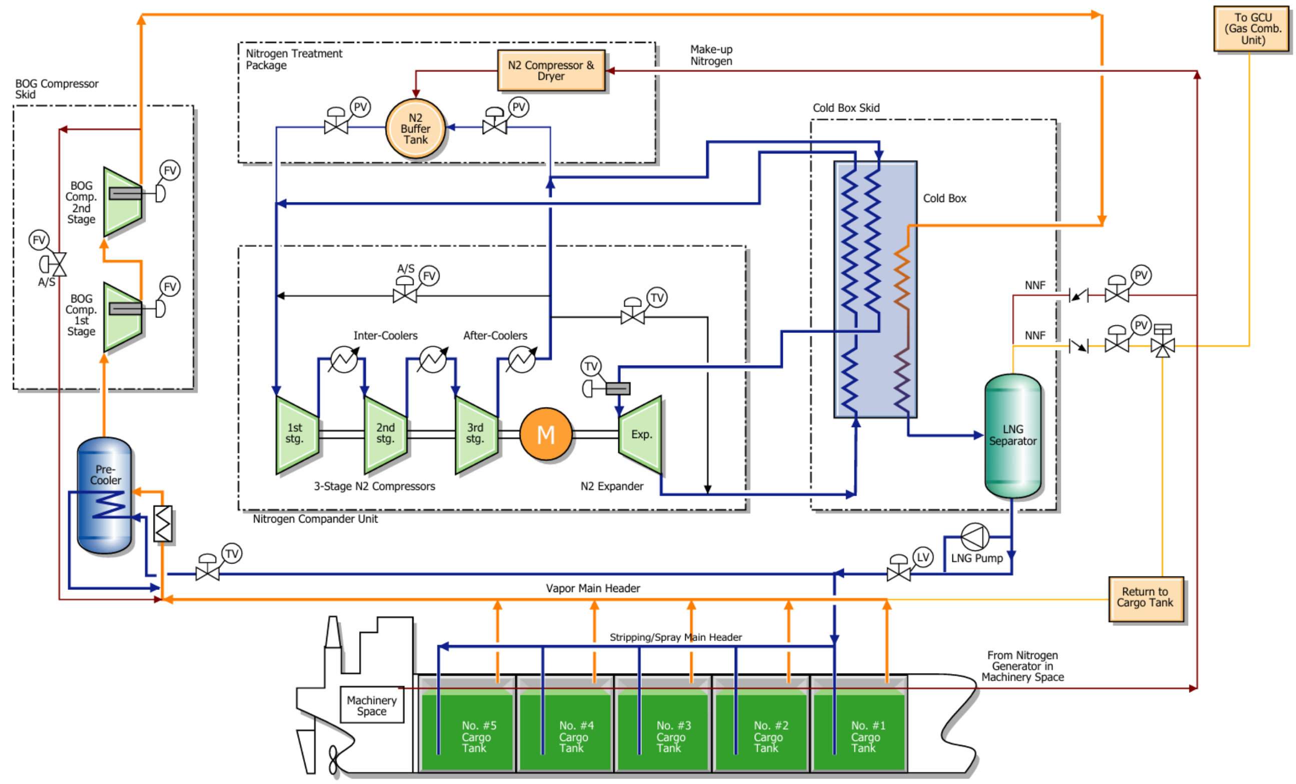


Рисунок 1.1 Схематичне зображення суднової системи реконденсації природного газу

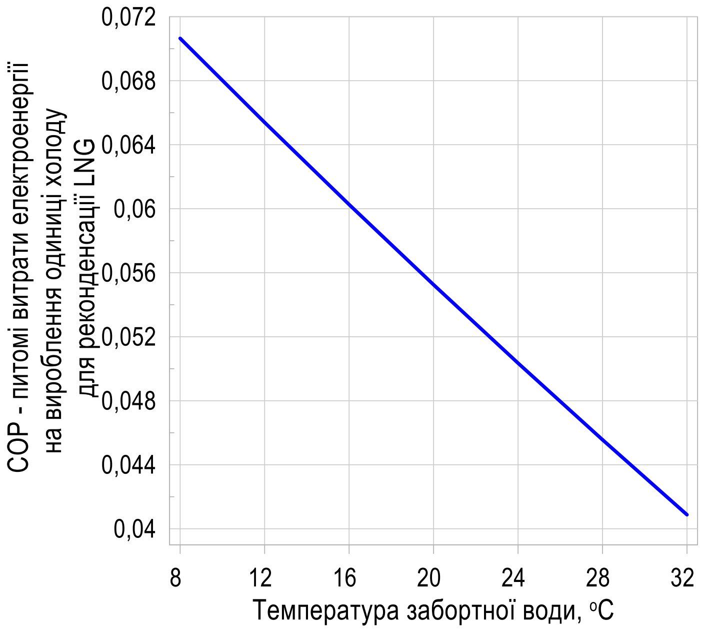


Рисунок 2. Залежність COP азотного контуру системи реконденсації природного газу від температури забортної води

COP визначає термодинамічну ефективність виробництва холоду для конденсації BOG і є одним з ключових показників роботи азотного контуру. На графіку спостерігається монотонне зменшення COP із підвищенням температури забортної води. Це означає, що підвищення температури навколишнього середовища погіршує енергетичну ефективність криогенного циклу. Підвищення температури забортної води сприяє підвищенню температури азоту після його охолодження на виході з компресорів (три ступені стиснення → охолодження), це веде до збільшення температури азоту на вході в детандер. Таким чином зменшується ефективний перепад температур у циклі Брайтона. Що сприяє меншому виробленню холоду при тому ж механічному навантаженні на компресорі.

Таким чином, низькі температури забортної води (8–15 °C) забезпечують найкращі умови роботи азотного циклу, оскільки відведення теплоти після стиснення у компресорах є максимально ефективним. При підвищенні температури морської води до тропічних значень (30–32 °C) циклу доводиться працювати в менш сприятливому температурному діапазоні, що неминуче погіршує його ефективність.

Отримані дані вказують на необхідність врахування сезонних і географічних варіацій температури морської води під час експлуатації LNG-танкерів, а також важливість оптимізації алгоритмів регулювання і теплової взаємодії між азотним контуром та судновими системами охолодження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cargo Operating Manual. LNG AL RUWAIS. Pentatech CO., LTD. Marine Venture Center, Korea Maritime University, Dongsam-Dong, Yeongdo-Gu, Busan, Korea. 2022.

2. Lemmon E. W., Bell I. H., Huber M. L., McLinden M. O., NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, NIST, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018.

УДК 629.12.06:628.84

Ващенко В.О., Корзунов О.О., Богач В.М.
Національний університет "Одеська морська академія"

Основи відновлення працездатності сполучень деталей ЦПГ

На стадії проектування заданий рівень безвідмовності суднових систем можна забезпечувати двома шляхами:

застосуванням високонадійних комплектуючих вузлів;

раціональним конструюванням системи (у сенсі безвідмовності) з одночасною розробкою відповідних заходів з технічного обслуговування, пов'язаних з відновленням вузлів після відмови.

Під раціональним конструюванням системи розуміють види та рівень резервування вузлів. Якщо говорити про відновлюваність вузлів, то в принципі будь-який з них може бути після відмови відновлений, але через специфіку судових умов не завжди цю можливість вдається реалізувати.

При високому ступені резервування захаращуються суднові приміщення, що заважає роботі з відновлення вузлів. Крім того, для успішного виконання цих робіт потрібна наявність запасних деталей необхідного обсягу та відповідне число каналів відновлення (ремонтні групи). Всі ці питання мають важливе значення під час аналізу безвідмовності суднових систем.

Вузли що відмовили в міру їх виходу з ладу та звільнення каналів відновлення послідовно ремонтують і залишають у резерві. Система працездатна, якщо в справному стані знаходиться хоча б один з вузлів. Ефективність резервування багато в чому залежить від тривалості відновлення резервних вузлів системи.

Зменшення середньої тривалості відновлення при дворазовому резервуванні вдвічі (з 0,4 до 0,2) призводить до збільшення напрацювання системи на відмову в 100 разів; зменшення цієї величини для дубльованої системи вчетверо (з 0,4 до 0,1) збільшує її напрацювання на відмову в 1600 разів. Отже, ремонтопридатність суднових систем має першорядне значення для підвищення їхньої безвідмовності.

Зі збільшенням кратності резервування ефект від зменшення тривалості відновлення зростає. Істотний вплив на ефективність резервування має функція надійності вузлів системи - показник обернено-пропорційний дисперсії. Зі зменшенням дисперсії, відносне напрацювання системи на відмову помітно збільшується.

Вузли суднових систем, технологія виготовлення яких відпрацьована при грамотній експлуатації, відмовляють в основному через механічне зношування або старіння. Разом з тим, як показує досвід експлуатації суднових систем, потік відмов їх вузлів являє собою процес, близький до пуассонівського, і, отже, час між їхніми відмовими розподілено експоненційно.

В такому випадку ефект резервування може проявитися тільки при великій кратності, а дублювання тут не дає ніякого ефекту. Вплив числа каналів відновлення на безвідмовність системи, загалом, невеликий.

Таким чином, резервування з відновленням (протягом рейсу) дозволяє значно підвищити безвідмовність суднових систем. Ефективність резервування залежить від його кратності, тривалості відновлення та дисперсії тривалості безвідмовної роботи вузлів. З зменшенням часу відновлення та дисперсії розподілу ефект резервування помітно підвищується.

У разі експоненційної функції надійності вузлів відносно висока безвідмовність системи може бути забезпечена лише за високої кратності їх резервування. Останнє, як правило, не тільки не виправдано економічно, але нерідко не може бути виконано технічно (в судових умовах). Дійсно, говорити про восьми-, десяти-і т. д. кратне резервування вузлів нереально.

Отже, для високої безвідмовності суднових систем оптимальним рішенням необхідно визнати резервування вузлів, ступінь якого - за наявності відновлення - не вище за дублювання. Таким чином, дублювання суднової системи надає відносно невеликий вплив на збільшення коефіцієнта її технічного використання.

За певних умов дублювання може помітно збільшити ресурс системи, проте питання про те, чи виконувати систему з дублюванням або без нього слід вирішувати виходячи з витрат на створення та експлуатацію того чи іншого варіанту системи.

З доступних проектанту способів підвищення надійності (не тільки безвідмовності, але довговічності та ремонтопридатності) суднової системи один із важливих – розробка оптимальної стратегії її технічного обслуговування (ТО). Така розробка починається з вирішення питання, чи потрібне технічне обслуговування.

Під технічним обслуговуванням розуміється комплекс заходів, вкладених як у запобігання відмов (зазвичай поступових), і на відновлення устаткування після раптових відмов; в останньому випадку технічне обслуговування - це, по суті, ремонт.

Періоди між ТО суднової системи встановлюються або у відповідності з будь-якою програмою (наприклад, календарно або по напрацюванню), або випадково (при проведенні технічного обслуговування за даними діагностичних засобів випадковим є лише час досягнення граничного стану різними вузлами системи, а призначення моменту ТО - цілком регламентований акт).

Завданням діагностики з метою визначення періодичності технічного обслуговування та ремонтів системи за її фактичним станом, а не за заданою програмою є прогнозування технічного стану вузлів за значенням їх характеристик і параметрів, що фіксується. Це дозволяє передбачити момент настання граничного стану у вузлах суднових систем на основі аналізу апріорі процесів втрати їх працездатності.

Тому при плануванні технічного обслуговування за даними засобів діагностики повинні бути враховані фактори як статистичного, так і детермінованого характеру.

На підставі наведеного аналізу принципи конструювання та екс-плуатації суднових систем з точки зору забезпечення заданого рівня надійності можна сформулювати так:

1. Підвищення безвідмовності системи досягається двома шляхами: підвищенням безвідмовності вузлів і конструюванням безвідмовних систем, що складаються з таких вузлів, з одночасною розробкою ефективних методів технічного обслуговування;
2. Технологічність ТО (відновлення після відмови) вузлів має першорядний вплив на підвищення безвідмовності системи в цілому, оскільки зменшення середньовідносної тривалості відновлення вузлів всього в 2...3 рази призводить до збільшення напрацювання системи на відмову на 2...3 порядки;
3. Ефект резервування істотно залежить від функцій надійності вузлів і підсистем, що резервуються. Якщо для вузлів характерна функція надійності у вигляді нормального закону з відносно малою дисперсією (основні причини відмов - зношування та старіння), то висока безвідмовність системи досягається дублюванням цих вузлів; навпаки, якщо функція надійності - експонента (залежність з великою дисперсією), помітне підвищення безвідмовності системи може бути досягнуто тільки при великій кратності резервування (8-ми, 16-ти і т. д. кратне резервування), а дублювання не дає відчутного ефекту;
4. Безвідмовність дубльованої системи з двома каналами відновлення вище безвідмовності такої з одним каналом лише за малої дисперсії функцій надійності вузлів. У разі експонентної функції надійності вузлів ефекту від застосування другого каналу практично немає;
5. Якщо функцією надійності вузлів системи є експоненційний закон, їх технічне обслуговування (регламентовані роботи) протягом рейсу проводити недоцільно через скорочення часу експлуатації системи. Якщо ці функції близькі до нормального розподілу, технічне обслуговування має сенс проводити тільки в тому випадку, коли його тривалість менше половини суми тривалості відновлення (після відмови) всіх вузлів системи. У зв'язку з тим, що функцією надійності більшості суднових вузлів є експоненційний закон, проводити ТО суднової системи протягом рейсу недоцільно.

УДК 629.5.064:621.436

Каліновський Р. О., Довиденко Ю. М.
Національний університет «Одеська морська академія»

Підвищення ефективності використання палива в суднових дизелях шляхом його гомогенізації

Сучасні суднові енергетичні установки працюють у складних умовах змінного навантаження, широкого діапазону якості бункерних палив та жорстких екологічних вимог. Особливої актуальності набуває зменшення питомої витрати палива, стабілізація процесу згоряння та зменшення нагароутворення в дизельних двигунах. Комплексне застосування технологій гомогенізації палива, системи швидкого реагування на навантаження Jet Assist System (JAS) та сучасних присадок до палив типу Octamar дає змогу значно підвищити ефективність роботи суднових дизелів.

Гомогенізація суднового палива як основа стабільності та повноти згоряння

Гомогенізація суднового важкого палива спрямована на руйнування великих агломератів асфальтенів, зменшення їхнього розміру та стабілізацію паливної суміші. Асфальтени у важких фракціях МГО, MDO, IFO та VLSFO можуть утворювати частинки діаметром понад 80–120 мкм, що ускладнює ефективне розпилення та підвищує ризик утворення шламу перед сепараторами.

Застосування механічних або гідродинамічних гомогенізаторів забезпечує подрібнення асфальтенів до 3–7 мкм. Це покращує фізичну однорідність палива, забезпечує рівномірний розподіл важких компонентів та підвищує сумісність змішаних партій. У результаті:

- знижується навантаження на сепаратори (кількість шламу зменшується на 60–80 %);
- димність вихлопу зменшується на 15–30 %;
- температура вихлопних газів знижується на 10–25 °C;
- економія палива становить у середньому 2–6 %;
- зростає ресурс паливної апаратури на 10–20 %.

Ефективність гомогенізації особливо висока при використанні низькосортних або нестабільних партій VLSFO, де проблема розшарування та випадання осаду є найбільш поширеною.

Jet Assist System як засіб стабілізації перехідних режимів дизель-генератора

Jet Assist System (JAS) — це система поліпшення процесу згоряння при різких змінах навантаження на суднові дизель-генератори. Вона базується на роботі лямбда-контролера, який у режимі реального часу визначає якість суміші та обмежує надмірну подачу палива насосом високого тиску. Таким чином система попереджує «заливання» паливом циліндрів у перехідних режимах.

До ключових ефектів Jet Assist System належать:

- зниження димності у перехідних режимах на 20–40 %;
- зменшення викидів CO_2 та HC на 10–25 %;
- зменшення температури вихлопу на 10–30 °C;
- зменшення коливань частоти обертів на 50–70 %;
- економія палива в умовах динамічного навантаження на 3–7 %;
- підвищення ресурсу турбокомпресора та форсунок на 5–15 %.

Додатково, у режимі запуску двигуна JAS забезпечує короткочасне відкриття пневматичних повітряних клапанів, збільшуючи імпульс для розкручування турбіни. Це покращує якість згоряння під час холодного старту, знижує димність та прискорює стабілізацію частоти обертів.

Таким чином, Jet Assist System забезпечує значні експлуатаційні переваги, особливо на суднах, де ДГ працюють у режимах змінного навантаження (танкери, контейнеровози, судна забезпечення, пасажирські судна).

Паливні присадки Octamar як засоби стабілізації та покращення згоряння

Серія присадок Octamar (HF-10 Plus і Ultra HF) призначена для покращення сумісності, стабільності та якості згоряння суднових палив. HF-10 Plus містить диспергувальні агенти, що стабілізують асфальтени та запобігають випадінню шламу при змішуванні партій. Ultra HF додатково містить каталізатори згоряння та інтенсифікатори стабілізації.

Основні ефекти присадок:

- стабілізація палива: зниження RSN з 7–12 до рівня 2–4;
- зменшення димності на 20–40 %;
- зменшення відкладень на форсунках на 15–35 %;
- зниження температури вихлопних газів на 5–20 °C;
- економія палива 2–4 %;
- збільшення ресурсу турбокомпресора і клапанів на 20–30 %.

Присадки додаються в паливні танки перед бункеруванням у дозуванні 1:6 000 (Ultra HF) та 1:10 000–1:15 000 (HF-10 Plus). Практичний досвід експлуатації підтверджує ефективність підвищених доз у разі нестабільних або змішаних партій VLSFO.

Комплексне застосування та загальний ефект

Сумарне застосування гомогенізаторів, Jet Assist та паливних присадок забезпечує ефект, що перевищує результат кожного окремого методу. Така синергія пояснюється різним напрямком впливу кожної технології:

- **гомогенізація** — покращує фізичні властивості та стабільність палива;
- **Jet Assist System** — оптимізує перехідні режими та запобігає збагаченню суміші;
- **Octamar** — покращує хімічну стабільність і процес згоряння.

У комплексі ці заходи забезпечують:

- загальну економію палива 7–12 %;

- зниження димності до 50–60 %;
- зменшення температури вихлопу на 30–40 °C;
- збільшення ресурсу паливної апаратури на 30–40 %;
- значне зменшення експлуатаційних витрат.

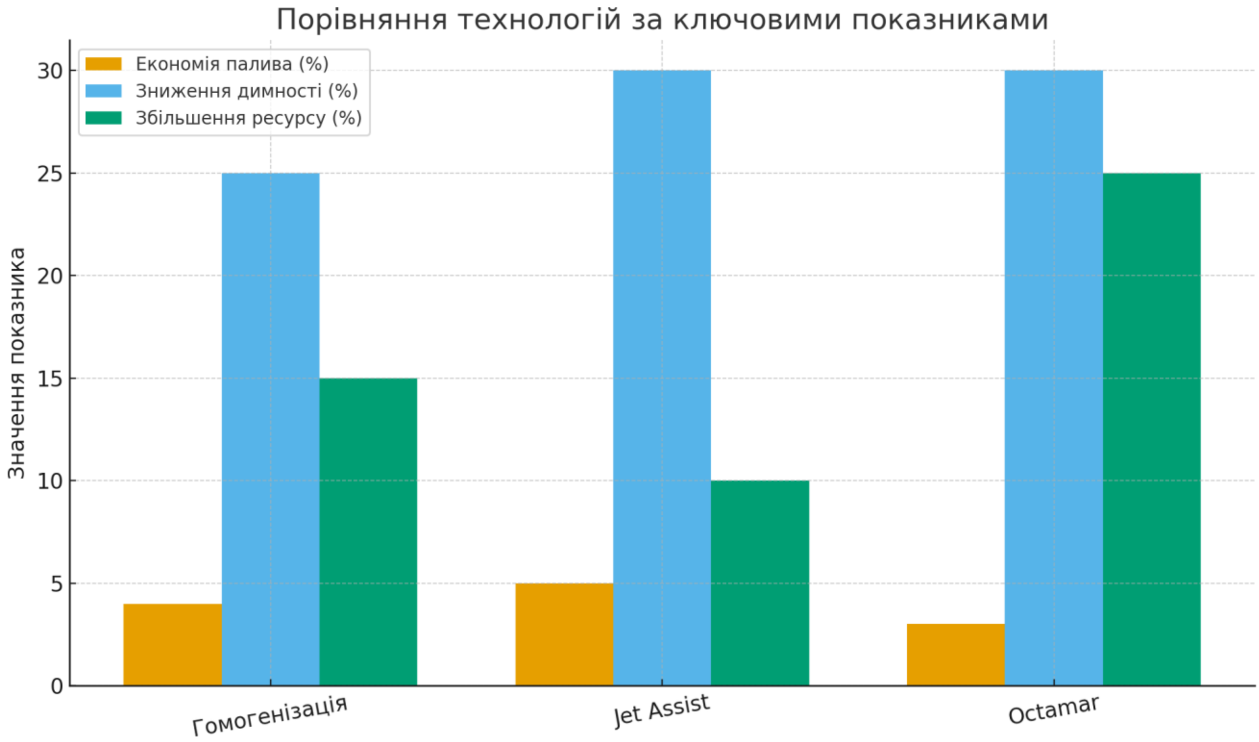


Рисунок 1 - Економія палива за різними методами

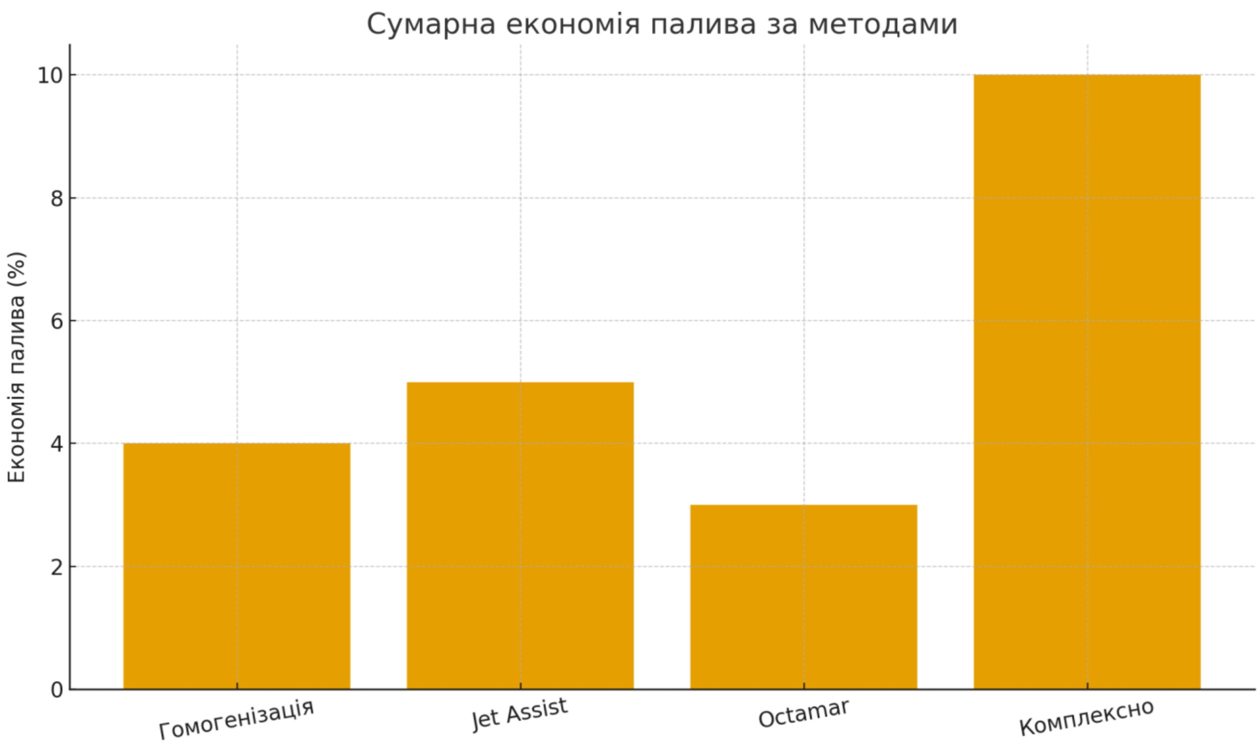


Рисунок 2 - Порівняння трьох технологій за основними показниками

Висновки

1. Гомогенізація забезпечує суттєве покращення фізичних характеристик важких палив, зменшує кількість шламу та покращує процеси розпилення.
2. Jet Assist System є високоефективним засобом оптимізації перехідних режимів роботи дизель-генераторів.
3. Присадки Octamar забезпечують стабільність змішаних партій VLSFO, зменшують нагароутворення та підвищують повноту згоряння.
4. Комплексне застосування трьох технологій дозволяє досягти найбільшої економії палива та зниження експлуатаційних витрат.
5. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження цих засобів на суднах з дизельними енергетичними установками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Підручники, навчальні та наукові видання

Технології використання робочих речовин у суднових енергетичних установках. Навчальний посібник. — Одеса: НУ «ОМА», 2015. — 506 с.

2. Наукові статті та матеріали конференцій

Довиденко Ю. М., Шумілова К. В., Каліновський Р. О. Поліпшення способів обробки суднових палив шляхом використання паливних присадок Wilhelmsen // *Матеріали наукової конференції ННІ*. — Одеса, 2024. — 12 с.

3. Інтернет-ресурси

Способи очистки суднового палива. Sea-man.org. URL: https://sea-man.org/sposobi-ochistki-topliva.html

Water-in-Fuel Emulsion and Homogenisers. MarineInsight. URL: https://www.marineinsight.com/naval-architecture/water-in-fuel-emulsion-and-homogenisers-working-advantages/

ScienceDirect. Fuel Stability Research. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1818087616300927

УДК 681.518.3:621.371

Поклонський Є.А., Корбан В. Х.
Національний університет «Одеська морська академія» (Україна)

Контроль технічного стану металевого корпусу судна радіохвилевим методом

Вступ. Металевий корпус судна, в процесі експлуатації судна, піддається негативному впливу як з внутрішньої поверхні, так і з зовнішньої, яка постійно перебуває в морській солоній воді, що викликає його корозію. З плином часу корозійні процеси зменшують міцність судна. Тому виникає необхідність у контролі товщини металевого корпусу під час перебування судна на судноремонтному заводі.

З наявних методів і пристроїв контролю товщини металевого корпусу судна найточнішим і найефективнішим методом може бути радіохвильовий, що ґрунтується на використанні когерентного додавання прямої та відбитої від металевого корпусу електромагнітних хвиль з утворенням інтерференційної картини безконтактним способом.

Актуальність досліджень. Нині відомо кілька методів вимірювання товщини металевого корпусу судна. Одним із методів контролю є ультразвуковий, який використовують для контролю товщини металевих корпусів торговельних суден, катерів і яхт. Цей метод вимірювання заснований на використанні ультразвукових хвиль, які проникають у матеріал і відбиваються від внутрішніх поверхонь, і являє собою метод неруйнівного вимірювання (калібрування) локальної товщини металу. Дефектація корпусу судна є комплексом процедур, що охоплює: візуальний огляд, замір залишкових товщин корпусу, виявлення дефектів корпусу, формування документації та визначення обсягу робіт з відновлення зношених ділянок. Ультразвукові товщиноміри вимірюють час проходження імпульсу від випромінювача до протилежної поверхні об'єкта контролю і назад до перетворювача. Для проведення таких вимірювань доступ до протилежної поверхні об'єкта контролю не потрібен. Однак, на точність ультразвукових вимірювань впливають багато чинників, включно з правильним калібруванням приладу, однорідністю швидкості звуку в матеріалі, загасанням і розсіюванням звуку, шорсткістю поверхні, кривизною, поганою звукопровідністю та непаралельністю задньої стінки, що знижує ефективність цього методу. Відомі також радіохвильові методи вимірювання товщини металевого корпусу судна, засновані на застосуванні резонаторів напіввідкритого типу розроблені В.А. Вікторовим, Б.В. Лункіним та О.С. Совлуковим. Реалізація цих методів вимагає наявності доступу електромагнітної енергії до обох сторін металевого листа. Під час резонаторного методу вимірювання застосовують або два незалежні резонатори, розташовані з протилежних боків металевого листа, які мають незамкнені металеві порожнини, у яких відкрита ділянка поверхні звернена у бік листа і розташована поблизу його поверхні, або один резонатор *С*-подібної форми з відкритими торцевими стінками.

Відомі також пристрої, в яких порівнюються фази електромагнітних хвиль, відбитих від обох поверхонь листа [1,2]. Однак така схема малоефективна, оскільки детектори чутливі як до абсолютної фази, так і до амплітуди, що спричиняє сильний дрейф її параметрів. Тому актуальним є розроблення хвильового методу, використовуваного в діапазоні НВЧ з вимірюванням не абсолютної фази, а різниці фаз між електромагнітною хвилею, що опромінює металеву поверхню судна, та електромагнітною хвилею, відбитою від поверхні, які утворюють стоячу хвилю. Утворена різниця фаз у стоячій хвилі дає змогу виміряти товщину металевої поверхні корпусу судна з високою точністю, що ефективно виявляє корозійні процеси в металі.

Постановка задачі. Метою даної статті є розроблення методології використання електромагнітної хвилі НВЧ діапазону з вимірюванням різниці фаз коливань, що складаються, під час двостороннього опромінення металевої поверхні корпусу судна, значення якої переведено у вимірювачі в товщину металевої поверхні корпусу судна в різних точках вимірювання.

Результати досліджень. Будемо виходити з того, що будь-яка електромагнітна хвиля може бути розкладена на горизонтальну і вертикальну складові. Якщо поляризація хвилі лінійна, то обидві складові будуть у фазі. Для контролю технічного стану металевої поверхні корпусу судна використано антену на випромінювання і приймання (однопозиційна радіолокація) для кожної поверхні судна. Оскільки в ділянці релеївського розсіювання ефективна площа розсіювання корпусу судна постійна, то її максимальне значення буде спостерігатися в резонансній ділянці. Використовувана довжина хвилі λ = 3 см відповідає області поверхневого розсіювання. Будемо виходити з того, що будь-яка електромагнітна хвиля може бути розкладена на горизонтальну і вертикальну складові. Якщо поляризація хвилі лінійна, то обидві складові будуть у фазі. Для контролю технічного стану судна використано антену на випромінювання і приймання (однопозиційна радіолокація) для кожної поверхні судна. Оскільки в ділянці релеївського розсіювання ефективна площа розсіювання корпусу судна постійна, то її максимальне значення буде спостерігатися в резонансній ділянці.

Використовувана довжина хвилі λ = 3 см відповідає області поверхневого розсіювання. Ключом к аналитическому решению поставленной задачи является нахождение зависимости резонансных явлений в стоячих волнах, которые образуются при облучении металлической поверхности судна с внутренней и внешней стороны. Облучать будем металлическую поверхность корпуса судна с двух сторон плоской монохроматической волной от одного генератора с помощью двух антенн. Компоненти $E_x(t,z)$ і $E_y(t,z)$ вектору $\bar{E}(t,z)$ напруженості електричного поля хвилі в ізотропному середовищі задовольняють рівнянням Максвела, рішення яких співпадає з хвильовим рівнянням.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\varepsilon'\mu'}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \ , \qquad (1)$$

де u - шукана функція,

ε', μ'- діелектрична і магнітна проникність середовища,

c - швидкість світла в вакуумі.

Тоді компоненти $E_x(t,z)$ і $E_y(t,z)$, як рішення рівняння (1) мають вигляд:

$$E_x(t,z) = A_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \varphi_1\right), \quad E_y(t,z) = A_2 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \varphi_2\right), \qquad (2)$$

де A_1 і A_2 - амплітуди;

$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\upsilon$ - колова частота коливань;

T - період коливань;

$\upsilon = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'\mu'}}$ - швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі в даному середовищі з ε';

φ_1 і φ_2 - початкові фази коливань.

Нехай в точках $M_1, M_2 \dots M_n$ знаходиться відбивальна металева поверхня корпусу судна відстань до якої від антен вимірювача до поверхні судна $z = R$. Від металевої поверхні судна M буде відбуватися відбиття електромагнітної хвилі. З рівнянь (2) складові $E_x^*(t,z)$ і $E_y^*(t,z)$ вектору $\vec{E}^*(t,z)$ напруженості електромагнітного поля відбитої хвилі визначаються таким чином:

$$E_x^*(t,z) = A_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \varphi_1'\right), \qquad E_y^*(t,z) = A_2 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \varphi_2'\right), \qquad (3)$$

де φ_1 і φ_2 - початкові фази складових луна-сигналів.

Будемо вважати, що процес відбиття від металевої поверхні корпусу судна M відбувається близько до дзеркального, тобто пряма і відбита хвилі мають однакові фази, а саме:

$$\omega t_1 - \frac{2\pi R}{\lambda} + \varphi_1 = \omega t_1 - \frac{2\pi R}{\lambda} + \varphi_1'; \ \ \omega t_1 - \frac{2\pi R}{\lambda} + \varphi_2 = \omega t_1 - \frac{2\pi R}{\lambda} + \varphi_2', \qquad (4)$$

де $t_1 = \frac{R}{\upsilon}$ - час проходження хвилі від антени (точка O) до поверхні судна M.

З умов (3) знаходимо φ_1' і φ_2':

$$\varphi_1' = \varphi_1 - \frac{4\pi R}{\lambda}; \qquad \varphi_2' = \varphi_2 - \frac{4\pi R}{\lambda}. \qquad (5)$$

Будемо вважати, що пряма і відбиті хвилі лінійно поляризовані. Тоді пряма і відбита електромагнітні хвилі будуть складатися, утворюючи стоячі хвилі, як суперпозицію хвиль (2) і (3). Обчислимо компоненти стоячих хвиль $E_{xc}(t,z)$ і $E_{yc}(t,z)$ вектору $\vec{E}_c(t,z)$ напруженості стоячих хвиль:

$$E_{xc}(t,z) = E_x(t,z) + E_x^*(t,z) = 2A_1 \cos\left(\omega t + \frac{\varphi_1' + \varphi_1}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{\varphi_1' - \varphi_1}{2}\right);$$

$$E_{yc}(t,z) = E_y(t,z) + E_y^*(t,z) = 2A_2 \cos\left(\omega t + \frac{\varphi_2' + \varphi_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{\varphi_2' - \varphi_2}{2}\right). \tag{6}$$

Визначимо різницю фаз в точці O кожної компоненти прямої і відбитої (стоячої) хвилі. З (1) видно, що при $t = 0$

$$E_x(0,0) = A_1 \cos\varphi_1; \quad E_y(0,0) = A_2 \cos\varphi_2,$$

при $t = 2t_1 = \frac{2R}{\upsilon}$, де $t_1 = \frac{R}{\upsilon}$ - час проходження хвилі від точки O до M.

$$E_{xc}(2t_1,0) = 2A_1 \cos\left(2\omega t_1 + \frac{\varphi_1' + \varphi_1}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi_1' - \varphi_1}{2}\right);$$

$$E_{yc}(2t_1,0) = 2A_2 \cos\left(2\omega t_1 + \frac{\varphi_2' + \varphi_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi_2' - \varphi_2}{2}\right). \tag{7}$$

Тоді різниця фаз $\Delta\Phi_{x1}$ для компонент E_{xc1} і E_{x1}, а також $\Delta\Phi_{y1}$ для компонент E_{yc1} і E_{y1} мають вигляд:

$$\Delta\Phi_{x1} = 2\omega t_1 + \frac{\varphi_1' + \varphi_1}{2} - \varphi_1 = \frac{2R\omega}{\upsilon} + \frac{\varphi_1' - \varphi_1}{2} = \frac{2R}{\upsilon} \cdot \frac{2\pi}{T} + \frac{\varphi_1' - \varphi_1}{2} =$$

$$= \frac{4\pi R}{\lambda} + \frac{\varphi_1' - \frac{4\pi R}{\lambda} - \varphi_1}{2} = \frac{4\pi R}{\lambda} - \frac{2\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi R}{\upsilon T} = \frac{2\pi R\upsilon}{\upsilon} = \frac{2\pi\upsilon R\sqrt{\varepsilon'\mu'}}{c},$$

також і для $\Delta\Phi_{x2}$.

$$\Delta\Phi_{y1} = 2\omega t_1 + \frac{\varphi_2' + \varphi_2}{2} - \varphi_2 = \frac{2R\omega}{\upsilon} + \frac{\varphi_2' - \varphi_2}{2} = \frac{2R}{\upsilon} \cdot \frac{2\pi}{T} + \frac{\varphi_2' - \varphi_2}{2} =$$

$$= \frac{4\pi R}{\lambda} + \frac{\varphi_2' - \frac{4\pi R}{\lambda} - \varphi_2}{2} = \frac{4\pi R}{\lambda} - \frac{2\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi R}{\upsilon T} = \frac{2\pi R\upsilon}{\upsilon} = \frac{2\pi\upsilon R\sqrt{\varepsilon'\mu'}}{c}$$

також і для $\Delta\Phi_{y2}$.

З урахуванням того, що магнітна і діелектрична проникність на невеликій ділянці поверхні рівні одиниці, то:

$\Delta\Phi_{x1} = \frac{R2\pi\upsilon}{c} = \frac{R2\pi}{cT} = R2\pi$, а також і для $\Delta\Phi_{x2}$ за умови, що c - const. і T - const. $\Delta\Phi_{y1} = \frac{R2\pi\upsilon}{c} = \frac{R2\pi}{cT} = R2\pi$ також і $\Delta\Phi_{y2}$.

Для вимірювання товщини металевої поверхні судна будемо використовувати тільки різницю фаз $\Delta\Phi_{x1}$ та $\Delta\Phi_{x2}$, за умови що відстань R від антен до металевого корпусу судна не змінюється.

Вимірювальна схема товщини металевої поверхні судна (Рис.1). У вимірювачі товщини металевого корпусу судна (рис. 1), коливання НВЧ-генератора 4, що працює в сантиметровому діапазоні довжин хвиль, через атенюатор 5, спрямовані відгалужувачі 6 надходять на антени 1 і 2 та опромінюють металеву поверхню корпусу судна 3. Відбиті від металевої поверхні корпусу судна електромагнітні хвилі приймаються тими самими антенами 1, 2, утворюючи разом із випромінюваними хвилями на відстані R_1 і R_2 від антен до металевої поверхні корпусу судна (по обидва боки) стоячі хвилі та з різницею фаз між ними та , які через спрямовані відгалужувачі 6, надходять на вимірювачі різниці фаз 7. Виміряні різниці фаз і несуть інформацію про відстані R_1, R_2, а також про R_Σ, і після фазових детекторів 8 надходять на амплітудні детектори 9, вихідні амплітуди яких відповідають відстаням R_1 і R_2.

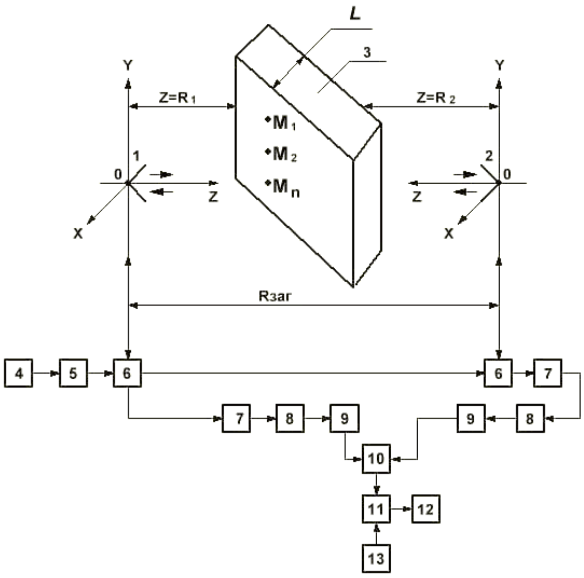


Рис.1. Вимірювання товщини металевого корпусу судна радіохвилевим товщиноміром

1, 2 – антени випроміюючі та приймальні відбиті електромагнітні хвилі лінійних поляризацій; 3 – металева поверхня корпусу судна; 4 – генератор НВЧ коливань; 5 – атенюатор; 6 - спрямовані відгалужувачі; 7 - вимірювачі різниці фаз $\Delta\Phi_{x1}$ та $\Delta\Phi_{x2}$; 8 – фазові детектори; 9 – амплітудні детектори; 10 – суматор; 11 - віднімаючий пристрій; 12 – індикатор товщини металевої поверхні корпусу судна; 13 – система штучного інтелекту.

З виходів амплітудних детекторів амплітуди двох сигналів складаються в суматорі 10, тобто $A_1 + A_2 = A_\Sigma$. Амплітуда сумарного сигналу A_Σ надходить на віднімальний пристрій 11, де операцією віднімання визначається товщина металевого корпусу судна l :

$$l = R_{заг} - R_{\Sigma},$$

де $R_{заг} = R_{\Sigma} + l$ - загальна відстань між антенами 1 и 2;

$R_{\Sigma} = R_1 + R_2$ - що відповідає сумарній амплітуді двох сигналів;

l - вимірювана товщина металевої поверхні корпусу судна, що вимірюється.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С. Поліщук. М.М. Дороховець, В.О. Яцук та інш.; За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво «Бескит Біт», - 2003. - 544с.

2. Вичужанін В. В., Рудніченко Н. Д. Методи інформаційних технологій у діагностиці стану складних технічних систем: монографія / В.В Вичужанін, Н. Д. Рудніченко – Одеса: Екологія, 2019. – 178с. : ISBN 978-617-7046-75-1/

УДК 621.574

Кіценко Є.О., Шестопалов К. О.
Національний університет «Одеська морська академія»

Огляд холодоагентів для суднового холодильного обладнання

Холодильні системи є невід'ємною складовою з морського транспорту, оскільки вони забезпечують зберігання вантажів, підтримання мікроклімату житлових та службових приміщень, а також підтримання необхідних умов у провізіних камерах. Ключовим елементом таких систем виступає холодоагент – робоча речовина, яка забезпечує перенос теплоти та визначає енергетичну ефективність, надійність і безпечність холодильного обладнання судна.

Посилення міжнародних екологічних норм, встановлених Монреальським протоколом та подальшими поправками до нього, призвело до суттєвого обмеження використання холодоагентів з високими ODP та GWP-показниками, що безпосередньо стосується і суднового сектору [1]. В умовах експлуатації в морському середовищі вимоги до холодоагентів ускладнюються необхідністю забезпечення довготривалої герметичності систем, стійкості до корозії та стабільності при широкому діапазоні температур.

Сучасна морська інженерія розглядає питання вибору хладагентів комплексно, враховуючи технічні, екологічні та експлуатаційні фактори. Основними завданнями є: підвищення ефективності холодильних систем, мінімізація шкідливих викидів, відповідність міжнародним нормам та оптимізація технічного обслуговування.

Холодоагентами називають робочі речовини, що беруть участь у процесі теплоперенесення під час роботи холодильного циклу.

Холодоагенти є окремим випадком теплоносія. Важливою відмінністю є те, що вони зазвичай використовують фазовий перехід (кипіння й конденсацію).

Вимоги до холодоагентів

- низька температуру кипіння при тиску вище від атмосферного;
- помірний тиск і температуру конденсації;
- велика теплота паротворення при малих питомих об'ємах пари;
- малу теплоємність;
- висока теплопровідність

Класифікація холодоагентів

Сучасні холодоагенти класифікують за хімічним складом, фізико-хімічними властивостями, екологічними характеристиками, а також за сферою застосування — побутовою, промисловою або судновою

Основними групами холодоагентів є галогеновмісні сполуки (так звані фреони - CFC, HCFC, HFC, HFO) та природні агенти — аміак, вуглекислий газ, вода, повітря та вуглеводні. Такий поділ закріплений у міжнародних стандартах ASHRAE і ISO 817, де кожна речовина отримує унікальний номер (R-код) залежно від складу.

Хладони (CFC, HCFC)

До цієї групи належать сполуки вуглецю, фтору, хлору та водню. Найпоширенішими представниками є **R-12, R-22, R-502**. Вони мають стабільні термодинамічні властивості, низьку токсичність та зручні в експлуатації, тому впродовж десятиліть використовувалися у холодильних системах, зокрема на морському транспорт. Однак на початку 1990-х років виявлено, що хлорфторвуглеводні (CFC) та гідрохлорфторвуглеводні (HCFC) руйнують озоновий шар, що спричинило їх поетапне виведення з обігу.

Гідрофторвуглеводні (HFC)

Ця група (R-134a, R-404A, R-410A) не містить хлору і тому **не руйнує озоновий шар (ODP = 0)**. Вони довго залишались основними замінниками HCFC у суднових системах Втім, більшість HFC мають **високий потенціал глобального потепління (GWP = 1000–4000)**, що призвело до запровадження обмежень відповідно до **Кігальської поправки (2016)** до Монреальського протоколу [1].

Гідрофторолефіни (HFO)

HFO — це нове покоління **галогеновмісних хладагентів (halocarbons)**, які відрізняються наявністю подвійного зв'язку C=C у структурі. Саме ця особливість забезпечує їх **швидке руйнування в атмосфері** і, відповідно, **дуже низький GWP** при нульовому ODP.

Типові представники: **R-1234yf, R-1234ze(E)**. Вони використовуються як безпечні замінники HFC-134a у суднових системах кондиціювання повітря та допоміжних холодильних установках. За даними досліджень, HFO-суміші демонструють стабільну роботу у суднових умовах, хоча потребують особливої уваги до герметизації систем через легку займистість.

Природні холодоагенти

До них належать **аміак (R-717), вуглекислий газ (R-744), вуглеводні (R-290, R-600a)**, інколи розглядають ще **воду (R-718)** та **повітря (R-729), однак на практиці для отримання помірного холоду практично не використовуються**. Вони не мають озоноруйнівного потенціалу й характеризуються дуже низьким GWP.

Аміак (R717) — це безбарвний газ із різким запахом, який легко виявляється навіть за дуже низьких концентрацій. Він кипить при атмосферному тиску за температури −33 °C, легший за повітря та добре розчиняється у воді. Незважаючи на високу ефективність як холодоагент, аміак має низку **технічних і токсикологічних недоліків**: є **подразнюючим і токсичним** для очей, дихальних шляхів і шкіри; у високих концентраціях може спричиняти **опіки, набряк легень і навіть смерть**. Крім того, аміак є **легкозаймистим** і утворює **вибухонебезпечні суміші з повітрям**, а також активно реагує з галогенами та кислотами. Водночас, за умови належного проєктування та контролю систем, його недоліки можна мінімізувати, що робить аміак **одним із найефективніших природних** холодоагент**ів** у промислових і суднових установках.

Вуглекислий газ (R744): низький GWP, придатний для контейнерних рефрижераторних модулів та суднових систем із рекуперацією тепла; особливість — робота при високих тисках, транскритичні режими [3]

Сучасні екологічні вимоги до використання холодоагентів та перспективні робочі речовини

Проблема негативного впливу штучних холодоагентів на довкілля почала активно обговорюватися у 1970–1980-х роках після виявлення процесів руйнування озонового шару хлорфторвуглеводнями (CFC). У 1987 році було підписано Монреальський протокол про речовини, що руйнують озоновий шар, який став основним міжнародним документом, що регулює виробництво, споживання та викиди CFC і HCFC.

Після вступу документа в силу (1989 р.) розпочався глобальний процес поетапного вилучення озоноруйнівних речовин. Подальші поправки — Лондонська (1990), Копенгагенська (1992), Монреальська (1997) — розширили перелік контрольованих агентів та запровадили жорсткіші графіки відмови від HCFC.

У 2016 році було ухвалено Кігальську поправку, яка вперше поширила екологічні обмеження на гідрофторвуглеводні (HFC) через їхній високий потенціал глобального потепління (GWP = 1000–4000). Вона передбачає поетапне скорочення виробництва й споживання HFC на 80–85 % до 2047 року, що стимулює перехід до речовин нового покоління — HFO та природних холодоагентів

У морському секторі положення Монреальського протоколу імплементовано через Конвенцію MARPOL, Додаток VI, який регламентує контроль викидів парникових і озоноруйнівних речовин на суднах.

Сучасні екологічні вимоги до холодоагентів передбачають, що вони повинні мати нульовий озоноруйнівний потенціал (ODP = 0), низький GWP (≤150), бути енергоефективними, хімічно стабільними, нетоксичними та безпечними під час експлуатації. Крім того, актуальними стали вимоги щодо герметичності систем, запобігання витокам і утилізації відпрацьованих агентів. Ці критерії закріплено в міжнародних стандартах ASHRAE, ISO 817 та рекомендаціях UNEP OzonAction [3].

З урахуванням зазначених норм, науково-технічний розвиток холодильних систем поступово зміщується в напрямі застосування природних та низько-GWP холодоагентів. Найбільш перспективними на сьогодні вважаються гідрофторолефіни (HFO), вуглекислий газ (CO_2) та аміак (NH_3). HFO- холодоагенти (наприклад, R-1234yf, R-1234ze(E)) мають нульовий ODP та дуже низький GWP (до 10), при цьому забезпечують високу термодинамічну ефективність і сумісність з існуючим обладнанням.

Загалом сучасні тенденції розвитку холодильних технологій спрямовані на зменшення впливу на клімат та оптимізацію споживання енергії

Дослідження доводять ефективність інтегрованих холодильних систем, що працюють із природними холодоагенти та використовують тепло суднових енергетичних установок [4]. Це дозволяє не лише знизити споживання палива, а й підвищити екологічну безпеку суден відповідно до сучасних міжнародних стандартів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. United Nations Environment Programme (UNEP)./*Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. (https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol)
2. Shestopalov K., Khliyeva O., Ierin V., Konstantinov O., Khliiev N., Neng G., Kozminykh M. Novel marine ejector-compression waste heat-driven refrigeration system: technical possibilities and environmental advantages. *International Journal of Refrigeration*, 2024. Vol. 158, P. 202-215.
3. Dincer I., Kanoglu M. *Refrigeration Systems and Applications. 2nd ed.* Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 548 p.
4. Shestopalov K., Konstantinov O., Ierin V., Khliyeva O. Marine heat-driven ejector refrigeration machine for air-conditioning system with thermal energy storage unit. *Nase More*. 2024. Vol 71, №.2. P. 84-90.

УДК 621.574

Крицький К.В., Хлієва О. Я.
Національний університет «Одеська морська академія»

Аналіз аварійних ситуацій холодильних машин рефконтейнерів під час їх транспортування судном контейнеровозом

Вступ

Сучасний розвиток світової торгівлі неможливо уявити без транспортування швидкопсувних вантажів – продуктів харчування, фармацевтичної продукції, біологічних матеріалів, квітів тощо. Для збереження якості таких товарів упродовж тривалих морських перевезень застосовуються рефконтейнери (refrigerated containers) – спеціальні ізотермічні контейнери, оснащені автономними холодильними установками. Ці системи забезпечують підтримання необхідних температурних режимів незалежно від погодних умов, тривалості рейсу та кліматичної зони.

Зі зростанням попиту на морські перевезення охолоджуваних вантажів (так званих reefer cargoes) зросла і кількість суден-контейнеровозів, обладнаних електричними мережами високої потужності для живлення десятків або навіть сотень рефконтейнерів. Сучасне судно місткістю понад 10000 TEU може одночасно транспортувати понад 1500 рефконтейнерів, кожен із яких споживає від 2 до 5 кВт електроенергії (в залежності від температри всередині та зовні). В таких умовах безперебійна робота холодильних систем рефконтейнерів стає критично важливим чинником як з точки зору збереження вантажу, так й енергоефективності та економічної стабільності всього судна.

Згідно з дослідженням Fitzgerald et al. [1], на підтримання температури швидкопсувних вантажів під час морських перевезень споживається до 19% енергетичних ресурсів судна, а щорічні викиди CO_2 від роботи холодильних систем становлять десятки тисяч тонн. При тривалих рейсах (наприклад, із Нової Зеландії до Європи) один контейнер витрачає близько 2800–3200 кВт·год електроенергії, що еквівалентно спаленню приблизно 60 кг палива на кожен TEU. Під час аварійної зупинки холодильного агрегату енергоспоживання різко падає, але ризики втрати вантажу, а отже й збільшення непрямих викидів CO_2 через псування продуктів, навпаки, зростають. Тому ефективна та надійна робота холодильних машин рефконтейнерів дуже важлива.

Водночас експлуатація холодильних машин у складі рефконтейнерів у складних морських умовах супроводжується значними ризиками. Коливання температури навколишнього середовища, вологість, вібрації, нестабільність електроживлення, людський фактор — усе це може призвести до аварійних ситуацій. Втрата працездатності навіть однієї рефустановки може спричинити псування продукції на тисячі доларів, а масштабна відмова — значні фінансові збитки для судновласника та вантажовласника.

Аварії холодильних машин у складі рефконтейнерів мають також екологічний аспект. Витоки холодоагенту є додатковим вкладом в емісію парникових газів, а підвищене енергоспоживання при неправильній роботі або після усунення поломки збільшує непрямі викиди парникових газів. Тому питання надійності та стабільності роботи холодильних машин рефконтейнерів є актуальним не лише у технічному, а й у екологічному та економічному контексті.

1. Умови експлуатації рефконтейнерів та

Енергопостачання холодильних установок рефконтейнерів здійснюється від суднової електромережі змінного струму напругою 440 В, 60 Гц (іноді 380 В, 50 Гц — залежно від системи). На борту судна кожен контейнер підключається до спеціальної розетки через кабель живлення, а споживана потужність одного агрегату становить від 2,5 до 7 кВт, залежно від моделі та температурного режиму.

Виділяють три основні режими експлуатації рефконтейнерів:

- режим зберігання заморожених вантажів (−25…−10 °C) – для м'яса, риби, морепродуктів, морозива;
- режим зберігання охолоджених вантажів (0…+10 °C) – для овочів, фруктів, молочної продукції;
- контрольований або модифікований газовий режим (+10…+25 °C) – для тропічних фруктів, квітів, фармацевтичної продукції.

Підтримання цих параметрів вимагає стабільної електричної потужності, чистого повітряного потоку та справних датчиків температури. Вплив зовнішнього середовища є критичним: при підвищенні температури навколишнього повітря на +10 °C споживана потужність холодильного агрегату зростає приблизно на 25…30%. Це пояснюється підвищенням температури конденсації та збільшенням роботи стиснення холодоагенту у компресорі.

В при транспортуванні морем холодильні установки рефконтейнерів працюють у дуже несприятливих для забезпечення їх стабільної та надійної роботи умовах. До факторів, які істотно впливають на їхню експлуатаційну надійність відносяться висока вологість повітря, що сприяє корозії елементів електроніки, вібрації від роботи головного двигуна та хвилювання моря, які можуть призвести до розгерметизації трубопроводів та витоків холодоагенту, соляний туман, що викликає електрохімічне руйнування контактів, зміни частоти та напруги суднової електромережі, які спричиняють перевантаження компресорів.

У зв'язку з цим на сучасних контейнеровозах впроваджуються системи централізованого моніторингу рефконтейнерів (Reefer Monitoring System). Вони дозволяють екіпажу відстежувати роботу кожного агрегату з містка або центрального поста управління, отримуючи інформацію про температуру, споживану потужність, тиск у системі та сигнали тривоги.

2. Основні причини аварій холодильних машин

Відповідно до звіту The Swedish Club [2], близько 69% аварійних інцидентів із рефконтейнерами відбувається під час рейсу, тоді як лише 22% – у порту.

Найпоширеніші причини аварійних інцидентів наступні:

1. Механічні відмови компресора або пошкодження трубопроводів.
2. Коливання напруги або збої живлення від суднової електромережі.
3. Порушення температурного режиму внаслідок неправильних налаштувань або несправності термодатчиків.
4. Недостатній контроль екіпажу: несвоєчасна перевірка параметрів, відсутність записів у журналі.
5. Вплив зовнішніх умов — підвищена температура повітря, сонячна радіація, вібрації корпусу судна.

Згідно зі страховими даними The Swedish Club [2] за 2017–2021, найпоширенішими причинами претензій щодо рефрижераторних вантажів на контейнеровозах були:

- Температурні відхилення зберігання вантажу під час транспортування 65% усіх претензій,
- Несправність холодильних агрегатів — 36%,
- Неправильне розташування вантажів та циркуляція повітря всередині контейнера — 18%.

Середня вартість збитку за кожен інцидент складала 38 000 USD.

Прикладами типових ситуацій є псування фруктів через неправильне налаштування термостата або відключення живлення під час стоянки в порту без резервного генератора.

3. Шляхи запобігання аваріям

Аналіз аварійних ситуацій показує, що більшість відмов холодильних машин рефконтейнерів можна попередити за умови своєчасного технічного обслуговування, контролю параметрів і належної підготовки екіпажу. Для цього в сучасній практиці морських перевезень впроваджується комплекс організаційних та технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності роботи систем холодопостачання.

1. **Постійний моніторинг параметрів роботи холодильних установок.** На сучасних контейнеровозах застосовуються централізовані системи *Reefer Monitoring Systems (RMS)*, які дозволяють дистанційно зчитувати показники температури, тиску, вологості, струму компресора та частоти обертання вентиляторів. Дані передаються в реальному часі до центрального поста управління або на берег через супутниковий канал. Така система дає змогу виявляти початкові ознаки несправності ще до виникнення аварії — наприклад, підвищення температури кипіння холодоагенту, нерівномірну роботу компресора чи коливання напруги живлення.

2. **Регулярне технічне обслуговування холодильних установок.** Згідно з рекомендаціями компаній *Carrier Transicold* та *Daikin*, профілактичне обслуговування має проводитися після кожного рейсу або не рідше ніж раз

на три місяці. До основних операцій належить перевірка герметичності холодильного контуру, очищення конденсатора, тестування електронного контролера, калібрування датчиків і перевірка стану ізоляції кабелів. Використання сучасних діагностичних приладів дозволяє скоротити час простою контейнера та підвищити надійність системи.

3. **Резервне енергопостачання.** Під час стоянки судна в порту або при відключенні головного генератора необхідно забезпечити живлення рефконтейнерів від допоміжних джерел — дизель-генераторів або портових розеток. На багатьох суднах використовуються *Clip-on Generator Sets* — знімні дизельні агрегати, які встановлюються безпосередньо на контейнер і забезпечують його автономну роботу. Наявність таких пристроїв значно знижує ризик аварій при перебоях електроживлення.

4. **Підвищення кваліфікації екіпажу.** Важливою складовою є навчання персоналу правилам експлуатації холодильних установок, процедур підключення до суднової мережі та дій у разі аварійної ситуації. Рекомендовано проводити регулярні тренування та практичні заняття з імітацією аварій, щоб екіпаж міг оперативно реагувати на сигнали тривоги й правильно оцінювати та вирішувати ситуацію.

5. **Використання інноваційних технологій.** Перспективним напрямом є застосування теплоакумулювальних **матеріалів з фазовим переходом** у конструкції контейнера. Ці матеріали здатні акумулювати "холод" під час нормальної роботи системи та віддавати його у разі аварійної зупинки агрегату, підтримуючи температуру вантажу протягом 6–12 годин без активного охолодження.

6. Цифрові технології та прогнозний аналіз стану обладнання**.** Впровадження систем на основі штучного інтелекту дозволяє проводити аналіз даних із сотень рефконтейнерів у режимі реального часу. Програмні алгоритми можуть прогнозувати ймовірність відмови компресора або вентилятора за трендами зміни температури та споживаної потужності. Це відкриває нові можливості для переходу від реактивного до **превентивного технічного обслуговування (Predictive Maintenance)**, що є ключовим напрямом у сучасних умовах експлуатації суднових систем.

Отже, запобігання аварійним ситуаціям у роботі холодильних машин рефконтейнерів вимагає комплексного підходу, який поєднує технічні рішення, організаційні заходи та людський фактор.

Висновки

У процесі дослідження було встановлено, що більшість аварійних ситуацій у холодильних системах рефконтейнерів спричинені поєднанням технічних і людських чинників. До найпоширеніших належать відмови компресорів, коливання напруги живлення, несправність термодатчиків та помилки під час налаштування режимів охолодження. Вплив зовнішніх факторів, таких як підвищена температура навколишнього середовища, вібрації та корозія, додатково ускладнює умови експлуатації.

Встановлено, що ефективність холодильних установок безпосередньо залежить від рівня технічного обслуговування та організації контролю. Системи дистанційного моніторингу (*Reefer Monitoring Systems*) істотно підвищують надійність і дозволяють виявляти потенційні збої ще до виникнення критичної ситуації. Особливу роль відіграє кваліфікація екіпажу — грамотні дії машинної команди здатні запобігти розвитку аварії навіть при несправності обладнання.

Перспективним напрямом розвитку є інтеграція інтелектуальних систем керування та аналітики, що дозволяють прогнозувати технічний стан холодильних машин і оптимізувати енергоспоживання. Впровадження таких технологій сприятиме зниженню експлуатаційних витрат, скороченню викидів парникових газів і підвищенню загальної ефективності суднових енергетичних систем.

У підсумку можна зробити висновок, що підвищення надійності холодильних машин рефконтейнерів можливе лише за умови системного підходу, який включає модернізацію обладнання, регулярне технічне обслуговування, удосконалення систем моніторингу, професійну підготовку екіпажу.

Реалізація зазначених заходів забезпечить безпечне транспортування швидкопсувних вантажів морським транспортом, збереже якість продукції та сприятиме сталому розвитку міжнародної логістики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fitzgerald W.B., Howitt O.J., Smith I.J., Hume A. Energy use of integral refrigerated containers in maritime transportation. *Energy Policy*. 2011. Vol. 39(4). P.1885-1896.

2. Container focus Refrigerated cargo analysis. The Swedish Club. 2020. www.swedishclub.com

УДК 629.12+621.69

Константинов О. О., Козьміних М.А.
Національний Університет «Одеська морська академія»

Аналіз ефективності використання холодильних агентів в холодильному обладнанні рефрижераторних контейнерів

Враховуючи те, що застосуванням холодильних установок, як в промисловості, так і в повсякденному житті людського суспільства постійно зростає, а в якості робочих речовин в таких установках зазвичай використовуються речовими, що зазначаються вищезгаданими міжнародними документами, в процесі вибору робочої речовини – холодильного агенту слід комплексно оцінювати її вплив на земну атмосферу.

З іншого боку необхідно звернути увагу на енергетичну ефективність холодильної установки враховуючи її призначення та умови експлуатації в залежності від обраного холодильного агенту .

Найліпші значення достатньо великої кількості показників здатні створювати антагоністичні умови під час обрання конкретного холодильного агенту, що вимагає від проектанта пошуків оптимального рішення, яке в найбільшому ступені, буде відповідати всім наявним вимогам .

Сьогодні найбільш розповсюдженим холодильним агентом, який підлягає подальшій заміні є холодоагенти R134A та R513A . У зв'язку з цим, постає гостра необхідність дослідження нових холодоагентів, їх властивостей та їх впливу на експлуатаційні показники суднових холодильних установок (ХУ).

Альтернативні холодоагенти групи гідрофторвуглеводів (ГФВ) мають різний хімічний склад, фізичні властивості та термодинамічні особливості. Тому для дослідження можливості заміни холодоагенту або його використання у новому обладнанні необхідно з'ясувати як впливає на експлуатаційні показники ХУ застосування конкретного холодоагенту.

Одним зі шляхів розв’язання проблеми було б отримання комплексного критерію оцінки для обрання холодильного агенту, який би враховував, як його вплив на процеси в атмосфері, так і виконання технологічних вимог .

Зниження кількості озону в земній атмосфері, як відомо, є наслідком надходження галогенів, які є складовою частиною хлорфторвуглецьв, до яких відноситься значна частина традиційних холодильних агентів. Така властивість цих речовин оцінюється коефіцієнтом озоноруйнуючого потенціалу *ODP (Ozone Depletion Potentional)*, що змінюється від 1 (100%), для найбільш поширеного в минулому сторіччі *R12,* до 0 для більшості холодильних агентів, що застосовуються нині (*R 507, R 404a* та інш.) .

Для оцінки впливу на парниковий ефект застосовують коефіцієнт глобального потепління *GWP (Global Warming Potentional),* в якості базового значення було прийнято *GWP=1* для *R 11*, який може змінюватися дуже в широких межах від 1 до більш ніж трьох тисяч у *R 404a*, який теж використовується в деяких суднових холодильних установках.

Для остаточного урахування впливу функціонування холодильної установки на парниковий ефект в нинішній час рекомендують застосовувати показник *TEWI (Total Equivalent Warming Impact),* який враховує не тільки вплив холодильного агенту, але й вплив кількості енергії, яка вживається холодильною установкою за весь час експлуатації.

$$TEWI = GWP \cdot M + \alpha \cdot B,$$

де M – загальна маса холодильного агенту, викинутого до атмосфери під час експлуатації, кг;

α – кількість двоокису вуглецю (CO_2), що надходить до атмосфери під час виробки 1 кВт години енергії, кг/кВт година;

B – загальне електровживання холодильної установки за весь час експлуатації, кВт.

Не важко зробити висновок, що наведені вище показники та їх порівняння з умов використання різних холодильних агентів не дозволяють оцінити ефективність експлуатації холодильної установки та її конкретний вплив на навколишнє середовище

Для вибору холодоагентів, які будуть порівнюватися розглянемо класифікацію альтернативних холодоагентів.(Рис.1). Для найбільш повного аналізу в асортименті сучасних холодильних агентів для порівняння обираємо холодоагенти різних груп та складів. Так обрані R1234ze, R134A - однокомпонентні, а R513A, R450A - суміші. R1234ze містить хлор, R134A, R450A,R513A, R1234ze - хлору не містять.

Основними чинниками, що визначають вибір холодоагенту, безумовно, є його термодинамічні та теплофізичні характеристики. Вони впливають на ефективність, експлуатаційні показники і конструктивні характеристики ХУ. Властивості холодоагентів залежать від структури молекули речовини, співвідношення молекул фтору, хлору і водню в його складі.

Речовини з високим вмістом молекул водню є горючими і при їх застосуванні пожежонебезпечними.

Речовини з малим вмістом фтору володіють токсичністю та їх застосування обмежене санітарними нормами.

Речовини з малим вмістом водню довго "живуть" в атмосфері, майже не розкладаючись на частини, поглинаються біосферою Землі і є екологічно небажаними.

Для аналізу експлуатаційних показників були прийняти режими роботи суднової холодильної установки при температурах випарювання від -30°C до

+ 5°C, що охоплює найбільш можливі експлуатаційні режими. Показники холодильної установки були розраховані для холодоагентів R1234ze, R134A, R450A, R513A. Для дослідження зміни експлуатаційних показників ХУ, обираємо наступні найбільш характерні термодинамічні властивості та експлуатаційні показники:

-тиски конденсації та випарювання $p_к$,$p_{вип}$;

-дійсна масова подача компресора G_0 ;

-адіабатна(теоретична) ,індикаторна, ефективна потужності та потужність на валу електродвигуна N_a, N_i , N_e, $N_{ел.д.}$;

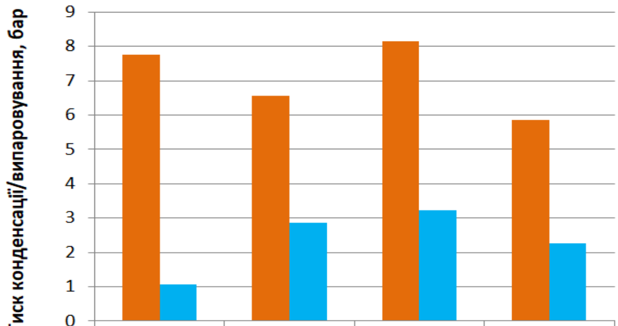
-індикаторний,механічний,ефективний та електричний ККД η_i ,$\eta_м$, η_e, $\eta_{ел.д.}$;

-теоретичний, ефективний та електричний холодильні коефіцієнти $\varepsilon_т$, ε_e, $\varepsilon_{ел}$.

Розглянувши результати розрахунків параметрів холодоагентів у вузлових точках можна побудувати гістограму тисків конденсації та випарювання – рисунок 1.

Холодоагент R-450A має значно вищий у порівнянні з іншими холодоагентами тиск конденсації, який дорівнює 1.87 МПа і вищий за тиск конденсації R1234ze у 1.57 рази. Це є значним недоліком цього холодоагенту, оскільки через занадто високий тиск ми не можемо провести заміну без зміни конструкції ХУ. З гістограми видно,що холодоагент R-134A доцільно застосовувати при більш низьких тисках, а R-450A - при більш високих, тому конструктивно холодильне обладнання на R-450A буде суттєво відрізнятися.

R-513A-має найбільш наближене значення показників до R1234ze,тому цей холодоагент - гарний вибір для ретрофіту.



	R134a	R450A	R513A	R1234ze
Рк, бар	7.76	6.55	8.15	5.85
Рвип, бар	1.06	2.85	3.22	2.25

Рисунок 1 - Тиски конденсації та випарювання

Проаналізувавши результати розрахунків,побудовано гістограми, які наглядно ілюструють зміну таких показників,як масова подача компресора адіабатна, індикаторна ефективна та електрична потужності ККД (рис. 2).

Розраховані значення свідчать про наступні зміни експлуатаційних показників (порівняно з базовим холодоагентом R1234ze) : масова подача компресора на R134A збільшилася на 8,5%, R513A на 2,1%,а на R450A- зменшилася на 4,2%; адіабатна потужність на R134A зменшилася на 5,1% і збільшилася на 3,7% та 5,9% при роботі на R450A та R513A відповідно;потужність на валу електродвигуна для R134A зменшилася на

4,3% ,для R450A збільшилася на 3,1%,для R513A збільшилася на 5.9%.Також маємо незначне зменшення ККД для R134A та збільшення ККД для R450A та R513A.

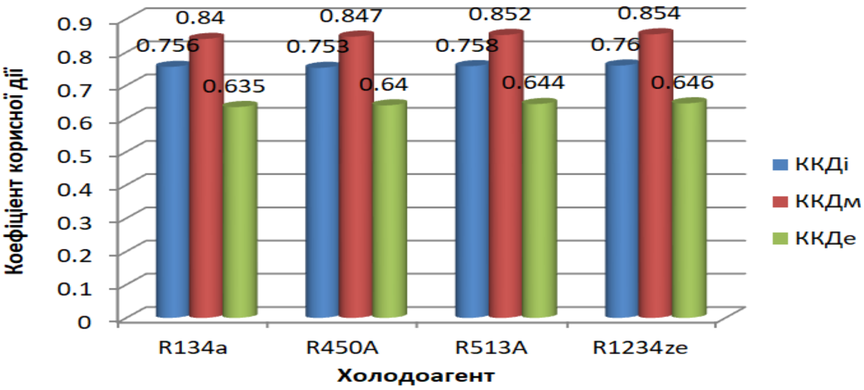


Рисунок 2 - Порівняння ККД

При аналізі беремо до уваги і інші фактори: наскільки далеко від критичної точки реалізований холодильний цикл (це впливає на відношення прихованої теплоти пароутворення до питомої теплоємності рідини при постійному тиску), нахил кривих насичення рідини і пара, за яким визначають результативність перегріву, переохолодження і дроселювання. На нахил кривих істотно впливає мольна теплоємність.

На незворотність процесів дроселювання і перегріву пари впливає нахил кривих насичення. Втрати від незворотності значно вище поблизу критичної точки, де лінії насичення поступово стають більш пологими, формуючи двофазний купол.

Критична температура R-450A та R-513A нижче, ніж у R-1234ze . З цієї причини, незворотність через перегрів пари і незворотність, викликана дроселюванням, найвища для R-450A, потім для R-513A і найменша для

R-134A .

Дослідивши холодильні коефіцієнти,можна зробити висновок,що саме так як холодильна машина, кращі показники буде мати установка на холодоагенті R-1234ze. Холодильний коефіцієнт на R-1234ze більший ніж на R-134A за розрахунками при однакових умовах на 10,3% (рис. 3).

Кожен з досліджуваних холодоагентів розглядається як альтернативний до R-22 , але не можна однозначно сказати, що один з холодоагентів кращий за інші, оскільки холодоагенти різні за своєю питомою холодопродуктивністю, коефіцієнтом тепловіддачі, тиском конденсації.

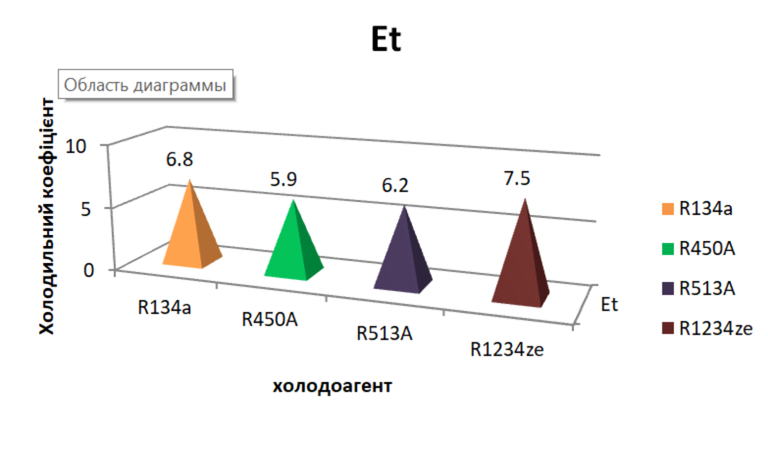


Рисунок 3 - Холодильні коефіцієнти

Як видно з вищенаведених діаграм, для зазначених холодоагентів характерні наступні експлуатаційні особливості:

R 407C:

- 1600 GWP(потенціал глобального потепління);

- властивості близькі до R-22, отже потрібні лише незначні зміни (іноді навіть не потрібні) в конструкції холодильних машин. Це дозволяє уникнути подорожчання устаткування.

Обґрунтування доцільності використання конкретного холодильного агенту базується на порівняльному аналізі енергетичних характеристик, фізичних властивостей та економічній складовій.

Однак в нинішній час не визначено комплексного показника, який би дозволив оцінити доцільність використання конкретних холодильних агентів з урахуванням як їх термодинамічних властивостей, так і екологічних факторів.

В якості основного показника, який характеризує енергетичну ефективність використання холодильного агенту доцільно визначити холодильний коефіцієнт ε. Основними показниками, що визначають екологічність холодильного агенту на нинішній час визнанні: потенціал руйнування озону (ODP) та потенціал глобального потепління (GWP), які використовуються для аналізу екологічної доцільності використання холодильного агенту.

Для полегшення процесу первинного вибору холодильного агенту можливо запропонувати введення комплексного показника, який буде враховувати вище вказані параметри. Виходячи з того, що для ефективного використання холодильного обладнання необхідно, щоб холодильний коефіцієнт був якомога вищий, а параметри ODP та GWP мінімальні, можливо використання формули

$$K = \frac{\varepsilon}{GWP * ODP} \cdot$$

Для розрахунку комплексного показника доцільно ввести наступні умови:

$$ODP_p = \text{ODP} + 1;$$

$$GWP_p = \text{GWP} * 10^{-3}.$$

Висновок

Проведено порівняльний аналіз енергетичних характеристик при умові використання холодильних агентів R134A, R513A, R450A, R1234ze в інтервалі температур випарювання -25 ÷ +5 °C, який охоплює практично майже весь діапазон роботи суднових холодильних установок, провізійних камер та рефрижераторних контейнерів, впритул наближаючись до режимів роботи холодильних установок, систем комфортного кондиціювання повітря.

Для оцінки теплової ефективності можливо використовувати дійсний холодильний коефіцієнт та дійсний електричний холодильний коефіцієнти. Для оцінки енергетичних затрат на експлуатацію використовується показник ефективної потужності компресора.

По зазначеним показникам аналіз результатів розрахунків показує наступне:

При температурі t_0= -25°C найбільше значення холодильного коефіцієнту характерне для R450A та R1234ze, а найбільша потуга КМ характерна для R450A, найменша для R1234ze.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Іщенко В.М., Брайковська Н.С., Щербіна Ю.В. Методичні підходи до ефективного використання альтернативних холодильних агентів в холодильному обладнанні рефрижераторного рухомого складу. Збірник наукових праць ДУПТ: серія «Транспортні системи і технології, Вип. 33, Т.1, 2019. – С. 202-212.
2. Іщенко В.М., Щербіна Ю.В., Осьмак В.Є., Горлушко Ю.В. Взаємозамінність альтернативних холодоагентів в системах кондиціонування повітря пасажирських вагонів. Вісник східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, Вип. 2, 2021. –С. 96-100.
3. Галян І.С., Козьміних М.А. Аналіз ефективності застосування сучасних холодильних агентів в транспортних холодильних установках. НТЗ Суднові енергетичні установки, Вип. 38, 2019. –С. 54-68.
4. Константинов І.В., Хмельнюк М.Г. Порівняння енергоефективності торгового холодильного обладнання працюючих на різних холодильних агентах. Збірник наукових праць за матеріалами XVIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології», 2020. –С. 136-140.

УДК 629.12.565.3

Майстренко М. О., Козьміних М.А.
Національний Університет «Одеська морска академія»

Аналіз можливості застосування сучасних холодильних агентів в суднових системах комфортного кондиціонування.

На сьогодні важливим аспектом у сфері холодильного обладнання є використання холодоагентів, які відповідають сучасним екологічним стандартам. Що ж являють собою холодоагенти? Це спеціальні рідини, які знаходять своє застосування в системах кондиціонування і охолодження. Холодоагенти проходять через фазові зміни, переходячи з рідкого стану в газоподібний при поглинанні тепла, і знову стають рідиною, коли компресор стискає газ. Вибір оптимального холодоагенту базується на його термодинамічних властивостях і передбачає, що він буде безпечним, нетоксичним, негорючим і неагресивним.

Тільки в 1970-х роках вчені встановили, що молекули хлору, що містяться в деяких холодоагентах, негативно впливають на озоновий шар, спричиняючи його руйнування. Це стало підставою для заборони хлорвмісних холодоагентів. Того ж десятиліття було виявлено, що використання аміаку як холодоагенту перешкоджає проникненню інфрачервоних променів в атмосферу, сприяючи накопиченню тепла та спричиняючи кліматичні зміни, через що його також вирішили вилучити з обігу.

Досліджуючи рівень озону в земній атмосфері, на початку 1980-х років учені зафіксували помітне зниження загального вмісту стратосферного озону (ЗЗО). Виявилося, що протягом періоду 1986-1991 років кожної весни над Антарктидою рівень стратосферного озону був на 30-40% нижчим порівняно з періодом 1967-1971 років, а у 1993 році це зниження досягло понад 60%.

У 1977 році у Вашингтоні представники 32 країн розробили перший комплекс заходів із захисту озонового шару. У березні 1985 року у Відні була прийнята концепція охорони озонового шару, а зобов'язання країн, які підтримали цю концепцію, закріпили у міжнародній угоді, відомій як Віденська конвенція про захист озонового шару. У 1986 році наша країна також приєдналася до цієї угоди.

Згідно з Віденською конвенцією, державна політика повинна бути спрямована на мінімізацію негативного впливу на озоновий шар Землі.

Наступний важливий крок у справі захисту озонового шару Землі було зроблено в жовтні 1987 року в Монреалі, де представники 36 країн підписали Протокол щодо речовин, які руйнують озоновий шар. До цього міжнародного документа наша країна приєдналася у 1988 році. Монреальський протокол передбачав замороження виробництва п’яти найпоширеніших хлорфторвуглеців (ХФУ) на рівні 1986 року, з подальшим скороченням їх виробництва на 20% до 1993 року та на 30% до 1998 року.

До червня 1995 року протокол підписали вже близько 150 країн, а на монреальській зустрічі у вересні 1997 року кількість учасників досягла 163.

У 1990-х і 2000-х роках ХФУ почали замінювати на гідрохлорфторвуглеці, серед яких найбільш розповсюдженим став «R-22». Він мав значно менший озоноруйнуючий вплив, хоча залишався небезпечним для довкілля. У відповідь на це вчені розробили гідрофторвуглеці (HFC), які не містили хлору. Однак пізніше було з'ясовано, що гідрофторвуглеці, хоч і не руйнують озоновий шар, мають значний вплив на зміну клімату через високий потенціал парникового ефекту.

На 28-й нараді Сторін Монреальського протоколу, яка відбулася у місті Кігалі (Руанда), після тривалих обговорень країни-учасниці домовилися про обмеження використання HFC. Монреальський протокол, прийнятий у 1987 році, став важливим інструментом у боротьбі за збереження озонового шару і передбачав обмеження у використанні речовин, які його руйнують, зокрема хлорфторвуглеців. На сьогодні протокол ратифікований 197 країнами світу, і Україна приєдналася до нього в 1988 році, підтримуючи міжнародну ініціативу захисту озонового шару.

Гідрофторвуглеці, які почали застосовуватися в холодильних установках і кондиціонерах замість хлорфторвуглеців, не мають руйнівного впливу на озоновий шар. Проте вони володіють високим потенціалом парникового ефекту, що посилює ризики кліматичних змін.

Це ставить перед науковцями завдання дослідження властивостей нових холодоагентів і їхнього впливу на експлуатаційні характеристики холодильного обладнання. Сучасні розробки активно пропонують нові альтернативні хладони, які є екологічно безпечними, але на сьогодні інформація про їх тепловіддачу під час кипіння та конденсації у різних агрегатах холодильних установок досить обмежена.

Через це постала потреба у додаткових дослідженнях теплообміну у випарниках та конденсаторах холодильних установок. Експериментальні дослідження в цій сфері є найбільш інформативними, адже саме вони дозволяють отримати локальні характеристики процесів, що відбуваються під час експлуатації нових холодоагентів.

Найнебезпечнішими з точки зору руйнування озону залишаються фреони групи хлорфторвуглеців (CFC), що мають найбільший озоноруйнуючий потенціал. До них належать холодоагенти R11, R12 і R502. Виробництво фреону R11 було заборонено ще у 1996 році, а два інших холодоагенти все ще частково використовуються у побутових холодильниках і низькотемпературних холодильних установках, хоча їх випуск у більшості розвинених країн також припинено. До групи гідрохлорфторвуглеців (HCFC), які мають нижчу озоноруйнуючу здатність, належать R21, R123, R124, R141B, R142B і найпоширеніший у побутових кондиціонерах — R22. Загроза подальшого руйнування озонового шару призвела до того, що міжнародна спільнота прийняла рішення про поступове припинення використання цієї групи холодоагентів і їх повну заміну на екологічно безпечні види. У країнах ЄС, США, Канаді та Японії вже припинили виробництво побутових кондиціонерів, що працюють на R22.

Сьогодні найперспективнішими з точки зору екологічної безпеки є озонобезпечні холодоагенти. До них належать фреони без вмісту хлору — група HFC, а також альтернативні холодоагенти, що активно розробляються в розвинених країнах. Серед них фреони R125, R132, R134a, R152a, R32, R600, R717 та інші. Серед найбільш екологічно чистих холодоагентів, доступних на ринку, є R-290 та R-600A. Вони належать до групи вуглеводнів (HC) і мають хімічні назви «Пропан» (R-290) та «Ізобутан» (R-600A). Ці холодоагенти повністю позбавлені галогенів, не руйнують озоновий шар і мають низький потенціал глобального потепління. Їхня енергетична ефективність є високою, але через вуглеводневу природу вони легкозаймисті.

На сьогодні найекологічнішими варіантами серед холодильних агентів є R134A, R-407C і R-410A. Виробники стверджують, що ці речовини є повністю безпечними для довкілля. Альтернативні холодоагенти можуть бути як чистими речовинами, так і сумішами різних фреонів у відповідних пропорціях. Наприклад, холодоагент R410A, що використовується як заміна для R22 у побутових кондиціонерах, є сумішшю фреонів R32 і R125 у співвідношенні 50/50. Це створює певні особливості для обслуговування і ремонту обладнання, оскільки при навіть частковому витоку необхідно повністю замінювати холодоагент. Незважаючи на це, технічні характеристики та економічність обладнання, що працює на таких холодоагентах, значно вищі.

В даній роботі розглядається вибір найбільш оптимального альтернативного холодоагенту для ретрофіту (модернізації) систем охолодження.

Для роботи були взяті холодоагенти R-1234yf – Тетрафторпропен, R-513A який піде на зміну застарілого R134A, але водночас це суміш того самого хладогенту R134A (44%) та R1234yf (56%), наступний R-448A негорюча азеотропна суміш хладогентів R-32 (26%), R-125 (26%), R-1234YF (20%), R-134A (21%) и R-1234ZE (7%) не містить хлорфторвуглеців (CFC), а також новий майже не тестований хладон R-455A суміш 75.5% (R1234yf), (21.5% R32), (3% CO_2).

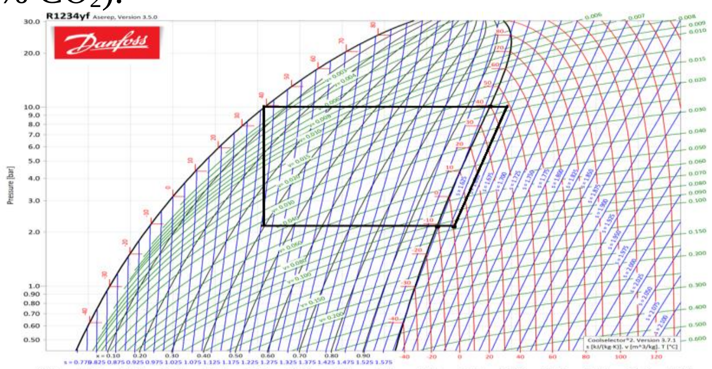


Рисунок 1 - Термодинамічний цикл холодильної установки, працюючої на холодоагенті R1234yf

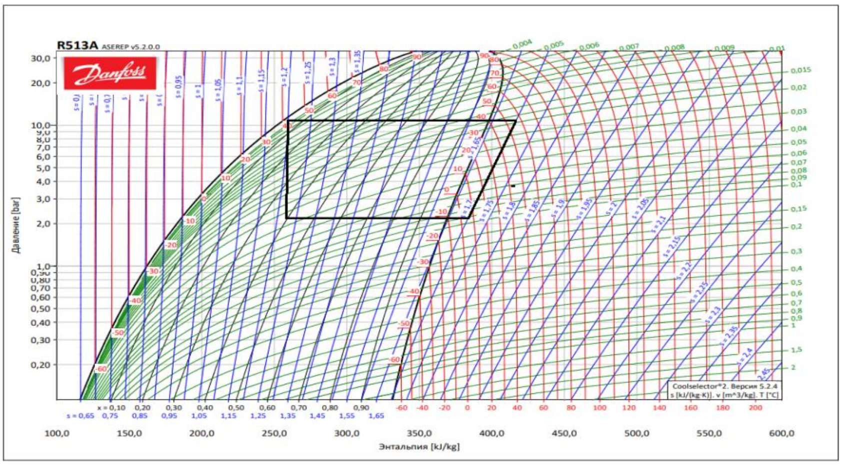


Рисунок 2 - Термодинамічний цикл холодильної установки, працюючої на холодоагенті R513A

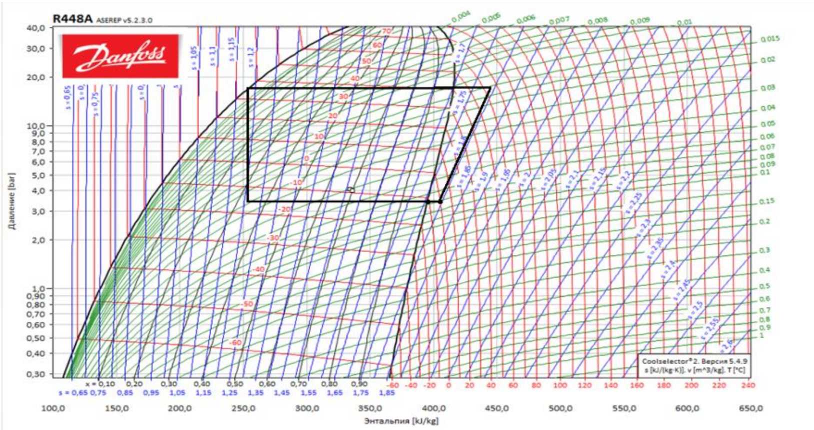


Рисунок 3 - Термодинамічний цикл холодильної установки, працюючої на холодоагенті R448A

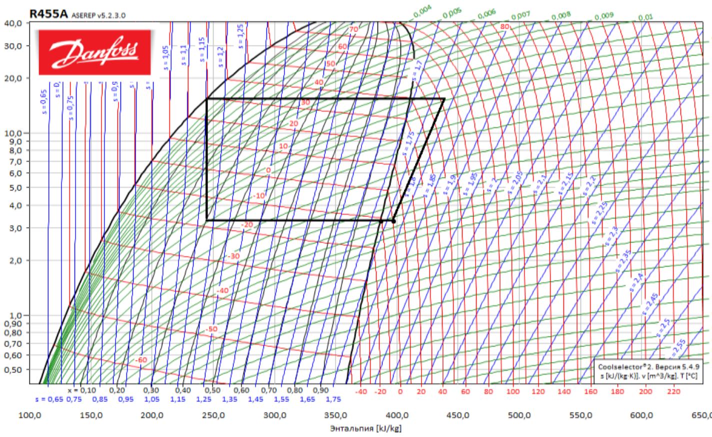


Рисунок 4 - Термодинамічний цикл холодильної установки, працюючої на холодоагенті R455A

Порівняльний аналіз експлуатаційних показників холодильної установки, працюючої на різних холодильних агентах

Задана холодильна установка перераховується на холодоагентах R1234yf, R513A, R448A, R455A. Для дослідження зміни експлуатаційних показників ХУ, обираємо наступні найбільш характерні експлуатаційні показники: теоретичний, ефективний та електричний холодильні коефіцієнти $\varepsilon_{т},\varepsilon_{е},\varepsilon_{ел.}$

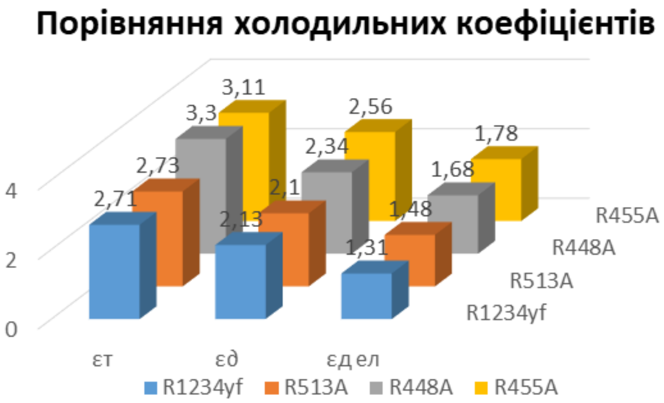


Рисунок 5 - Холодильні коефіцієнти

Розглянувши результати розрахунків параметрів холодоагентів у вузлових точках можна побудувати таблиці, графіки та гістограми для подальшого порівняння показників.

Висновки

Проведено порівняльний аналіз енергетичних характеристик при умові використання холодильних агентів R1234yf, R513A, R448A, R455A в інтервалі температур випарювання -25 ÷ +5 °C, який охоплює практично майже весь діапазон роботи суднових холодильних установок, провізійних камер та рефрижераторних контейнерів, впритул наближаючись до режимів роботи холодильних установок, систем комфортного кондиціювання повітря.

Для оцінки теплової ефективності можливо використовувати дійсний холодильний коефіцієнт та дійсний електричний холодильний коефіцієнти. Для оцінки енергетичних затрат на експлуатацію використовується показник ефективної потужності компресора.

По зазначеним показникам аналіз результатів розрахунків показує наступне: при температурі t_0= -15 °C найбільше значення холодильного коефіцієнту характерне для R448A та R455A.

Так, для температур кипіння близьких до -15 °C, для нових холодильних установок безумовно можна рекомендувати до використання R448, так як фактична потужність більша за R455A, та додавання холодоагенту в систему набагато простіше через спрощену складову суміші.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Галян І.С., Козьміних М.А. Ольшамовський В.С. Аналіз ефективності застосування сучасних холодильних агентів в транспортних холодильних установках. Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 38. –Одеса: НУ «ОМА», 2019.

2. Загоруйко В.О., Голіков О.А. Суднова холодильна техніка. –Київ: Наукова думка, 2000.

3. Козьміних М.А., Ольшамовський В.С. Удосконалення суднових систем вентиляції та комфортного і технічного кондиціонування повітря. Вчені записки таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського, серія: Технічні науки, том 31 (70) №1, 2020.

УДК 629.12.06:628.84

Матвієнко І. С., Голіков В. А.
Національний університет "Одеська морська академія"

Підвищення ефективності експлуатації суднових систем комфортного кондиціонування повітря

Актуальність теми дослідження полягає у тому, що до підвищення ефективності експлуатації систем кондиціонування застосовується системний підхід, який містить в собі: модернізацію обладнання (заміну старих компресорів на більш ефективні); оптимізацію роботи системи (налаштування параметрів, використання систем регулювання); покращення теплоізоляції корпусу, надбудов та вентиляційних каналів, а також впровадження відновлюваних зовнішніх джерел для живлення суднової системи комфортного кондиціонування повітря (ССККП).

Оптимальна комфортність мікроклімату визначається комплексом фізичних параметрів навколишнього середовища та індивідуальних особливостей людини, які забезпечують тепловий баланс без напруження механізмів теплового гомеостазу.

Більш детально, оптимізації підлягають: температура повітря(18 - 22°С - у холодний період року та 23-25°С,але не вище 28°С - у теплий період); відносна вологість повітря знаходиться в інтервалі 40 - 60%; швидкість руху повітря змінюється в діапазоні 0,1 - 0,4 м/с; радіаційний перепад | 4 - 7 °С|;якість повітря (хімічний склад) включає рівень кисню та концентрацію забруднюючих речовин (вуглекислого газу, легких органічних сполук,пилу,алергенів,тощо). Рівень CO_2 для оптимального комфорту та концентрації має нижче 800 ppm; індивідуальні (суб'єктивні) фактори,такі як,рівень фізичної активності (метаболізм) вимагає зниження температури повітря,одяг впливає на теплопередачу тіла, а акліматизація та індивідуальні особливості різних людей залежно від їхнього стану здоров'я, віку та місця народження вимагають зміну мікрокліматичних параметрів у широкому діапазоні [1, 2, 3].

У дослідженні використана схема розподіленої ССККП багато параметричного керування якістю та комфортністю повітря суднових приміщень [4].

Метою роботи стало обґрунтування вибору методики моделювання тепломасобмінних процесів у помешканнях танкера-газовоза.

Науковою гіпотезою стало те,що точність моделі повітря судна по каналах: температура, вологість, газовий склад визначаються ступенем захорощеності приміщень та якістю розподілу потоків повітря.

Головне завдання полягає у розробці методики моделювання статики та динаміки повітряних потоків в судновій надбудові в середовищі Simulink програмного пакету MatLab. Першою допоміжною задачею дослідження став аналіз підходів до динаміки моделювання параметрів повітря приміщень надбудови судна.

Другим допоміжним завданням стало аналіз моделювання процесів тепломасообміну у надбудові судна.

Третьою допоміжною задачею стало конструктивне моделювання елементів припливного повітря у надбудові. Синтез головного завдання передбачає побудову схемних рішень моделі ССККП з визначенням статичних і динамічних характеристик типового приміщення.

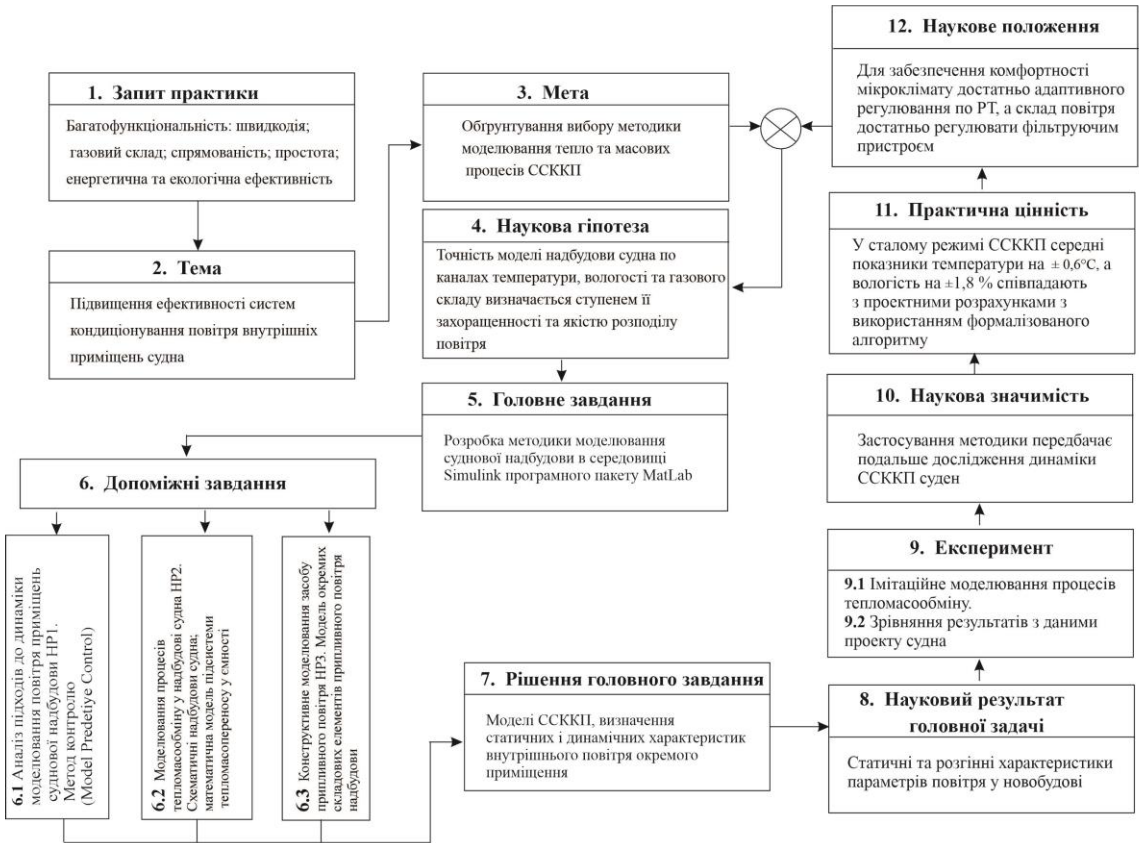


Рисунок 1. Технологічна карта дослідження

Рішення задач дослідження здійснено методом спостережень,теорії теплопередачі та подібностей. Спочатку були визначені статичні характеристики залежностей складових показників комфортності від параметрів зовнішньої атмосфери при змінних властивостях матеріалу жилих приміщень судна.

Науковим результатом рішення першої допоміжної задачі стала методика аналітичного визначення радіаційної температури в приміщенні на основі використання її середнього значення та результатів гармонійного аналіза, які забезпечують похибку не вище ± 1°С.

Рішення другого допоміжного завдання пов'язане з динамічним впливом теплового навантаження на жилі приміщення судна за часом з врахуванням характера щодобової зміни температури і інтенсивності сонячного випромінювання як складових теплового навантаження. Відповідно до теорії теплопередачі, тепловий потік крізь огорожувальні конструкції представлений у вигляді багатозмінної функції завдяки застосуванню апарата гармонічного аналізу. Науковим результатом рішення цієї задачі стала методика визначення параметрів теплового комфорту на судні у вигляді двох гармонік розкладених в ряд Фур'є.

Рішення третьої допоміжної задачі пов’язаною стабілізації параметрів мікроклімату: температури, вологості повітря, його рухомості та радіаційної температури при заданій результуючий температурі (РТ). Для цього застосований принципи та закони регулювання відомі з теорії автоматичного регулювання і представлене у вигляді передаточних функцій.

Науковим результатом рішення третьої задачі стали отримані статичні і динамічні характеристики та динамічна модель регулятора РТ з подальшою їх формалізацією в середовищі MatLab 6.5 - Simulink, які отримані методом найменших квадратів в аналоговому та цифровому вигляді при поступових, стрибкопідібних та імпульсних збуренням та теплових навантаженнях.

Рішення головного завдання пов'язане з диспетчерським контролем функціонування ССККП, автоматизацією, обробкою вимірювальної та нормативної інформації, проведенням необхідних обчислень в процесі аналіза режимів роботи у вигляді спеціального програмного комплексу(СПК). В рамках створення персонального обчислювального комп'ютера (ПОК) на етапі пошуку оптимального конструктивно-компоновочного рішення використаний алгоритм оцінки функціонально-технічних показників систем та їх агрегатів.

Наукова новизна рішення головної задачі дослідження полягає у побудові схемних рішень моделей ССККП надбудови оптимальних для теплового гомеостазу людини.

Наукова значимість дослідження полягає у застосуванні розробленої методики для подальшого дослідження динаміки перехідних процесів у всій надбудові судна.

Практична цінність дослідження полягає у визначенні похибок теплового режиму ССККП,яка складає | 0,6 °C| та її вологого режиму | 1,8 %|.

Наукове положення дослідження полягає у диспетчеризації процесу оптимального мікроклімату при забезпеченні мінімально-необхідних витрат енергії на повітря підготовку.

Висновки

1. Існуючі технічні рішення ССККП не заперечують взаємозв'язок технологічних систем і засобів управління при параметрах зовнішнього повітря,що суттєво відрізняються від розрахункових.

2. Вибір режима роботи і перехід з одного режиму на другий в центральному кондиціонері за мінімально-неминучими витратами забезпечується за алгоритмом,який забезпечується аналітичним або графоаналітичним методами у вигдяді I,t- Ed діаграм.

3. Оптимізація режимів роботи ССККП досягається забезпеченням мінімально- неминучого споживання енергії та комфортного мікроклімату в кондиціонованих приміщеннях судна по РТ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Білий В. А., Голіков В. А. Багатопараметричний підхід до забезпечення якості та комфортності повітря суднових приміщень: практичний підхід // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, N 4(487)/2021.

2. Білий В. А., Голіков В. А. Моделювання мікроклімату суднової надбудови в MatLab Simulink./ В. А. Білій, В. А. Голіков // Збірник наук. праць НУК ім. адм. Макарова, N 2, 2021, С. 36-45.

3.Bily,V.(2022). Modern approach to microclimate control on board ships.//Jornal of Polonia University,49 (6),p.146-153.ttps//doi.org/10.23856/4919.

4. Голіков В. А., Нікольський В. В., Нікольський М. В., Білий В. А. Системи управління судновими інтелектуальними двигунами внутрішнього згоряння: навч. посіб., НУОМА, Одеса, 2021.- 150с.

УДК 621.431.7.03-523.8-048.78

Назаренко М.С., Нікольский В.В.

Модернізація системи моніторингу параметрів суднового дизеля з електронним управлінням

Сучасні системи управління двигунами внутрішнього згоряння передбачають наявність системи моніторингу параметрів тиску газів в камері згоряння циліндру (PMI – Performance Measurement Indicator). На рисунку 1 представлено функціональну схему моніторингу параметрів суднового дизеля MAN-B&W типу ME [1-6].

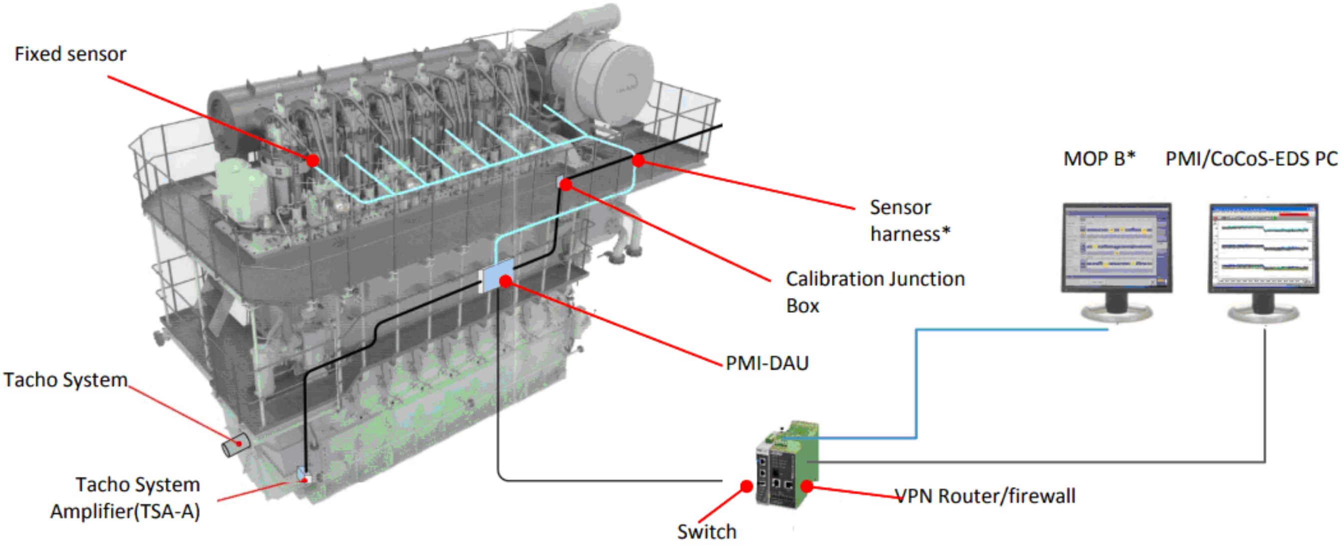


Рисунок 1 – Функціональна схема моніторингу параметрів суднового дизеля MAN-B&W типу ME

Суттєвим недоліком системи PMI є відсутність резервування датчиків тиску. Тобто, в традиційному представленні ієрархічних систем управління завжди передбачено подвійне резервування або дублювання всіх складових систем. Слід зазначити, що на сучасних підводних човнах передбачено, навіть, трьохкратне резервування/дублювання найбільш критичних компонентів.

В той же час, для спрощення системи PMI дублювання/резервування не використовується. Однак, судновласники інвестують в діагностичні системи для підтримки працездатності двигуна, а виробники двигунів оснащують сучасні ДВС системами самодіагностики та попередження про несправності. Популярні портативні діагностичні інструменти, такі як MarPRIME, IMES EPM-XP, DK-20, Premet X, LEMAG ECI і DEPAS 4.0 Handy вимірюють тиск газу та іноді включають в себе датчики вібрації для фаз газорозподілу і впорскування. Ці доступні системи підвищують ефективність двигуна, але зазвичай працюють уповільнено, вимагаючи аналізу даних після вимірювання.

В нашому регіоні для перевірки роботи системи PMI використовують мобільну систему D4.0H [7-9], яку обладнано ємнісним датчиком тиску та датчиком вібрації, що дозволяє значно збільшити об'єм інформації щодо роботи циліндро-поршневої групи.

Однак, використання таких «мобільних» систем потребує кваліфікованого втручання не тільки членів машинної команди, а й експертів.

Нами пропонується модернізація системи моніторингу параметрів суднового дизеля з електронним управлінням, зокрема вимірювання тиску в циліндрах, за рахунок встановлення додаткових датчиків тиску, або конструктивної зміни складу штатних датчиків для забезпечення дублювання/резервування їх роботи. Крім того, можливе проведення самодіагностики датчиків тиску.

Ключові слова: Performance Measurement Indicator, ємнісні датчики тиску газів в циліндрі, п'єзоелектричні перетворювачі, суднові ДВЗ з електронним управлінням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. MAN B&W G70ME-C9.5-GI-TII. Project Guide. – Копенгаген: MAN Diesel & Turbo, 2020. 478 с.

2. MAN Energy Solutions. Service experience – two-stroke technologies. – Копенгаген: MAN Diesel & Turbo, 2020. – 52 с. Режим доступу: www.man es.com.

3. MAN Energy Solutions. Power into the future. – Копенгаген: MAN Diesel & Turbo, 2020. – 16 с. Режим доступу: www.man-es.com.

4. Vitalii Nikolskyi, Mykola Slobodianiuk, Maksym Levinskyi, Mark Nikolskyi Wireless Remote Control Systems Of Marine Diesel Engine, Helsinki, 12 p. (in print).

5. Голіков В.А., Нікольський В.В., Левінський М.В., Нікольський М.В., Слободянюк М.В. Модернізація системи віддаленого управління та контролю аварійного дизель-генератора навчального машино-котельного відділення / Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 44. - Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С. 64 – 70.

6. Кузьмінський Б.В. Вдосконалення системи моніторингу параметрів суднового дизеля: робота магістра 271. – Одеса, 2024. – 82 с.

7. Korczewski, Z., Rudnicki, J., Varbanets, R. & Minchev, D. (2025). Multi-Symptom Diagnostic Investigation of the Working Process of a Marine Diesel Engine: Case Study Part 1 Measurement Diagnostics. Polish Maritime Research, 32(2), 2025, pp. 50-61. https://doi.org/10.2478/pomr-2025-0020.

8. Varbanets, Roman, Minchev, Dmytro, Kucherenko, Yury, Zalozh, Vitalii, Kyrylash, Olena and Tarasenko, Tetyana. "Methods of Real-Time Parametric Diagnostics for Marine Diesel Engines" Polish Maritime Research, vol.31, no.3, 2024, pp.71-84. https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037.

9. Roman Varbanets; Dmytro Minchev; Iryna Savelieva; Andriy Rodionov; Tatiana Mazur; Sviatoslav Psariuk; Vyacheslav Bondarenko. Advanced marine diesel engines diagnostics for IMO decarbonization compliance. Transport, Ecology, Sustainable Development: EKO Varna 2023 AIP Conf. Proc. 3104, 020004-1–020004-10; https://doi.org/10.1063/5.0198828.

УДК 656.5:656.63

Петрусенко О.Д., Шумілова К. В.
Національний університет «Одеська морська академія»
Навчально-науковий інститут інженерії

Ефективність перспективи переведення флоту на використання низьковуглецевого або безвуглецевого палива

Світова морська галузь відіграє ключову роль у міжнародній економіці, забезпечуючи понад 80% світової торгівлі. Проте на неї припадає близько 2,8% глобальних викидів парникових газів. В умовах посилення кліматичних викликів та прагнення досягти нульових викидів до 2050 року Міжнародна морська організація (ІМО) наголошує на необхідності декарбонізації судноплавства [1-3].

Залежність морської галузі від важкого нафтового палива (ВНП) є критичною проблемою, оскільки спалювання ВНП сильно забруднює навколишнє середовище. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), для досягнення нульового рівня викидів необхідно скоротити ці викиди на 15% до 2030 року [4].

Екологічність роботи морських суден, яка оцінена за величиною викидів оксидів азоту, сірки та вуглецю в атмосферу, досліджена в роботі [5]. При цьому запропоновано варіант регулювання морського переходу, що забезпечує безперебійну роботу енергетичної установки судна на біодизельному (екологічному) паливі.

Для забезпечення виконання вимог конвенції МАРПОЛ щодо концентрації оксидів азоту у вихлопних газах в дослідженні [6] розглянуто систему перепуску вихлопних газів суднового двигуна, з метою визначення їх оптимального обсягу, при якому забезпечується мінімальна концентрація оксидів азоту у вихлопних газах.

Отже, основним напрямом декарбонізації судноплавства є перехід на низьковуглецеві та безвуглецеві види палива для досягнення «нульового рівня викидів» в атмосферу у майбутньому [7].

Термін «нульовий рівень викидів» означає, що всі антропогенні викиди парникових газів, що залишилися, повинні бути компенсовані видаленням вуглецю з атмосфери.

Паливо з нульовим вмістом вуглецю (безвуглецеве) – це паливо, вироблене з відновлюваних джерел (гідро-, вітро- або сонячної енергії), може бути перспективним варіантом для морського транспорту.

Стосовно морського транспорту це паливо буває двох видів:

1) *E-Hydrogen* **(водень)** або *E-Ammonia (е-аміак)* – вимагають будівництва нових суден і створення інфраструктури постачання або переобладнання існуючих;

2) вуглеводневе Е-паливо у вигляді *E-Diesel* або *E-LNG* – повністю змішується з викопними аналогами, такими як MGO (морський газойль, Marine Gas Oil) і LNG (зріджений природний газ, Liquefied Natural Gas), і

може використовуватися на існуючих суднах без будь-яких модифікацій або створення нової інфраструктури.

Крім E-Diesel і E-LNG, E-Methanol також привернув увагу як майбутнє паливо для морського сектора. Метанол – це рідке паливо, яке можна зберігати аналогічно дизельному паливу.

Низьковуглецеве паливо (Low Carbon fuels) [8] – поняття, яке використовується як для біопалива, так і для викопного палива. Воно має нижчі викиди парникових газів на одиницю енергії, ніж звичайне дизельне паливо MGO або бункерне паливо, таке як мазут HFO (Heavy Fuel Oil) та паливо з низьким вмістом сірки VLSFO (Very Low Sulfur Fuel Oil).

До альтернативних видів морського палива належать скраплений природний газ (СПГ), біопаливо, метанол, аміак, водень, синтетичні вуглеводні та електропаливо (E-fuels), вироблене з відновлюваної енергії. Ключовими критеріями їх оцінки є енергетична щільність, екологічність, безпечність та сумісність з існуючою інфраструктурою (рис. 1) [7].

Рис.1. Альтернативні види палива для суден

Скраплений природний газ розглядається як проміжне рішення у процесі переходу на чисті джерела енергії. Його використання дозволяє скоротити викиди CO_2 на 50% у порівнянні з важким нафтовим паливом.

Біо-СПГ і синтетичний СПГ мають ще нижчий вуглецевий слід та можуть застосовуватись без змін у системах зберігання й транспортування.

Метанол є екологічно чистим паливом, що не містить сірки й виробляє мінімальну кількість оксидів азоту. Біометанол, отриманий з біомаси або «зеленого» водню довів свою ефективність у судноплавстві – у 2023 році судно Cajun Sun успішно здійснило рейс на біометанолі. Водень і аміак вважаються найчистішими видами палива з нульовим рівнем викидів CO_2. Вони виробляються з відновлюваних джерел енергії, однак впровадження цих видів палива стикається з труднощами, пов’язаними з безпечним зберіганням, транспортуванням і потребою у спеціальній інфраструктурі.

Електричні батареї: на суднах така відновлювана електроенергія від гідро-, сонячної або вітрової енергії в поєднанні з бортовими батареями може забезпечити невеликі рейсові цикли на автомобільних поромах, а також міжнародні переправи на суднах Ro-Pax тривалістю кілька годин.

Згідно з дослідженнями SINTEF Ocean (науково-дослідний інститут - лідер у галузі морських технологій та біоморфних досліджень, Норвегія), виробництво електропалива потребує великих обсягів відновлюваної енергії. Для забезпечення морського транспорту Е-аміаком або Е-метанолом потрібно стільки енергії, скільки нині виробляє весь світовий сектор «зеленої» енергетики.

Порівняння альтернативних видів палива показує, що електропаливо «E-fuels» (рис. 2) може повністю усунути викиди парникових газів, але при цьому вимагає вдвічі або навіть утричі більших енергетичних витрат, порівняно з традиційним паливом. Таким чином, постає питання доцільності використання таких обсягів енергії саме у морському секторі [7].

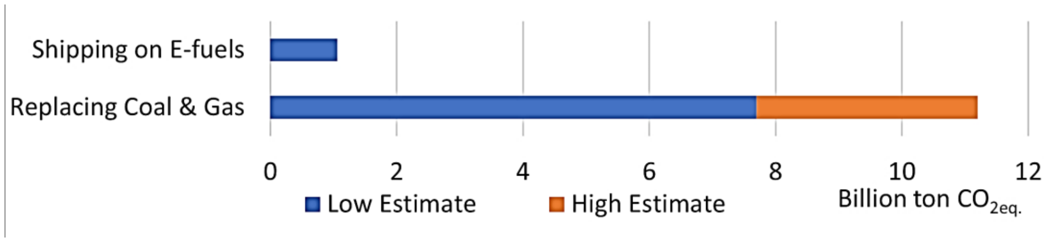
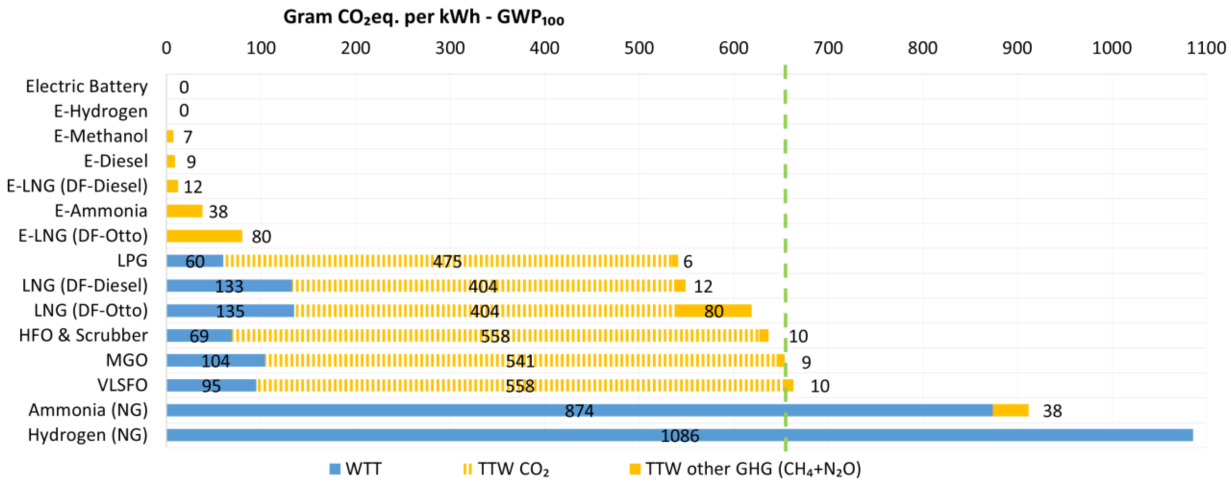


Рис. 2. Порівняння потенційного скорочення викидів парникових газів за рахунок альтернативного використання відновлюваної енергії

Тому, необхідно оновити попередню оцінку вартості, викидів парникових газів та використання енергії альтернативних видів палива і технологій двигунів для декарбонізації судноплавства (рис. 3).



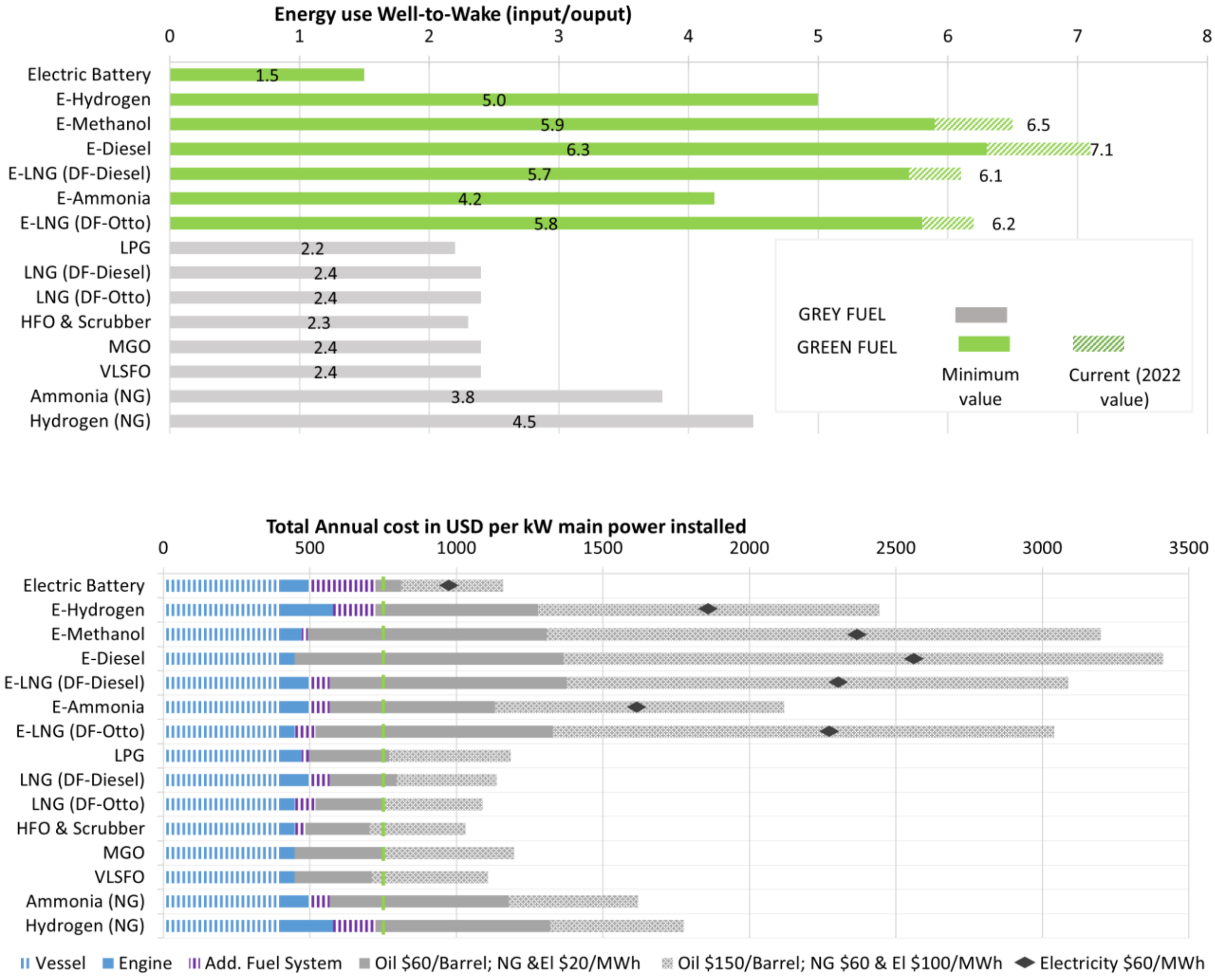


Рис. 3. Порівняння викидів парникових газів, енергоспоживання та вартості альтернативних видів морського палива

По-перше: Е-паливо скорочує викиди парникових газів до 100% у порівнянні з викопним паливом.

По-друге: виробництво Е-палив вимагає великих витрат енергії, і якщо вони будуть повністю розгорнуті в морському транспорті, то для Е-водню і Е-аміаку частка морського транспорту у світовому споживанні енергії подвоїться з приблизно 3% до 6%, а для вуглеводневого Е-палива вона майже потроїться до 9%.

По-третє: Е-паливо – коштовне у виробництві, і навіть при досить помірних цінах на електроенергію, тобто близько 60 дол. США/МВт-год, *загальна річна вартість судна подвоїться при використанні Е-водню та Е-аміаку і потроїться при використанні Е-СПГ, Е-метанолу та Е-дизеля*.

Наприклад, річні витрати на суховантаж Supramax (63 000 тонн) становлять:

- близько 6 млн доларів США – при експлуатації на звичайному паливі (капітальні витрати + експлуатаційні витрати + паливо);
- близько 12 млн доларів США – при експлуатації на водні або аміаку;

- близько 18 млн доларів США – при експлуатації на СПГ, метанолі та дизельному паливі.

Згідно з четвертим дослідженням IMO щодо парникових газів, морський транспорт викинув 1056 мільйонів тонн CO2 у 2018 році при спалюванні близько 330 мільйонів тонн палива, що еквівалентно 14 ексаджоулям (ексаджоулі – енергетична одиниця). Якщо просто припустити, що ККД теплового двигуна з електронним паливом такий самий, як і з традиційним паливом, то необхідна кількість відновлюваної електроенергії складе:

***Е-аміак*:** 14 ЕДж * 4,2/2 = 29 ЕДж;
Електронний дизель: 14 ЕДж * 7,1/2 = 50 ЕДж

Отже, 29 ЕДж мають ту саму величину, що й нинішнє світове виробництво відновлюваної електроенергії, а також ту саму величину, яка необхідна для заміни світової вугільної генерації.

Технологія захоплення і зберігання вуглецю CCS (Carbon Capture and Storage) [9] дозволяє щорічно висмоктувати з атмосфери мінімум 35,5 млрд. тонн вуглекислого газу, щоб запобігти подальше потепління.

Це приблизно загальна кількість вуглекислого газу, який світова промисловість викинула в атмосферу в 2018 році. За даними Business Insider в Канаді, США та Швейцарії вже існують станції, які висмоктують вуглекислий та зберігають вуглець глибоко під землею в колишніх нафтових і газових родовищах або в спеціальних контейнерах, наповнених водоростями, які поглинають вуглекислий газ (рис. 4).

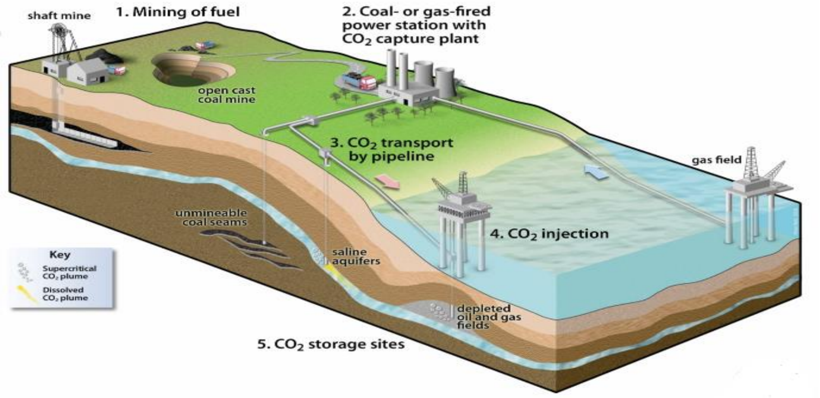


Рис. 4. Електростанція, оснащена системою CCS

Це технологія, яка в енергетичному секторі навряд чи буде застосовуватися масово.

Регулювання та міжнародна стратегія декарбонізації

Європейський Союз і Велика Британія реалізують програми підтримки переходу на чисті види палива, зокрема FuelEU Maritime, яка передбачає зниження викидів на 15% до 2030 року та досягнення нульових показників до 2050 року. Британська стратегія декарбонізації спрямована на розвиток інфраструктури для водню, аміаку, метанолу та біопалива. Модель прогнозує зниження викидів на 0,4 млн т CO_2 у 2030 році, 3 млн т у 2040 році та 2,8 млн т у 2050 році [8]. Водночас існують суттєві бар’єри: висока собівартість виробництва, обмежені запаси відновлюваної енергії, недостатня кількість потужностей для зберігання та бункерування палива, а також відсутність єдиних міжнародних стандартів.

Висновки

Перехід морського флоту на низьковуглецеве та безвуглецеве паливо є одним із найважливіших етапів у боротьбі з кліматичними змінами: СПГ, метанол, водень, аміак і біопаливо мають потенціал істотно скоротити викиди CO_2 [9]. Однак ефективність цього процесу залежить від розвитку інфраструктури, економічної підтримки та міжнародної координації. Впровадження екологічних технологій у судноплавстві дозволить зменшити шкідливі викиди, забезпечити стійкий розвиток галузі та зробити морський транспорт екологічно безпечним і конкурентоспроможним у майбутньому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шумілова К. В. Декарбонізація судноплавства – шляхи переходу на альтернативну енергетику. Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції, MPP&O-2021. Одеськ. нац. мор. ун-т. – Х.: Видав. Іванченка І. С., ISBN 978-617-7879-69-4, 2021. – С. 123-130. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681

2. Шумілова К. В., Шумілов Д. І. Багатоаспектний вплив судноплавства і діяльності людини в ракурсі парадигми управління ресурсами світового океану. Суднові енергетичні установки. – Одеса: НУОМА, 2023, Вип. 47. − С. 217-230. https://doi.org/10.31653/smf47.2023.217-230

3. Мельник О., Волошин А., Корякін К., & Щенявський Г. (2022). Проблеми забруднення атмосферного повітря морським транспортом. Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (August 5, 2022; Lisbon, Portugal), 89–91. Retrieved from https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/363

4. LNG and Beyond: Exploring Sustainable Fuels in the Marine Industry. URL: https://www.johncrane.com/en/resources/blog/lng-and-beyond-exploring-sustainable-fuels-in-the-marine-industry

5. Sagin S.V., Sagin, S. S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píštěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy*, Elsevier, 2024, vol. 224(C).

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

7. Zero Carbon E-Fuels: Are they sustainable for maritime transport? URL: ttps://surli.cc/elqput

8. Carbon Capture and Storage (CCS). URL: https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/carbon-capture-and-storage-(ccs).aspx

9. Maritime Decarbonisation Strategy. URL: https://surl.lu/incftm

10. Шумілова, К., & Константінов, О. (2025, жовтень 16). Екологічні та інноваційні рішення для зменшення впливу суднового палива на морське середовище. Друга Всеукраїнська науково-практична конференція «Сталий, інклюзивний, смарт розвиток: наукові підходи до вирішення сучасних глобальних і локальних викликів», Тернопіль. https://doi.org/10.5281/zenodo.17370612

УДК 656.5:656.63

Сальніков В. О., Шумілова К. В.
Національний університет «Одеська морська академія»
Навчально-науковий інститут інженерії

Використання скруберних систем для скорочення викидів со$_2$ на великотоннажних танкерах

Сучасне морське судноплавство стоїть перед необхідністю радикального переосмислення підходів до експлуатації суден через посилення екологічних вимог та зростання обсягів морських перевезень. Великотоннажні танкери, що становлять значну частину світового флоту, потребують впровадження технологій, здатних суттєво знизити шкідливий вплив на довкілля. Серед доступних рішень скруберні системи привертають увагу судновласників як один із практичних інструментів відповідності міжнародним нормам.

Танкерний флот традиційно використовує паливо з високим вмістом сірки, що призводить до значних викидів оксидів сірки та інших забруднювачів атмосфери. Міжнародна морська організація встановила жорсткі обмеження на вміст сірки в паливі, що змусило судновласників шукати технічні рішення для дотримання нових стандартів для декарбонізації судноплавних процесів [1-4]. Скруберні установки дозволяють продовжувати використання традиційного палива, одночасно очищаючи відпрацьовані гази перед їх викидом в атмосферу. Ця технологія базується на принципі абсорбції шкідливих речовин промивною рідиною, зазвичай морською водою або лужним розчином.

Функціонування скруберних систем на танкерах передбачає пропускання відпрацьованих газів через спеціальну камеру, де відбувається їх контакт з промивною рідиною. Під час цього процесу оксиди сірки розчиняються у воді, утворюючи сульфати, які згодом можуть бути нейтралізовані або відфільтровані.

У морських скруберних системах (рис. 1) для видалення сірки з газів зазвичай використовується вапно або каустична сода. Після очищення утворюються солі на основі сірки. Ці солі не становлять загрози для навколишнього середовища. Тому вони швидко викидаються.

Система включає насосне обладнання, контрольно-вимірювальні прилади та систему підготовки промивної води.

Всередині скруберів присутні насадочні шари для максимізації часу впливу між очисним матеріалом і газом. Всередині цих насадочних шарів присутні реагенти для видалення газоподібних забруднюючих речовин. Мета насадочних шарів – уповільнити вертикальний потік очисних рідин і прискорити процес нейтралізації.

Вибір конкретного типу скрубера залежить від характеристик судна, маршрутів плавання та фінансових можливостей судновласника. Різні типи скруберних систем мають специфічні характеристики, що визначають доцільність їх застосування на конкретних суднах (табл. 1).

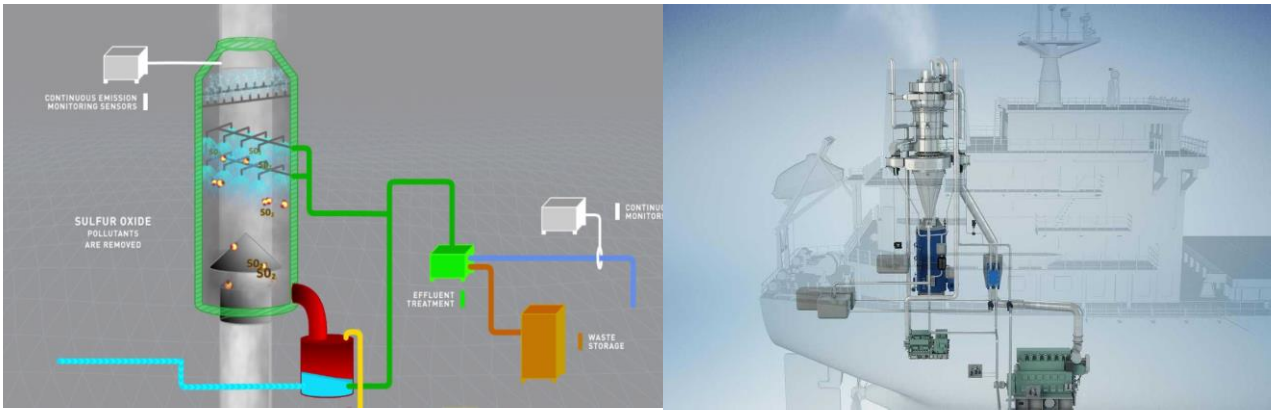


Рис. 1. Скруберна система на морських суднах

Таблиця 1. Порівняльна характеристика типів скруберних систем для великотоннажних танкерів

Параметр	Відкрита система	Замкнута система	Гібридна система
Промивна рідина	Морська вода	Прісна вода з лужним розчином	Обидва варіанти
Капітальні витрати	1,0-2,5 млн USD	2,5-5,0 млн USD	3,0-6,0 млн USD
Споживання електроенергії	200-400 кВт	150-300 кВт	200-450 кВт
Споживання прісної води	Відсутнє	0,3-0,5 т/год	0-0,5 т/год
Скид промивної води	За борт	У накопичувальний танк	Залежно від режиму
Ефективність очищення SO_x	95-98%	95-99%	95-99%
Обмеження використання	Заборонена у деяких портах	Без обмежень	Без обмежень
Термін окупності	2-4 роки	4-6 років	3-5 років
Складність обслуговування	Низька	Середня	Висока
Вплив на морське середовище	Потенційно високий	Мінімальний	Залежно від режиму

Наведені дані демонструють суттєві відмінності між типами скруберних установок, що безпосередньо впливають на рішення судновласників про вибір обладнання. Відкриті системи виявляються найдешевшими у встановленні та найпростішими в експлуатації, проте їхнє використання обмежується регуляторними заборонами у певних акваторіях та портах. Замкнуті системи потребують більших початкових інвестицій та мають додаткові операційні витрати на придбання хімічних реагентів, однак забезпечують повну свободу плавання без обмежень. Гібридні установки поєднують переваги обох типів, надаючи можливість перемикання між режимами залежно від району плавання, що робить їх універсальним рішенням для танкерів з різноманітними маршрутами.

Аналіз ефективності очищення показує, що всі типи систем забезпечують відповідність міжнародним нормам щодо вмісту сірки у викидах, досягаючи показників понад 95 %. Розбіжності у споживанні електроенергії пов'язані з різницею у конструкції насосного обладнання та необхідністю додаткової обробки промивної рідини у замкнутих системах. Термін окупності інвестицій безпосередньо корелює з інтенсивністю експлуатації судна та різницею у вартості палива на момент роботи, тому для танкерів з тривалими рейсами навіть дорожчі системи можуть виявитися економічно виправданими. Складність обслуговування зростає від відкритих до гібридних систем, що необхідно враховувати при плануванні підготовки екіпажу та організації технічного забезпечення судна.

Техніко-економічний аналіз застосування скруберних установок на танкерах показує неоднозначну картину. З одного боку, початкові капітальні витрати на встановлення обладнання становлять суттєву суму, що може перевищувати мільйон доларів залежно від розміру судна та типу системи. З іншого боку, можливість використання дешевшого палива з високим вмістом сірки створює передумови для окупності інвестицій протягом декількох років експлуатації. Різниця у вартості між паливом з низьким вмістом сірки та традиційним мазутом може досягати значних величин, що робить скрубери економічно виправданим рішенням для суден з інтенсивним режимом роботи [5, с. 242].

Модернізація танкерів не обмежується лише встановленням скруберів, а часто супроводжується комплексним оновленням систем судна. Впровадження електроприводу для вантажної системи танкера може підвищити енергоефективність усього судна, створюючи синергетичний ефект разом зі скруберними установками. Електрифікація обладнання дозволяє точніше контролювати споживання енергії та оптимізувати роботу допоміжних механізмів. Інтеграція різних систем модернізації вимагає ретельного планування та координації, проте результатом стає судно з покращеними екологічними характеристиками та нижчими експлуатаційними витратами [6, с. 21].

Екологічні аспекти використання скруберних систем викликають дискусії у морській спільноті. Хоча технологія ефективно знижує викиди в атмосферу, виникає питання щодо впливу відпрацьованої промивної води на морське середовище. Скинута за борт вода містить розчинені сполуки сірки та інші речовини, що потенційно можуть впливати на морські екосистеми, особливо у прибережних зонах та портах. Деякі регіони вже запровадили обмеження на використання відкритих скруберних систем, вимагаючи від суден встановлення замкнутого циклу очищення або переходу на чисте паливо. Розвиток нормативної бази продовжується, і судновласники мають враховувати можливі зміни регуляцій при прийнятті рішень про інвестиції у скруберні технології.

Експлуатаційний досвід танкерів зі скруберними системами показує необхідність підготовки екіпажу до роботи з новим обладнанням. Складність сучасних систем очищення вимагає від моряків розуміння принципів функціонування, вміння проводити поточне обслуговування та реагувати на несправності. Використання тренажерного обладнання дозволяє підготувати персонал без ризиків для реального судна та довкілля. Симуляційні системи відтворюють різні режими роботи скруберів, аварійні ситуації та процедури технічного обслуговування, забезпечуючи екіпаж практичними навичками перед виходом у рейс [6, с. 47].

Перспективи розвитку скруберних технологій пов'язані з підвищенням ефективності очищення, зниженням енергоспоживання та мінімізацією впливу на морське середовище. Дослідження нових промивних розчинів, оптимізація конструкції камер та впровадження систем моніторингу в реальному часі можуть зробити скрубери ще привабливішим варіантом для судновласників. Розвиток альтернативних палив та силових установок не відміняє актуальності скруберних систем, оскільки перехід галузі на нові технології відбуватиметься поступово протягом десятиліть. Комбінований підхід, що поєднує різні методи зниження викидів, дозволить морській індустрії відповідати екологічним вимогам без кардинального порушення логістичних ланцюгів [7].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шумілова, К., & Константінов, О. (2025, жовтень 16). Екологічні та інноваційні рішення для зменшення впливу суднового палива на морське середовище. Друга Всеукраїнська науково-практична конференція «Сталий, інклюзивний, смарт розвиток: наукові підходи до вирішення сучасних глобальних і локальних викликів», Тернопіль. https://doi.org/10.5281/zenodo.173706122.
2. Шумілова К. В. Декарбонізація судноплавства – шляхи переходу на альтернативну енергетику. Матеріали ІІІ Міжнародної науково-практичної морської конференції, MPP&O-2021. Одеськ. нац. мор. ун-т. – Х.: Видав. Іванченка І. С., ISBN 978-617-7879-69-4, 2021. – С. 123-130. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681
3. S. Hordiiuk, K. Shumilova. Navigation from the future point of view of global climate protection. International Scientific and Technology Conference «Navigation, shipping and technology», 18-19th November, 2021, Odessa: NU «OMA». – C. 114-115. http://www.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2021/12/ISCT-NST-novyjSformuloj.pdf
4. Колебанов О. К., Поливода В. В., Омельчук А. А. Дослідження можливості застосування електроприводу для модернізації вантажної системи танкера // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. – 2019. – № 1 (68). – С. 19-24.
5. Удолатій В. Скруберні системи: техніко-економічні та екологічні аспекти // *Collection of scientific papers «ΛΌГОΣ»* : proceedings of the International Scientific and Practical Conference, May 24, 2024, Zurich, Switzerland. – Zurich, 2024. – С. 240–246.
6. Gerganov L. D., Yagupov V. V. Досвід і перспективи застосування сучасного тренажерного обладнання у навчально-тренувальних центрах морського профілю // *Information Technologies and Learning Tools*. – 2020. – Vol. 78, No. 4. – P. 47.
7. Maritime Decarbonisation Strategy. URL: https://surl.lu/incftm

УДК 629.5:621.565:620.9

Ткачов Т.І., Хлієва О. Я.
Національний університет «Одеська морська академія»

Аналіз впливу температури забортної води на енергоефективність установки реконденсації парів LPG на танкерах-газовозах

Метою роботи був аналіз впливу температури забортної води на енергоефективність установки реконденсації нафтового газу на LPG-газовозі.

Об'єм вантажних танків (Cargo Capacity) для прийнятого судна-прототипу складає 79600 м^3**,** валова ємність (Gross tonnage) - 46250 тонн.

Витрата BOG з танків розраховується за нормою 0.025% за добу. Тобто 0,00025·46250=11,563 тонн/добу=482 кг/год. Процес скраплення пропану буде здійснюватися у процесі дроселювання попередньо стиснутого до певних тисків та сконденсованого забортною водою рідкого пропану. Після дроселювання рідкого насиченого пропану утворюється паро рідинна суміш з тиском, рівним тиску у танках збереження пропану.

Схема технологічного процесу традиційної системи повторного зрідження LPG на борту судна показана на рисунку 1 [1, 2].

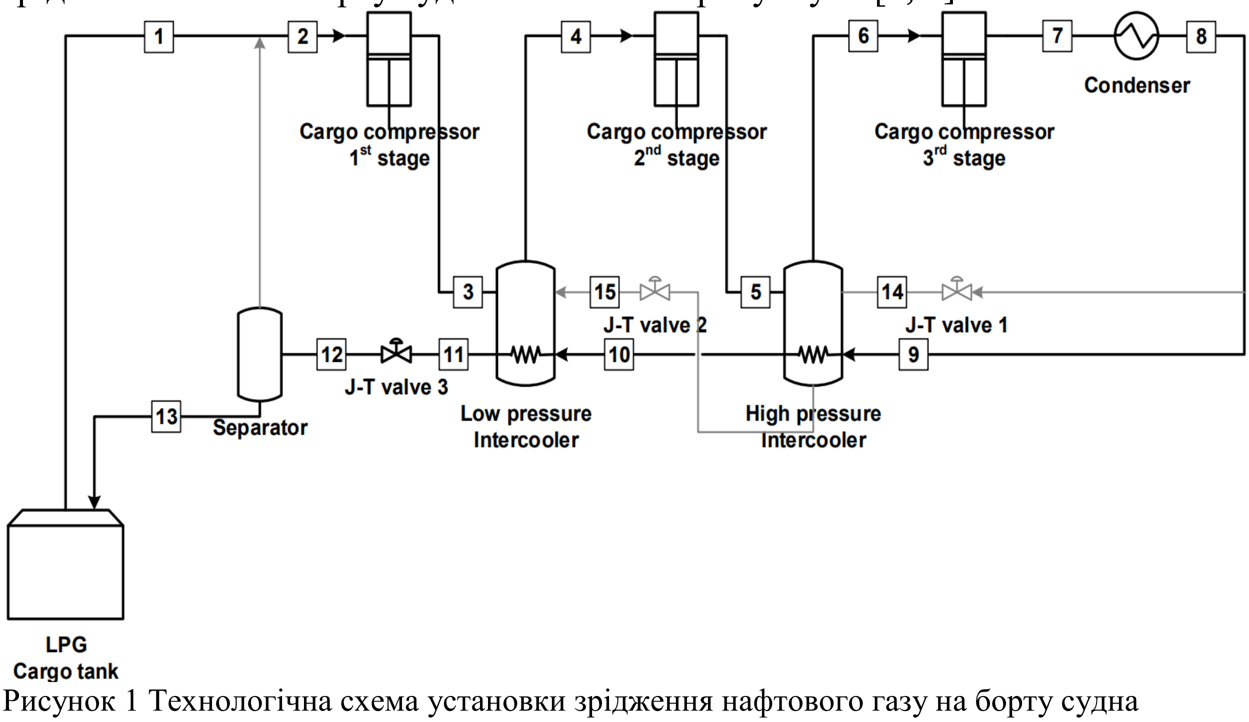


Рисунок 1 Технологічна схема установки зрідження нафтового газу на борту судна

При аналізі були виконані розрахунки енергетичних витрат під час процесів повторного зрідження LPG. Властивості LPG (розглядався чистий пентан) оцінювалися за допомогою програми RefProp [3]. Незважаючи на те, що склад зрідженого газу відрізняється залежно від газових родовищ, вимог споживачів і пори року, у цьому аналізі передбачалося, що це 100% пропан. Тиск зберігання LPG у вантажних танках приймається рівним 1 бар. Вважалося, що максимальна температура забортної води становить 32 °C, що є найвищою температурою за кодексом IMO, мінімальна температар прийнята рівною 8 °C (північні моря → тропіки). Тип вантажного компресора приймався поршневим, його ККД - 75%.

Результати розрахунку залежності питомих витрат електроенергії на роботу системи реконденсації нафтового газу від температури забортної води, що охолоджує конденсатор у діапазоні $t_{зв}$=8…32 °C наведені на рисунку 1.

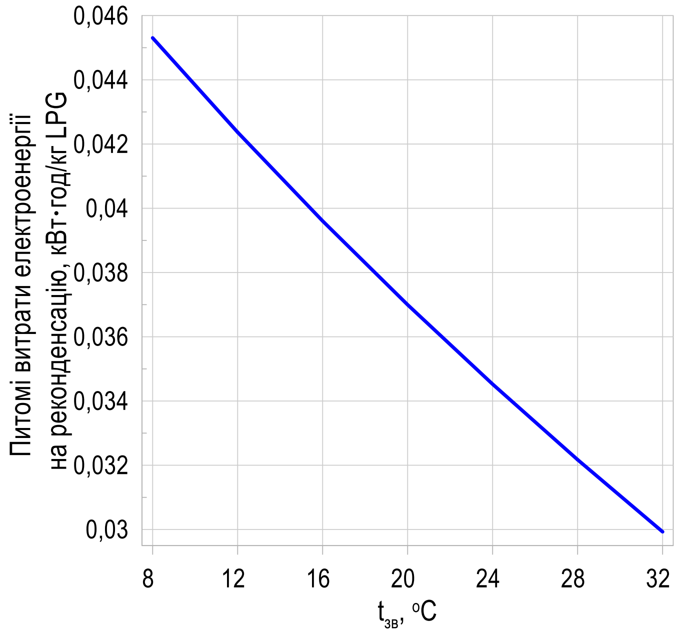


Рисунок 2. Залежність витрат електроенергії на роботу системи реконденсації нафтового газу від температури забортної води, що охолоджує конденсатор

Як видно з отриманих результатів (рис. 2), спостерігається практично лінійне зменшення питомих витрат із приблизно 0,045 до 0,030 кВт·год/кг нафтового газу. Узагальнено цю залежність можна апроксимувати рівнянням:

e_{rec}≈0,050 − 0,000625 $t_{зв}$ (кВт·год/кг нафтового газу).

Тобто середній градієнт приблизно 0,625 кВт·год/т LPG на кожен 1 °C зміни температури забортної води.

З інженерної точки зору така залежність відображає зміну термодинамічних умов конденсації/відведення теплоти в контурі реконденсації за прийнятих у моделі припущень. При застосуванні результатів на реальних суднах слід враховувати вплив супутніх чинників (інтенсивність випаровування з вантажних танків, стан теплообмінників, алгоритми керування компресорами/дроселюванням тощо), які можуть змінювати характер отриманої залежності. Однак, чутливість енергоспоживання установки до зміни $t_{зв}$ є достатньо помірною. Це дає змогу оперативно оцінювати потребу в електричній потужності системи під час переходів між регіонами з різними гідрометеорологічними умовами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cargo Handling Systems for LPG, LNG, NH3 & Ethylen. WÄRTSILÄ Gas Solutions. 2015.

2. Seo Y., Kim J., Park E., Lee J., Cho M., Han, S. Analysis of energy consumption of novel re-liquefaction system integrated with fuel supply system (FSS) for LPG-Fuelled LPG carrier to conventional systems. *Energies*. 2022. Vol. 15(24). 9384.

3. Lemmon E. W., Bell I. H., Huber M. L., McLinden M. O., NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, NIST, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018.

УДК 629.5

Янцелевич О.С., Сагін С.В.
Національний університет "Одеська морська академія"

Підтримання експлуатаційних характеристик суднових моторних мастил

Постановка проблеми в загальному вигляді. Пускові режими є найбільш відповідальними для будь-яких типів двигунів, в тому числі і суднових середньо-обертових дизелів (СОД). Підвищення їх надійності може бути досягнуто за рахунок вдосконалення функціонування циркуляційної мастильної системи дизеля за рахунок керування реологічними характеристиками мастильного матеріалу.

Остаточною фазою ремонтних докових операцій є спуск судна на воду. При цьому в повному обсязі закінчуються роботи по корпусної частині судна і гвинто-рульового комплексу. Однак можливі випадки, коли з тих чи інших виробничих чи експлуатаційних причин головний двигун (ГД) судна ще не готовий до роботи. Даний аспект суворо не регламентується в нормативних документах наглядових органів. Крім того, для суден, оснащених дизелями, що працюють на гвинт фіксованого кроку, введення в дію яких не планується в районі судноремонтного заводу, взагалі не розглядається до моменту ходових випробувань]. Якщо великотоннажні судна після закінчення докового ремонту виводяться на відкриту воду за допомогою портових засобів, то для суден малої та середньої водотоннажності можливий самостійний вихід за територію порту. Крім того, такі судна менш інерційні, а тому більш схильні до дії факторів, що обурюють, якими можуть служити випадкове хвилювання моря або помилка в буксируванні [1]. Все це ще раз підтверджує необхідність повної готовності комплексу ГД – ГКР до роботи при виході судна з доку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для суден середньої водотоннажності, що використовують як ГД СОД, що працюють на гвинт, крок якого регулюється (ГКР), питання підготовки дизеля та системи, що обслуговують його роботу, відносно до моменту виходу судна з сухого доку раніше розглядалися з позиції загального забезпечення суднової енергетичної установки (СЕУ) до експлуатації [2]. При цьому робота циркуляційних систем мащення вивчалась при умовах, що моторне мастило, що в них використовується, не підлягає ніякої додаткової обробки (зокрема введенню в нього поверхнево-активних речовин, що сприяють покращенню його реологічних характеристик). Також не розглядалась можливість модернізації вже існуючих мастильних систем з метою підвищення надійності їх роботи у випадку екстреного пуску дизеля [3].

Постановка завдання. Наведений огляд останніх досліджень свідчить про наявність невирішеної проблеми з можливості забезпечення додаткових маневрових якостей судна, а, отже, підвищення його керованості та живучості, що може бути досягнуте шляхом оптимізації експлуатаційних показників роботи циркуляційних систем мащення суднових дизелів

Виклад основного матеріалу дослідження. Експерименти, що пов'язані з даними дослідженнями, були проведені на судні водотоннажністю 9800 тонн. Як ГД на судні використовувався чотиритактний СОД Hanshin 6LF58 з номінальною потужністю 4410 кВт, що працює на ГРК [4].

Схема циркуляційної мастильної системи такого дизеля приведена на рис. 1. Призначення елементів схеми зрозуміло і не вимагає додаткових пояснень. Перед пуском ГД прокачується одним з мастильних насосів, який забирає мастило з стічного танка і через фільтр і охолоджувач мастила направляє його до поверхонь тертя дизеля. Дана стандартна схема подачі мастила володіє певним часовим інтервалом, що характеризує рух мастила по системі від вихідного патрубка насоса безпосередньо до контактуємих деталей дизеля. У режимі штатної підготовки дизельної установки до пуску даний параметр не має переважаючого значення, а сам процес прокачування мастилом має за мету не тільки збагачення поверхонь мастильною плівкою, а й прогрів дизеля. Крім того, прокачування дизеля мастилом починається задовго до безпосереднього пуску дизеля, особливо це відноситься до мало-обертових двотактних дизелів.

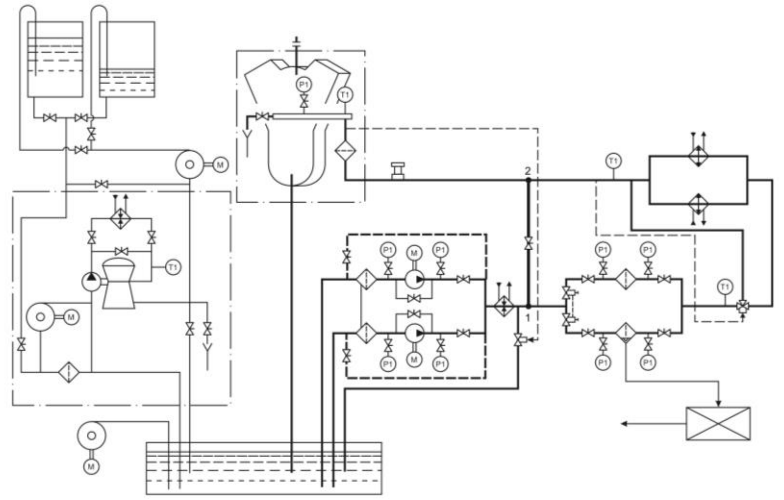


Рис. 1. Схема мастильної системи суднового дизеля Hanshin 6LF58

При режимах екстреного пуску час надходження мастила до вузлів тертя (в першу чергу до підшипників руху) має суттєве значення, а функціональність даного процесу перевищує фактор необхідності прогріву дизеля. У зв'язку з цим стандартна схема була дообладнана лінією 1-2. При цьому мастило, яке надходить з цієї магістралі, було піддано процесу управління реологічними характеристиками за рахунок використання поверхнево активних речовин, крім того штатна циркуляційна система була модернізована і по названої мастильної магістралі до елементів дизеля подавалося тільки свіже мастило. Слід зазначити, що мастило по магістралі 1-2 надходило до дизелю минаючи блок фільтрації та охолодження. З експлуатаційної точки зору це пояснювалося наступним. У момент пуску дизеля мастило, що знаходиться в системі, ще не володіє високими температурними значеннями і необхідність в його охолодженні відсутня. Безпосередньо на вході в дизель мастило проходить через мастильний фільтр, який забезпечує необхідний ступінь очищення, а сам процес фільтрації для режимів екстреного пуску можливо проводити без додаткового проходження мастила через штатну систему фільтрів. Крім того, при екстреному пуску дизеля було рекомендовано використовувати обидва мастильних насоса, при цьому їх паралельна робота підвищувала тиск мастила в системі і, відповідно, в парі тертя вал-вкладиш підшипника.

Безумовно, дані умови роботи мастильної системи відрізняються від «штатних». Перш за все, це пов'язано з необхідністю очищення мастила в фільтрах тонкого очищення, розташованих в «відсіченої зоні» системи. Однак, з огляду на відносну нетривалість даних умов роботи, а також переважаюче значення надійного пуску дизеля в екстрених умовах, вони можуть бути рекомендовані до експлуатації. Крім того, клапан, за допомогою якого в разі екстреного пуску мастило може бути переспрямовано по додаткової магістралі, може автоматично перекриватися при наборі дизелем мінімально стійкої частоти обертання, забезпечуючи таким чином, роботу мастильної системи в даному режимі лише певний час.

Неодмінним супутником пускових режимів роботи будь-якого механізму є режим напіврідинного або граничного тертя в його контактуємих елементах. Для суднових СОД найбільш відповідальними з таких вузлів є сполучення втулка-поршневі кільця, вал-вкладиш підшипника. У першому випадку на дзеркалі циліндрової втулки і особливо на поршневих кільцях залишається залишковий шар мастильної плівки, який здатний забезпечити необхідний режим тертя. У другому, після тривалого виведення дизеля з експлуатації гідравлічний підпір шийки вала в підшипнику припиняється і під впливом сил тяжіння відбувається просідання вала на ліжко підшипника, що призводить до витіснення мастильного матеріалу з сполучення. Таким чином, пуск суднового дизеля спочатку відбувається в режимі напіврідинного або граничного тертя. Ще більш ускладнюється забезпечення мастилом пари вал-вкладиш під час екстреного пуску, коли контактуємі елементи не прокачуються мастилом за допомогою мастильного насоса. На жаль, дані режими роботи можливі під час експлуатації суднового пропульсивного комплексу і один з таких випадків – спуск судна на воду із сухого доку. Можна стверджувати, що використання в суднових умовах пропонованих рішень призведе до більш якісного забезпечення мастилом елементів дизеля, які труться і підвищенню надійності його роботи [5, 6].

Для підтвердження цього припущення була проведена наступна серія експериментів.

Змазування деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) суднових чотиритактних ДВЗ відбувається розбризкуванням, а подача мастила до підшипників колінчастого вала здійснюється навішеним мастильним насосом, з чого випливає, що навіть при знаходженні дизеля в положенні «stand-bay» до пари колінчастий вал-вкладиш підшипника не здійснюється подача мастильного матеріалу. Пуск дизеля проводився стисненим повітрям з автоматичним перекладом на роботу на паливі при досягненні необхідної частоти обертання. Як контрольовані параметри визначалися: тиск мастила в системі змащення колінчастого вала, частота обертання колінчастого вала, середній індикаторний тиск. Слід зазначити, що тиск мастила в системі є одним з параметрів, за яким спрацьовує захист дизеля. Якщо протягом 8 секунд тиск в системі не досягає мінімально допустимої величини (3,6 кг/см^2), пуск дизеля припиняється навіть при досягненні необхідного числа обертів колінчастого вала. У разі експерименту на дизелі з модернізованою мастильною системою, тиск мастила знаходилося в межах 6...7 кг/см^2. Мастильний трубопровід, по якому мастило додатково подавалося до дизелю, був забезпечений електромагнітним відсічним клапаном і при досягненні дизелем мінімально стійкої частоти обертання (і відповідно введенням в дію навішеного мастильного насоса) здійснювалось його автоматичне закриття.

Результати проведених експериментів показані на рис. 2, *а*, *б*, де представлені залежності тиску в системі мащення колінчастого валу і частоти обертання валу в функції від часу [7, 8].

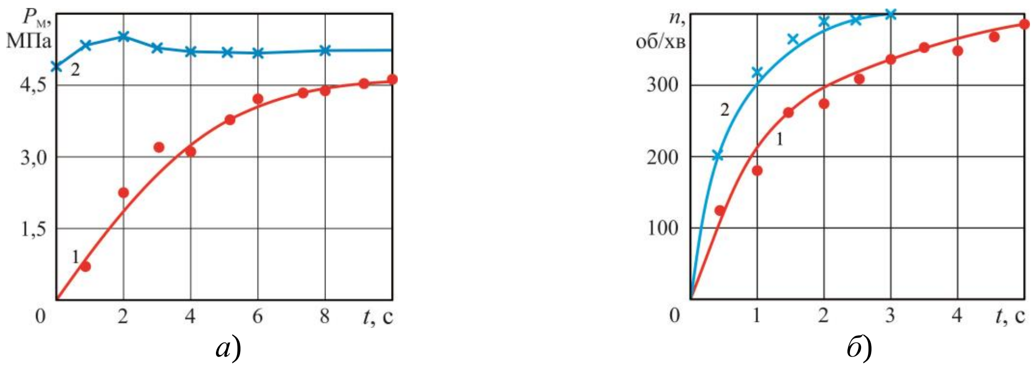


Рис. 2. Зміни в пусковий період роботи дизеля Hanshin 6LF58:
а – тиску мастила в системі циркуляційного мащення $p_ц$; *б* – частоти обертання колінчастого вала n;
1◦– штатна циркуляційна масляна система;
2 – модернізована циркуляційна масляна система

Крім того, на даному дизелі методом постійної витрати палива виконувалось визначення механічного коефіцієнту корисної дії ηm (рис. 2, г). Тривалість проведення цього експерименту вибиралася відповідно до часу спрацьовування поверхнево активних речовин присадки, яка додається у мастило.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Результати досліджень, що виконані, дозволяють зробити наступні висновки.

Додаткове забезпечення мастилом ще непрацюючого дизеля суттєво підвищує його надійність роботи. Більш швидка стабілізація тиску мастила в парі вал-вкладиш підшипника зрозуміла і пояснення не вимагає (рис. 2, а). Більш рання стабілізація частоти обертання валу дизеля в пусковий період, перш за все, пояснюється зниженням механічних втрат в дизелі (рис. 2, б).

Отримані результати можуть бути з достатньою достовірністю перенесені на випадок екстреного пуску суднового СОД, що використовується в як ГД.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛИТЕРАТУРИ

1. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26-32.doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698.

2. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 69 - 80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

3. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuˇcera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. Journal of Maritime Science & Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373

4. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 108 -119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

5. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics. Technology Audit and Production Reserves. – 2022. № 5(1(67)). – С. 22–32. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868.

6. Столярик Т.О. Прогнозування механічних втрат в суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 142-156. doi: 10.31653/smf44.2022.142-156.

7. Столярик Т.О. Прогнозування якісних характеристик роботи систем циліндрового мащення суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-141. doi:10.31653/smf46.2023.132-141.

8. 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). – 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.

UDC 621.1.016:629.5.03

Hlazyrin M., Khliyeva O., Tsynova M.
National University “Odessa Maritime Academy”

Analysis of the Influence of Operating Parameters on the Efficiency of Ship Heat Exchangers

The operational integrity of modern maritime vessels is critically dependent upon the functional reliability of its thermal management infrastructure, primarily executed through Heat Exchangers (HXs). These devices are integral to maintaining the thermal stability necessary for the main propulsion plant, auxiliary generators, and essential service systems. The transfer of thermal energy, typically from high-temperature working fluids to a cooling medium within the Internal Seawater System (ISS), is the core process under investigation [1].

The principal metric for assessing this performance is the Overall Heat Transfer Coefficient (U), which provides a holistic measure of the thermal conductance between the two fluid streams. Mathematically, the U value aggregates the resistances of the convective boundary layers, the conductive wall material, and, most critically in a marine environment, the resistance attributed to surface contamination, known as Fouling Resistance (R_f) [3]. The highly efficient architecture of modern ISS, frequently incorporating compact Plate Heat Exchangers (PHEs) paradoxically amplifies the system's sensitivity to even marginal increases in R_f and flow restriction. Fouling, the accumulation of organic or inorganic deposits, introduces significant thermal insulation and physically constricts fluid flow, representing the paramount factor in system degradation [3].

The necessity for this quantitative research is predicated on the severe, multi-faceted risks imposed by unchecked fouling within the ISS, risks which transcend routine maintenance concerns and directly influence safety, compliance, and financial solvency.

Fouling introduces a progressive decline in the Overall Heat Transfer Coefficient (U), leading to a corresponding and uncontrolled thermal load within critical cooling circuits [2]. This thermal escalation dictates the activation of the engine's Safety Management System (SMS), culminating in mandatory automatic load reduction (derating) or catastrophic total power loss [1]. Historical operational data, coupled with structural analysis, emphasizes that biofouling facilitates Microbiologically Influenced Corrosion (MIC), severely accelerating the degradation of pipework and heat exchanger plates, leading to structural impingement and leakage [1]. Physically, the accumulation of macrofouling in inflow structures (sea chests and strainers) imposes severe hydrodynamic resistance, demanding significantly increased pumping power and increasing the probability of acute system occlusion [2].

The consequences of performance degradation are directly translatable into substantial financial penalties within the commercial shipping sector. Fouling imposes tangible operational costs via elevated energy consumption due to the resistance encountered by pumps, in addition to the non-trivial expenses associated with unscheduled cleaning and component replacement [3].

The purpose of this study was the selection of a fresh water-overboard water (central cooler) plate-type heat exchanger, as well as the analysis of the operating modes of this heat exchanger in the presence of contamination on the heat exchange surface. The GEA NT250S heat exchanger (plate area 0.88 m2) in the marine version was adopted as a prototype. The area of the heat exchange surface is regulated by the number of plates, which was determined in the calculations. Based on the results of the calculation of the maximum thermal non-load (4700 kW), the required area of the heat exchange surface of 160 m2, the number of plates 184, the number of channels for each coolant 92 were obtained. The calculation and selection of the number of plates was carried out without taking into account the contamination layer.

Reduction of the heat transfer coefficient U due to contamination of the heat exchange surface will lead to a decrease in the amount of heat transferred in the heat exchanger and to a change in the temperatures of the heat carriers at the exit from the heat exchanger. In order to demonstrate the trend of the influence of pollution, using the example of the presence of a layer of carbonate deposits (scale) with thermal conductivity $\lambda \approx 1.2–1.5$ W/(m·K)) with a thickness of 0.5 mm on the surface of the heat exchanger from the side of the overboard water in comparison with the clean surface, an additional calculation was performed for the above-defined area of the heat exchange surface. Fig. 1 clearly demonstrates an approach to determining the heat load of the heat exchanger Q. To do this, two dependencies Q=f( ) were defined and plotted on the same graph. At the point of intersection of these dependencies, the heat load Q is determined by the temperature of the overboard water at the exit from the heat exchanger.

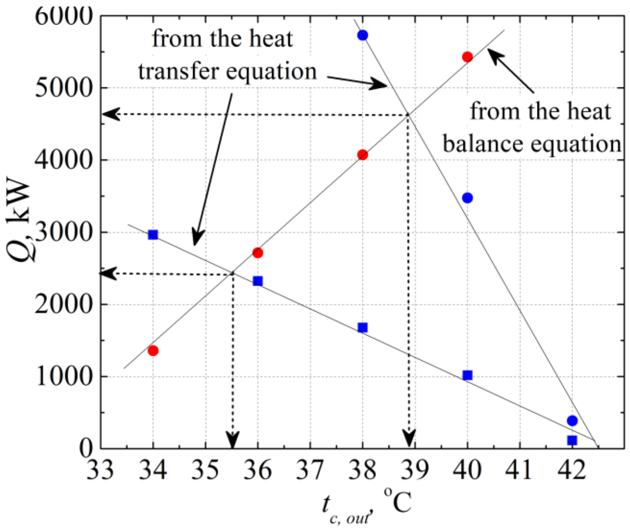


Figure 1 – Determination of the temperature of the off-board water (cold coolant) at the outlet of the heat exchanger and the amount of heat flow Q in the heat exchanger for the clean surface and for the surface with the scale layer on the side of the off-board water; blue round markers – clean surface, blue square markers – heat exchange surface with scale

It can be seen from Fig. 1 that the contamination of the heat exchange surface from the side of the overboard water very significantly reduces the heat flow transmitted in the heat exchanger and, as a result, the temperature at which the overboard water is heated and to which the fresh water is cooled also decreases (this is not shown in Fig. 1).

Since all calculations were performed using Excel, Q values were estimated more precisely using the «solution search function»:

- for frequent surface Q=4700 kW and temperature =38.9 °C;
- for contaminated surface Q=2450 kW and temperature =35.6 °C.

As you can see, the amount of heat transferred in the heat exchanger in the presence of a scale layer 0.5 mm thick is almost halved.

In addition, pressure losses (and, as a result, electricity consumption by pumps) increase significantly from 0.366 bar for a clean surface on the side of the overboard water to 0.588 bar for a contaminated surface.

Thus, the efficiency of ship heat exchangers is definitively governed by the control of fouling-induced flow restriction, establishing it as the most critical operational parameter for sustained performance. Effective fouling mitigation thus constitutes a critical pillar supporting operational efficiency, structural integrity, and financial performance.

REFERENCES

1. Davidson I, Cahill P, Hinz A, Kluza D, Scianni C and Georgiades E, (2021) A Review of Biofouling of Ships' Internal Seawater Systems.

2. Ian Davidson, Patrick Cahill, Arne Hinz, Robert Major, Daniel Kluza, Chris Scianni & Eugene Georgiades, (2023) Biofouling occlusion of ships' internal seawater systems: operational, economic, and biosecurity consequences, Biofouling,

3. Sergio García and Alfredo Trueba, (2019) Fouling in Heat Exchangers

4. GEA Heat Exchangers / GEA PHE Systems, 2011

UDC 629.5.064.3

Rudyk K., Khliyeva O., Tsynova M.
National University "Odessa Maritime Academy"

Fuel consumption analysis during different types of ship inert gas generators operation

Inert gas generation (IGG) systems are critically important for ensuring fire safety on tankers transporting petroleum products. In modern practice, two main types of such systems are predominantly used: the traditional inert gas generator (combustion-type IGG), which operates based on fuel combustion, and membrane installations for nitrogen production. Given the increasing demands for energy efficiency in maritime transport, especially in the context of implementing the IMO Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new vessels, a detailed analysis of both systems in terms of energy consumption is warranted [1].

Combustion-type IGG operates by burning fuel in a special chamber, after which the flue gases are cooled, purified, and delivered to the cargo tanks [2]. The composition of such gas predominantly includes CO_2, N_2, water vapour, and sulphur impurities, which necessitate purification that contributes to additional power consumption. The overall efficiency coefficient of such systems ranges from 15% to 30% [3].

Membrane nitrogen generators function on the principle of separating compressed air through a polymer membrane, allowing for the extraction of nitrogen with a purity of up to 99.9% [4]. These systems consume electrical energy to operate compressors and are considered not to produce harmful emissions, achieving efficiencies of up to 70% [5].

However, the above statement is not entirely accurate, as ship fuel is burned to operate the compressors on board the vessel. Moreover, it is not entirely clear how to compare the efficiency of combustion-type IGG and the nitrogen generator based on the data from [3] and [5]. Therefore, it is more appropriate to compare the fuel consumption of the two systems rather than the abstract concept of efficiency, which can be calculated differently for these systems.

The Nitrogen Generator model NCl type approved by DNV (produced by Air Products AS) was chosen for analysis. The operational principle is based on membrane separation. This PRlSM® Nitrogen system, based on PRISM® membranes, allows for continuous on-site production of pure and dry nitrogen from air that can cover various purposes.

Nitrogen generation is based on the following processes. Compressed air is fed to the Filter & Control Unit and passes through a filter-package which will protect the membranes from harmful particles and oil and water condensate. The air then passes through a heater (electric or heat exchanger type), which will raise the air temperature by min. 5°C to approx. 50°C. The heated air is now fed from the Filter & Control Unit to each Membrane Bank and then to each individual membrane separator. The nitrogen product exiting the membrane modules is collected in a manifold and fed back to the Filter & Control Unit. The Filter & Control Unit is equipped with an oxygen analyser that will continuously monitor the oxygen content in the nitrogen product. Should the oxygen content, for some reason, rise above the design value, an alarm will be initiated. If the nitrogen consumption is lower than the design, the backpressure in the distribution lines will build up and give a lower product flow. A lower flow in the tum will result in higher nitrogen purity, i.e. less oxygen in the product.

The electricity consumed in the production of nitrogen using the Nitrogen Generator, which is discussed in the paper, is used for the operation of the:

- compressor (the predominant part),
- electric heater for heating the airflow before the membranes,
- powering the control system (a small amount).

The Nitrogen Generator discussed has a water-cooled marine screw compressor DSDX 305 (KAESER compressor) installed. Their main characteristics are the following: max. working pressure 14 bar, min. working pressure 5,5 bar, free air delivery 1162 m^3/h, shaft power 152 kW.

Electricity on board a vessel is produced by burning marine fuel either in the main engine using a shaft generator or in auxiliary engines with electric generators.

It was calculated that the compressor power when compressing 1162 m^3/h of air to 9 bar (working pressure according to the manometer for mode 1) and with an efficiency of 0.75 is 138 kW. The power of the electric heater for this amount of air when heated by 10 K, considering the heat capacity and density of compressed air according to [6], is 36.2 kW.

For comparison, the Alfa Laval Smit Combustion inert gas system was chosen, which consumes the MDO (DMB or DMC) as fuel. The special burners of the Ultramizing system ensure inert gas production with low NOx emissions and no soot. Quality is further assured by sprayer systems that avoid creating salt crystals through water evaporation.

The energy during inert gas production in a Combustion-type IGG is consumed for the operation of the:

- scrubber pumps,
- gas blower after the generator,
- power supply for the control system (a small amount).

For scrubbers in a Combustion-type IGG system, typical power consumption is no more than 7 kW per 1000 nm^3 of gas being cleaned. The calculated compressor power when compressing 925 m^3/h of inert gas from a pressure of 0.15 bar after the Combustion-type IGG to 0.5 bar (for supply to cargo tanks) with an efficiency of 0.75 is 10.7 kW.

Fuel consumption for producing 1000 nm^3 of inert gas depends on many factors (fuel type, oxygen content in the inert gas, and others). According to the analysis of information provided by various manufacturers of Combustion-type IGG, the specific fuel consumption is 0.075…0.084 kg of MDO per 1 m^3 of inert gas.

All this data is needed later to compare fuel consumption per unit of inert gas the IGGs produce.

Information on the components of the total energy consumption of IGGs and the calculated specific fuel consumption for the production of a unit of inert gas are presented in Table 1. As can be seen from the results presented in Table 3, in terms of energy consumption, the membrane nitrogen IGG wins over the Combustion-type IGG**.**

Table 1. Comparison of energy characteristics for Nitrogen IGG and Combustion-type IGG

Characteristic	Nitrogen IGG	Combustion-type IGG
Capacity, nm^3/h	925	
Fuel consumption for combustion in IGG, kg	-	69.4
Electric power consumed by the compressors, kW	137.6	10.7
Power consumed by a heater, kW	36.2	-
Power consumed by scrubber, kW	-	7.0
Fuel consumption for electricity production (auxiliary engine-driven generator), kg	32.2	3.3
Total fuel consumption, kg	32.2	72.6
Specific fuel consumption, kg/nm^3 of IG	34.8	78.5

Membrane nitrogen inert gas generators, despite a higher installation cost, demonstrate a significant advantage in terms of energy saving, environmental safety, and ease of operation. In the medium and long term, they have lower operating costs, faster payback, and fully comply with modern environmental standards.

A disadvantage of the membrane nitrogen inert gas generators is that their productivity is relatively low. In this regard, they may lose to traditional combustion-type inert gas generators, especially when it is necessary to service large tankers. This issue can be partially resolved by using buffer tanks.

The results of the calculations show that specific fuel consumption for membrane nitrogen IGG is more than two times less compared with combustion-type IGG: 34.8 kg/nm^3 vs 78.5 kg/nm^3. This indicates the greater efficiency of the membrane nitrogen IGG when used on most merchant vessels. However, in cases where the oxygen content in the inert gas is required to be below 4…5 %, the combustion-type IGG may be more energy efficient than the membrane nitrogen IGG.

REFERENCES

1. International Maritime Organization. Energy Efficiency Measures for Ships. London: IMO, 2023.

2. DNV. Inert Gas Systems on Tankers – Guidelines and Best Practices. DNV Technical Report No. 512, 2022.

3. Giacomo P. Energy Use and Losses in Inert Gas Systems on Oil Tankers. *Journal of Marine Engineering*. 2021. Vol. 33, Iss. 2. P. 45–52.

4. Wärtsilä. Nitrogen Generation for Marine Applications. Technical Data Sheet, 2022.

5. Smith R., Müller L. Membrane-Based Nitrogen Systems: Design and Efficiency. *Ocean Engineering Review*. 2020. Vol. 18, Iss. 4. P. 99–108.

6. Lemmon E. W., Bell I. H., Huber M. L., McLinden M. O. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, NIST, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018.

UDC 621.574

Kharchenko K., Khliyeva O., Tsynova M.
National University "Odessa Maritime Academy"

Environmental Problems of Refrigerant Replacement and Retrofit in Marine Refrigeration Equipment

The global maritime industry is facing mandated refrigerant transitions due to international regulations, including the Montreal Protocol [1] and its Kigali Amendment, as well as stringent regional policies like the EU F-Gas Regulation [2]. These regulations require phasing out ozone-depleting substances (HCFCs) like R22 [3] and phasing down high global warming potential (GWP) hydrofluorocarbons (HFCs) like R404A [4]. This transition presents unique and severe challenges for marine refrigeration systems, which are distinct from land-based applications. Compounding these technical issues are the unique operational realities of ships, including high-vibration environments that induce leaks, severe space and weight constraints, and a critical lack of marine-specific standards and crew training for handling flammable or high-pressure systems.

Technological progress in the refrigeration sector is now governed by international legal instruments aimed at reducing greenhouse gas (GHG) emissions. The 2016 Kigali Amendment to the Montreal Protocol [1] mandates a global phase-down of hydrofluorocarbons (HFCs), which have a high GWP. Concurrently, regional policies like the EU F-Gas Regulation [2] (No 517/2014) have imposed even stricter limitations, including service bans (since 2020) on refrigerants with a GWP over 2500, such as the once-common R404A [4]. These regulations create a critical challenge for the maritime industry, which relies heavily on vapour-compression refrigeration for air conditioning, provision cooling, and specialized cargo (e.g., reefer containers, fishing vessels). The industry is historically reliant on R22 [3] (an HCFC now banned for service) and high-GWP HFCs like R404A and R134a. Addressing this issue is uniquely difficult for marine systems. Unlike stationary land-based systems, ships are isolated, mobile environments characterized by constant vibration, severe space constraints, and global operational footprints. Furthermore, refrigerant leakage rates on marine vessels are exceptionally high, with studies showing average annual leakages of 20% to 38% of the total charge. This high leakage rate, caused by vibrations and harsh conditions, not only magnifies the environmental impact but also severely complicates service and retrofitting. Ship owners are now caught between two problematic replacement pathways: (1) Interim HFC/HFO Blends, which are "drop-in" or "top-up" refrigerants (e.g., R407F, R448A, R417A) that offer a temporary, lower-GWP solution but are not a sustainable long-term answer ; and (2) Long-Term Natural Refrigerants, which are ultra-low GWP fluids (Ammonia R717, CO2 R744, Hydrocarbons R290) that solve the GWP problem but introduce fundamental challenges in safety, system design, and cost.

To avoid the high capital cost and vessel downtime of a full system replacement, many ship owners are drawn to "drop-in" HFC/HFO blends, which are marketed as easy replacements for R22 and R404A. However, this path is fraught with its own technical and logistical problems. Refrigerants like R407F (GWP=1825), R448A (GWP=1387), and R417A (GWP=2346) are offered as immediate, compliant solutions under current F-Gas rules (GWP < 2500). However, these are merely an intermediate step. Future regulations, particularly in the EU, are pushing GWP limits for new systems below 150. Adopting a GWP 1800 refrigerant today simply guarantees that a second, more complex retrofit will be required in the near future, representing a significant long-term financial liability. The primary selling point of these blends is the ability to "top-up" an existing R404A system or replace R22. This claim is technically problematic. Most of these blends (e.g., R407F , R448A) are zeotropic, meaning they have a "temperature glide." In the high-leakage environment of a ship, fractionation is a major risk [3]. The higher-pressure components of the blend leak first, changing the refrigerant's composition. Once this occurs, the system can no longer be "topped up"; the entire charge must be recovered and replaced with new, virgin refrigerant, eliminating the primary cost-saving benefit. Furthermore, a true "drop-in" would work with the existing mineral oil (for R22 systems) or POE oil (for R404A systems). While some blends like R417A are marketed as compatible with mineral oil, many others require a full system flush and a change to POE oil, an expensive and time-consuming procedure. Finally, not all retrofits maintain performance. For example, some service companies report that R417A is not a good option for low-temperature freezing applications, as it results in capacity loss [4].

The only truly future-proof solutions are natural refrigerants, which have near-zero GWP. However, none of these can be "retrofitted" into an existing HFC system; they all require entirely new, purpose-built equipment. Their adoption is blocked by fundamental barriers of safety, physics, and cost. The two most efficient natural refrigerants are limited by safety classifications. Ammonia (R717) is toxic (ASHRAE Class B2L) [6]. While it is highly efficient and well-understood in large-scale industrial plants and on some fishing vessels, its use on passenger ships or near crew quarters is a major safety risk. It also requires a completely different system, as it corrodes copper and its alloys, which are standard in HFC systems [5]. Hydrocarbons (R290) are highly flammable (Class A3). The risk of an ignition source in a marine environment makes its use a critical safety hazard. Consequently, its use is restricted to very small, self-contained units (charge < 500g) unless extensive and costly safety measures are implemented. Marine standards for large-scale A3 systems are almost non-existent. Carbon Dioxide (R744, CO2) is an excellent, non-flammable (A1) refrigerant with a GWP of 1. It is the most promising long-term solution for many. However, it cannot be used as a retrofit. R744 [7] systems operate at pressures from 30 to over 90 bar (transcritical). This is 5-10 times higher than HFC systems. It requires specialized, heavy, and expensive components built to withstand this pressure. An existing R404A system would immediately rupture. R744 systems also lose significant efficiency when operating in high ambient temperatures (i.e., high sea-water temperatures), as they are forced to run in a less-efficient "transcritical" mode.

While R744 is common in land-based supermarkets, components for large-capacity (MW-scale) marine AC and refrigeration are still underdeveloped, often forcing the use of multiple, small, parallel compressors, which increases system complexity, cost, and, crucially, the physical space required on an already-crowded ship [7].

Compounding the refrigerant-specific issues are systemic problems unique to the marine industry. While land-based standards (like EN 378) are adapting to flammable refrigerants and R744, the maritime classification societies (e.g., DNV, Lloyd's Register) are only just beginning to formulate rules [8,9]. This regulatory uncertainty makes shipbuilders and owners hesitant to invest in new technologies. A ship's crew is trained primarily for propulsion and navigation, not as specialized refrigeration technicians. The safe handling of highly flammable (A3), toxic (B2L), or extreme-pressure (R744) systems requires specialized training and certification, which is currently lacking. The primary barrier is financial. Ship owners are driven by operational costs and vessel availability. A "top-up" with an interim blend costs little and causes no downtime. A full-system replacement for R744 or R717 represents a massive capital investment and takes the vessel out of service for an extended period.

In conclusion, the mandated refrigerant transition presents a complex and costly problem for the maritime industry, with no simple solution. Interim "drop-in" blends are a short-term patch that is technically flawed in the high-leakage marine environment and ultimately only delay the need for a second, more costly retrofit. Long-term natural refrigerants solve the GWP problem but are not "replacements." They require entirely new systems and introduce fundamental, high-stakes challenges related to safety and system design that are amplified in a ship's unique environment. The path forward is blocked by significant barriers: the technical infeasibility of retrofitting natural refrigerants, the high capital cost of new systems, and the critical lack of marine-specific standards and crew training.

REFERENCES

1. Kigali Amendment to the Montreal Protocol. United Nations Environment Programme (UNEP). 2016.

2. On fluorinated greenhouse gases. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council. 2014.

3. Hafner I. A., Gabrielii C. H., Widell K. Refrigeration units in marine vessels: Alternatives to HCFCs and high GWP HFCs. Nordic Council of Ministers, Denmark. 2019

4. Refrigerant options now and in the future. Danfoss. White Paper. Updated April 2024.

3. Wilhelmsen Ships Service. Refrigerants and Refrigeration equipment. Marine Products Brochure. 2022.

5. Pigani L., Boscolo M., Pagan N. Marine refrigeration plants for passenger ships: Low-GWP refrigerants and strategies to reduce environmental impact. *Int. J. Refrig.* 2016. Vol. 64. P. 80-92

6. ANSI/ASHRAE Standard 34-2022: Designation and Safety Classification of Refrigerants. ASHRAE. 2022.

7. Söylemez E., Widell K. N., Gabrielii C. H., Ladam Y., Lund T., Hafner A. Overview of the development and status of carbon dioxide (R-744) refrigeration systems onboard fishing vessels. *Int. J. Refrig.* 2022. Vol. 140. P. 198-212

8. DNV. Rules for Classification Ships. Part 4: Systems and components. Chapter 6: Piping systems. 2024.

9. Lloyd's Register. Rules and Regulations for the Classification of Ships. Part 6: Control, Electrical, Refrigeration and Fire. Chapter 3: Refrigerated Cargo Installations. 2024.

UDC 629.12.565.3

Solomko M.Yu., Prodanov Yu. O., Zhuravlov Yu. I.
National university "Odessa Maritime Academy",

Features of repair of frame, crank and head bearings under vessel operating conditions

Introduction

Marine diesel engine bearings use thick-walled and thin-walled liners. A bearing's thickness is determined by the ratio of its bare body thickness to its outside diameter.

Modern high- and medium-speed engines use thin-walled liners with a galvanized coating of an antifriction alloys's combination.

They are reliable, withstand heavy loads, and are easy to replace because they do not require adjustment to the shaft journal. However, many diesel engines in the fleet still have bearing liners with babbitt-filled liners. These are the ones we will consider.

Ships carry a sufficient number of spare bearings, machined at the factory to a precision level that ensures complete interchangeability. Therefore, their fit is checked during installation and minor adjustments are made if necessary. In marine conditions, a defective bearing can also be repaired by localized welding of small areas or recasting followed by boring and fitting to the shaft.

Such repairs are performed if: the fill layer thickness has been reduced by half; the fill layer has separated from the bearing shell by more than 10% of the surface; or more than 15% of the fill surface is covered by scattered closed cracks.

The main bearing is left in service if up to 40% of the bearing surface is affected by open hairline cracks.

Under operating conditions of powerful marine diesel engines, refilling of bearings is generally not performed; repairs are limited to local surfacing with a gas welding flame or electric surfacing with a carbon electrode.

Annotation

Bearing damage is a common cause of failure in marine engines. While frame and crankshaft bearings rarely fail in low-speed engines, damage to the main bearings is quite common. In medium- and low-power engines, on the other hand, crankshaft and frame bearing failures are common, while main bearing failures are rare.

Failure to promptly detect bearing damage can result in scuffed journals, crankshaft failure, and broken main bearing studs and connecting rod bolts. The latter is particularly dangerous, as it can lead to failure of the piston, connecting rod, cylinder liner, block, and baseplate.

The purpose of this study is:

In the study of the operating principles of common bearing assemblies, their diagnostics, maintenance and, if possible, repairs under ship operating conditions.

Presentation of research material

If a mechanic detects white metal in the engine crankcase, he should proceed in the following sequence:

• identify the damaged bearing;

• disassemble it;

• determine the extent of damage to the bearing shells and the cause of the damage.

If damage to the antifriction layer is minor (scratches, scuffs, galling of the white metal), it can be removed by cleaning. After cleaning, unremoved scratches up to 0.2 mm deep are permitted on main bearing shells, with a maximum of 4 scratches on the lower shell and 8 scratches on the upper shell. Cracks, localized peeling, or white metal spalling on the bearing surface of the shell covering up to 15% (for main bearing shells) and 10% (for connecting rod and head bearing shells) can be repaired by chipping away the white metal down to the steel shell, followed by tinning and surfacing with babbitt of the same grade. Subsequently, fairly complex operations are required to restore this shell to standard condition. It is best to replace such shells during operation. Shells with more severe damage requiring recasting must definitely be replaced. Mechanics need to know the causes of bearing failure in order to take appropriate preventative measures.

Maintenance is performed as follows.

The bearing is thoroughly cleaned of dirt and oil, and any defective babbitt is removed.

Degrease the bearing by immersing it in an alkaline solution (10% aqueous solution of potassium or sodium hydroxide) at 80-90°C for 10-15 minutes, rinsing with water, and drying. To remove the oxide film, the surface is etched with a 30% aqueous solution of zinc chloride, moistening it with a brush.

Prepare the defective area (or the entire bearing) for tinning. To do this, heat it to a temperature of 150-200°C (the lower limit for surfacing). The surface to be tinned is coated with flux (30% zinc chloride, 5% ammonium chloride, the remainder water) and tinned with tin or POS-30 or POS-40 alloys using a heavy-duty soldering iron. The tin layer should have a dull silvery hue. If the color is yellow, tinning must be repeated.

Surfacing is used to repair individual areas and cracks. After preparing the bearing, it is placed in the bath so that the surfacing area is 5-6 mm above the water level. Surfacing is performed with a torch, using 6-8 mm diameter babbitt rods as filler material (Fig. 1). The composition of the filler rod must match the composition of the babbitt casting. Oxidation and contamination on the surface are not permitted.

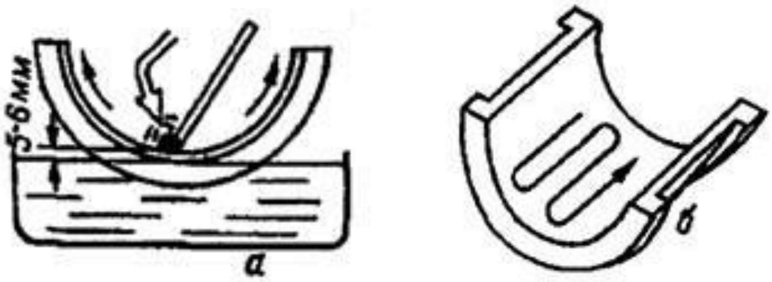


Fig. 1. – Bearing surfacing

a – position of the sinker rod and torch; b – diagram of bead application

Surfacing can be performed without striking an arc. This utilizes the heating effect of the electrode and insert due to electrical resistance at the point of contact.

The tinned material is melted with a carbon electrode 12-20 mm in diameter, applying thin beads 0.2-0.5 mm thick and 10-20 mm wide. After coating the tinned areas with flux, surfacing is performed with a carbon electrode, using babbitt rods 6-10 mm in diameter and 500-700 mm long as filler material. The surfacing is performed in beads 12-20 mm wide and 2-6 mm thick.

The welding current depends on the thickness and size of the inserts; for a liner thickness of 10-16 mm, the current is 140-160 A. The welding power source should have a rigid characteristic and an open-circuit voltage of 8-14 V. The current density for carbon electrodes is 0.3-0.6 A/mm2, and for graphite electrodes, 0.6-1.2 A/mm2.

The operations specified in points 1-3 are performed. The old babbitt is completely melted out. Then, the liner (Fig. 2) is expanded by work-hardening the inner surface to a size calculated using the formula:

$$B = (1{,}002 \div 1{,}003)(b + 2\Delta b),$$

where B -is the liner size after expansion, mm;

b -is the liner size before expansion, mm;

Δb -is the gap between the liner and the bed, mm.

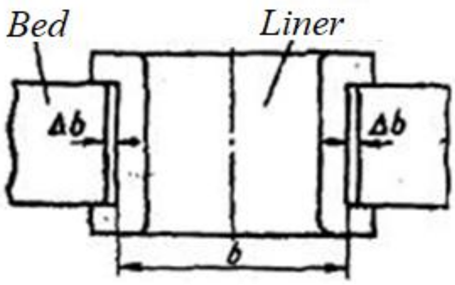


Fig. 2. Bearing shell clearances along the bed

Before tinning, the split liners are assembled in a special clamp, with spacers of the required thickness installed between the joints. Surfaces not filled with babbitt are coated with a paste (30% chalk, 2% wood glue, the remainder water), applied with a brush. The hot, tinned liners are immediately placed in a static or centrifugal babbitt pouring unit before the tin oxidizes.

Only one grade of babbitt is used per liner. The weight of used babbitt and shavings should not exceed 35% of the total molten metal.

Before pouring, the babbitt is melted in a crucible (an electrically heated crucible can be made for shipboard conditions). The babbitt heating temperature is maintained using a calibrated thermocouple: 400-420°C for B-83, 430-450°C for BN, and 460-480°C for BK-2. Do not cast the bearing with overheated babbitt that has a golden or bluish film. The alloy is cooled, and the film is removed.

Casting is performed manually or centrifugally (in marine conditions, this is only possible for small bearings). The latter method produces a high-density antifriction alloy, a fine-crystalline structure, and good adhesion to the bearing shell, eliminating porosity and voids. Large-diameter bearings are cast manually in a special fixture (Fig. 3), paying attention to the concentricity of the inner and outer surfaces of the bearing shell. The thickness of the babbitt layer depends on the journal diameter and is determined by the following formulas:

$$t = \frac{d}{50} + 1mm\left(at\, d \le 200\, mm\right);\ t = \frac{d}{100} + 3mm\left(at\, d > 200\, mm\right),$$

where t is the thickness of the babbitt layer, mm; d is the diameter of the shaft journal,

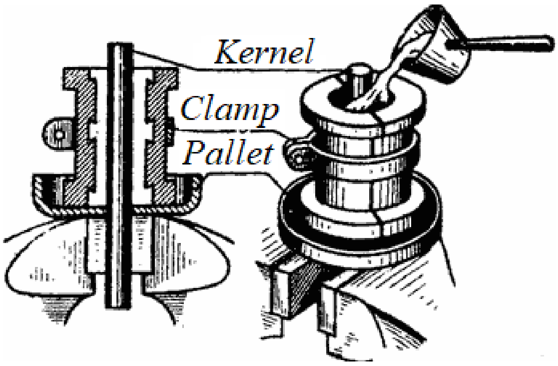


Fig. 3. Manual bearing filling

Fifteen to twenty seconds after pouring, the bearing is cooled with compressed air or an air-water mixture until the babbitt solidifies, after which it is allowed to cool naturally in the air.

It should be remembered that the quality of the pouring largely depends on the speed and continuity of all operations. The pouring is considered satisfactory if: the surface is free of cracks, voids, cavities, and slag inclusions; individual cavities or cavities are repaired by surfacing; the babbitt surface color is dull silver; when checking the fit of the babbitt to the bearing by tapping, the sound is clear, without rattling (the entire surface of the babbitt fits tightly to the bearing); after two hours of soaking in kerosene, the bearing, wiped dry and heated to 70-90°C, has no greasy spots in the joint plane.

Maintenance after re-pouring (surfacing) consists of the following. Using a milling machine, excess babbitt is removed from the bearing sockets and ground onto a paint plate. The bearings are assembled with a set of spacers in a clamp and pre-bored, leaving a 1.5-3 mm allowance for final machining. This removes excess metal holding the bearing together and allows the bearing to "open up," eliminating the deformation caused by the casting.

After this, the bearing is again checked for a tight fit by tapping and using a kerosene test. The bearing caps are then adjusted to the bearing beds using paint, checking for proper fit: a 0,05 mm thick feeler gauge should not fit between the bearing and the bed on the connector side. The connectors are finally adjusted using a paint plate.

Finish boring is performed, leaving an allowance of 0,10-0,15 mm on each side for scraping. The axial clearances between the crankshaft webs and the ends of the main bearings and crankshaft bearings should be (0,010-0,15) δ, where δ is the journal diameter. The largest values are taken for bearings further from the thrust bearing. The clearance in the mounting bearing is 0,15-0,20 mm. The clearances along the "whiskers" are within 0,05-0,08 mm, and the feeler gauge should penetrate no more than 5-10 mm.

After boring, coolers and lubrication grooves are milled in the bearing surfaces according to the manufacturer's design.

Bearings are scraped along the shaft journal, checking for paint contact. The treatment of a main or crank bearing is considered complete when evenly spaced paint spots cover the bearing over an arc of 120°C with a density of at least 9 spots in a 25 x 25 mm square. For head bearings, scraping is complete when contact is achieved on the bearing surfaces of their lower halves within an angle of 140°, with 12-18 paint spots in a 25 x 25 mm square. Due to crosshead journal deformation during diesel engine operation, it is recommended that Burmeister & Wein engines be adjusted by flaring the head bearings and inserting 0,03 mm thick shims under the bearing surfaces to a depth of 15 mm on the inner side.

The adjustment is performed at a length equal to 0,75 times the bearing generatrix length from the inner sides (Fig. 4). At the factory, the bearing liners are additionally electroplated with a 0,10 mm thick lead-tin alloy.

The oil clearance is adjusted after the bearings have been fitted. Clearances are determined using a feeler gauge or lead wire strips, or, in small engines, using a dial indicator according to the manufacturer's instructions.

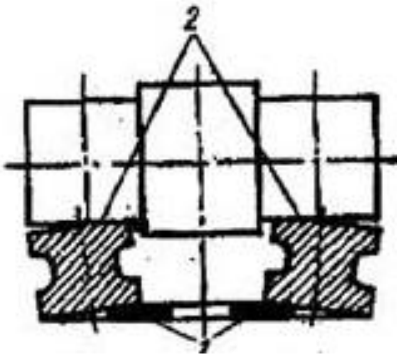


Fig. 4. Fitting the head bearings of Burmeister & Wine engines
1 - gasket; 2 - fitting points

The lead wire used for the strips should be 0,2-0,3 mm thicker than the specified oil clearance. Three wires are laid across the shaft journal to obtain an idea of the clearance size in the middle and at the edges of the bearing. The wires are spaced back from the bearing shell ends to avoid errors due to their rounding in the fillets. After compression, the thickness of the flattened lead wires is measured with a micrometer and the clearance is adjusted accordingly.

Adjustment is made by varying the number of shims, the thickness of which is: 0,03; 0,05; 0,10; 0.15; 0,20; 0,5; 1,0; 2,0 mm, etc. Their surface must not be burred, dented, or warped. The side edges of the gaskets are coated with tin. Thick gaskets are made of steel or brass, while thin ones are made of foil; their shape matches the bearing joint profile. The gap between the gaskets and the shaft is equal to half the bearing's diametrical clearance, with identical gaskets installed on each side: thick gaskets at the bottom and thin gaskets at the top.

Adjusting the clearance by filing the bearing ends is prohibited.

During installation work with main bearings (rolling them out and in), scoring of the bearing beds of the foundation frame may occur. To avoid this, jack up the shaft journal, checking its lift using an indicator, and also ensure the bearing back and its bed are clean.

Conclusions

1. The operating principles of common bearing assemblies and their diagnostics are discussed.

2. The general sequence of maintenance for frame, crank, and head bearings under vessel operating conditions is shown.

REFERENCES

1. Жіркін Ю.В. Надійність, експлуатація та контакт деталей машин. – Київ: Вища школа, 2019. –330 с.

2. Ікрамов У.А. Розрахункові методи оцінки абразивного зношування. – Київ: Видавництво ЮПЕКО, 2021. – 288 с.

6. Суслов А. Г. Якість поверхневого шару деталей машин / А. Г. Суслов. – Київ: Наукова думка, 2018. – 320 с.

7. Овсеєнко А. Н. Формування стану поверхневого шару деталей машин технологічними методами / О. Н. Овсієнко, В. І. Серебряков. – Луцьк: Видавництво Терен, 2024. – 228 с.

8. Рижов Е. В. Технологічне забезпечення експлуатаційних властивостей деталей машин / Е. В. Рижов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. --Львів: Видавництво Бак, 2023.-176 с.

Матеріали
науково-технічної конференції молодих дослідників
"Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт",
20.11.2025.

Підписано до друку 5.12.2018. Формат 60×84/16.
Обл.-вид. арк. 9,85. Тираж 100. Зам. № И14-12-29.

НУ «ОМА», центр „Видавінформ”
Свідоцтво ДК № 1292 от 20.03.2003
65029, г. Одеса, вул. Дідрихсона, 8
тел./факс: (0482) 34-14-12
publish@ma.odessa.ua