Міністерство освіти і науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Суднові енергетичні установки

Науково-технічний збірник

Випуск 47

Одеса
2023

Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 47 - Одеса: НУ «ОМА», 2023. -306 с.

Збірник присвячений проблемам суднової енергетики, проектування, модернізації й експлуатації суднових енергетичних установок, методам підвищення ефективності й надійності використання суднових технічних засобів.

Для науковців і фахівців.

Редакційна колегія: д-р техн. наук, проф. С. В. Сагін (науковий редактор); д-р техн. наук, проф. В. В. Афтанюк; д-р техн. наук, проф. В. В. Будашко; д-р техн. наук, проф. І. М. Гвоздева; д-р техн. наук, проф. В. А. Голіков; д-р техн. наук, проф. С. І. Горб; канд. техн. наук, доц. Ю. І. Журавльов; канд. техн. наук, доц. Ю. В. Заблоцький; д-р техн. наук, проф. В. М. Захарченко; д-р фіз.-мат. наук, проф. С. В. Козицький; канд. техн. наук, проф. М. О. Колегаєв; д-р фіз.-мат. наук, проф. О. В. Малахов; д-р техн. наук, проф. М. В. Міюсов; д-р техн. наук, проф. О. А. Онищенко; канд. техн. наук, доц. А. В. Печенюк; д-р техн. наук, проф. П. С. Суворов; канд. техн. наук, доц. В. Г. Солодовніков; д-р техн. наук, проф. О. Я. Хлієва; Doctor of Technical Sciences, Senior Lectures Class A, Bendahmane Boukhalfa (Algeria)

Адреса редакційної колегії: 65029, Одеса, вул. Дідріхсона, 8, національний університет «Одеська морська академія» (НУ «ОМА»).

Контактні телефони редакції (067) 558-13-28.

e-mail: ivanovich1zh@gmail.com

Затверджене вченою радою НУ «ОМА», протокол №4 від 30.11.2023.

ISNN 1815-6770

©Національный університет "Одеська морська академія", 2023

Зміст

Афтанюк В.В., Кіріс О.В., Афтанюк А.В. Аналіз експлуатації та модернізація клапанів нагнітання газу двохпаливних суднових двигунів 5

Богач В.М., Обертюр К.Л., Довиденко Ю.М. Вдосконалення процесу подачі мастила в циліндри суднових дизелів.....11

Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння.....23

Кривий М.О. Визначення характерних кутів пар ковзання суднових енергетичних установок.....32

Крупов І.В. Аналіз систем автоматичного управління земснарядами.....46

Мадей В.В, Волков О.М., Сторчак О.О. Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження 55

Малахов О.В., Бондаренко А.В., Палагін О.М., Найденов А.І., Ліхогляд К.А. Моделювання процесу сепарації суднових льяльних вод 69

Малахов О.В., Маслов І.З., Найденов А.І., Генчев В.В., Мазур Т. Технологічні аспекти експлуатації суден днопоглиблювального флоту.....82

Нікольський В.В., Левінський М.В., Нікольський М.В, Слободянюк М.В.Кузьмінський Б.В. Вдосконалення систем віддаленого моніторингу параметрів суднових дизелів з електронним управлінням.....97

Сагін С.С. Вдосконалення взаємодії елементів суднового пропульсивного комплексу під час забезпечення маневру розходження морських суден 108

Сагін С.В., Суворов П.С., Бондар С.А. Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден 122

Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту.....131

Сагін С.В., Матєйко О.В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів 148

Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скруберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту.....157
Сандлер А.К., Опришко М.О. Вдосконалення лопатевого апарату вітроенергетичних установок 172
Сагін А.С. Корегування процесу подачі палива під час використання в суднових дизелях палив з різним вмістом сірки.....178
Сандлер А.К., Шестопалов К.О., Єрін В.О. Глибока утилізація вторинних енергоресурсів суднових компресорних установок.....191
Столярик Т.О. Використання системного підходу під час розв'язання завдань з підвищення ефективності експлуатації систем мащення суднових дизелів 197
Огурцов Д.В., Козьміних М.А., Хлієва О.Я. Аналіз ефективності застосування регенеративного теплообмінника у судновій холодильній машині провізійних камер при її переведенні з холодоагенту R404A на R407F.....206
Шумілова К.В., Шумілов Д.І. Багатоаспектний вплив судноплавства і діяльності людини в ракурсі парадигми управління ресурсами світового океану 217
Knaub L.V., Lebedev B.V.,Krasnodiy I.P., Astashenya I.I., Zasukha O.Yu. Design improvement of diesel engines taking into account modern environmental requirements.....231
Lebedev B., Uminsky S., Korolkova M., Melnik A. Technology for the restoration of diesel crankshafts with the strengthening of necks 240
Zhuravlov Yu.I., Kostyuchenko Ye.F., Povar A.I. Assessment of the thermal and stress-strain state of cylindrical surfaces of ship parts with wear-resistant coatings 249
Реферати.....264
Правила оформлення і подання рукописів для збірника «Суднові енергетичні установки».....303

10.31653/smf47.2023.5-10

Афтанюк В.В., Кіріс О.В., Афтанюк А.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ КЛАПАНІВ НАГНІТАННЯ ГАЗУ ДВОХПАЛИВНИХ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Постановка проблеми і її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.

Одним із технічних рішень щодо впровадження енергоощадних те екологічних нормативів МАРПОЛ (Міжнародна конвенція про запобігання забрудненню з суден, Додаток VI) є застосування газоподібного палива [1].

Можливість використання газоподібного або традиційного пального в процесі роботи двигуна безумовно забезпечує економічність та екологічність експлуатації, однак з іншого боку значно ускладнює конструкцію паливної та інших систем, що негативно впливає на показники надійності при експлуатації [2].

Тому підвищення надійності роботи елементів суднових двигунів, що працюють на газоподібному паливі є актуальним завданням.

Аналіз досліджень і публікацій. Досвід обслуговування двопаливних двигунів дозволяє аналізувати недоліки які виявляються в процесі роботи [3]. Серед основних проблем, що виникають в двигуні доцільно відокремити наступні:

- перегрів газоблоку через заклинювання клапана електронного уприскування газу у відкритому положенні (перегрів призводить також до пошкодження різних ущільнень);
- недосконале програмне забезпечення системи управління двигуном, що не дозволяє використовувати в повній мірі газовий режим експлуатації двигуна.
- відмови в допоміжних системах постачання газового палива (системі виявлення витоків і вентиляції, азотній системі та системі повернення газу);
- руйнування форсунок подавання газоподібного палива внаслідок перегріву.

Все перелічені недоліки поступово усуваються за рахунок внесення змін в конструкцію. Прикладом модернізації елементів двопаливних двигунів є зміна конструкції клапанів нагнітання газу (GIV)

[3]. За короткий термін експлуатації на форсунках спостерігалися тріщини (рис. 1).

Рис. 1. Тріщини в соплі GIV [3]

Аналіз умов експлуатації цього клапану показує, що оголовок клапану працює в умовах найбільш високих температур, що й призводить до швидкого руйнування (поява тріщин). Для усунення цього недоліку фахівцями [3] було запропоновано зменшити довжину клапану (рис. 2) та матеріал з якого виготовлений клапан (використано інструментальну сталь S40Cr5Mo1V), за рахунок чого можливо продовжити термін служби.

Рис. 2. Розробка конструкції газового сопла GIV - остання розробка справа [3]

Подальше поліпшення конструкції клапанів нагнітання газу можливо за рахунок збільшення товщини стінок оголовку, однак таке

рішення збільшує гідравлічний опір отворів, що знаходяться в оголовку. Тому для збалансування гідравлічного режиму роботи клапану необхідно запропонувати раціональну конструкцію розподільчих отворів.

Метою роботи є оптимізація гідродинамічного режиму роботи клапана нагнітання газу за допомогою використання розподільчих отворів спеціальної форми зі зменшеним гідравлічним опором та максимально можливим рівномірним розподілом швидкостей в перерізі.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно змінити конструкцію отвору так щоб забезпечити зменшення гідравлічного опору та найбільш рівномірний гідродинамічний режим роботи клапану та перевірити ефективність внесених змін шляхом моделювання течії газового потоку.

Математичне моделювання течії газу крізь отвір в головці клапану, можна розглядати як проходження газового потоку крізь малий отвір з резервуару необмежених розмірів (рис. 3) [4]. Визначення втрат напору, в цьому випадку базується на моделі каналу з раптовим звуженням, в якому місцеві опори обумовлені тертям потоку при вході у вужчий отвір та вихроутворенням.

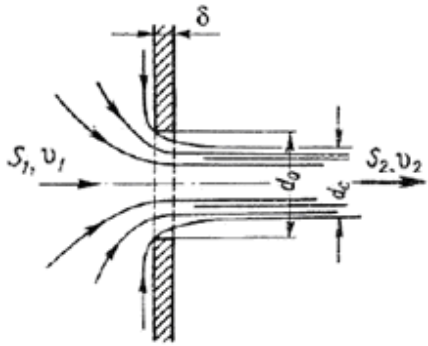


Рис. 3. Принципова схема конструктивного виконання отвору в головці газорозподільного клапану

Математична модель розрахунку втрат напору в отворі виконується на формулі Вейсбаха [4]

$$H = \xi_{зв} \frac{v_2^2}{2g}$$

де коефіцієнт опору звуження визначається по напівемпіричній формулі І.Є. Ідельчика [4]:

$$\xi_{зв} = 0{,}5\left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right) = 0{,}5\left(1 - \frac{1}{n}\right),$$

в якій $n = S_1/S_2$ - ступінь звуження.

Для забезпечення більш довготривалої сталої роботи газорозподільного головки клапану доцільно збільшити товщину стінки головки, а для зменшення гідравлічного опору змінити форму отвору (рис. 4).

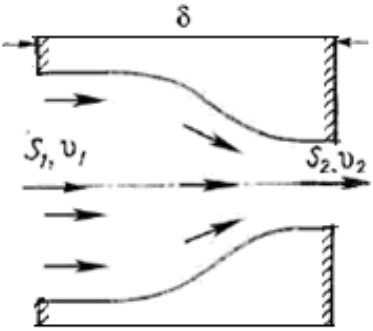


Рис. 4. Принципова схема конструктивного виконання модернізованого отвору в головці газорозподільного клапану

З базових положень гідромеханіки відомо, що зменшення опору раптового звуження можливо за рахунок використання поступового звуження (конфузор) або сопла (конфузор з плавно сполученими циліндричними та конічними частинами, рис.4).

Течія рідини у конфузорі (або соплі) супроводжується збільшенням швидкості та падінням тиску. Тому при розрахунках втрат напору враховуються лише втрати на тертя за формулою:

$$H_к = \frac{\lambda_T}{8 \cdot \sin(\alpha/2)}\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)\frac{v_2^2}{2g}$$

де коефіцієнт опору конфузору (або сопла) визначається за формулою [5]:

$$\xi_к = \frac{\lambda_T}{8 \cdot \sin(\alpha/2)}\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

Невелике вихроутворення та відрив потоку від стінки з одночасним стисненням потоку виникає лише на виході з сопла в місці переходу конічної частини у циліндричну. Закругленням вхідного кута

можна значно зменшити втрату напору при вході в циліндричну частину.

Тобто на підставі виконаного аналізу течій в отворі головки газорозподільного клапану можна запропонувати для зменшення гідравлічного опору та утворення найбільш рівномірного гідродинамічного режиму роботи клапану виконати отвори у вигляді сопла з співвідношенням вхідного перерізу до вихідного 2/1 тобто ступінь звуження n = 0,5, та забезпечити збільшення товщини стінки у 3 рази у порівнянні з стандартною (рис. 5).

а) *б*)

Рис. 5. Схема отворів у головці газорозподільного клапану: *а* – стандартний отвір; *б* – модернізований отвір (при збільшеній товщині та отвори у вигляді сопла)

Для подальшого дослідження течій доцільно розробити твердотільну модель головки клапану нагнітання газу та провести комп'ютерне моделювання потоків.

Висновки

1. На підставі досвіду обслуговування двопаливних двигунів проаналізовані недоліки які виявляються процесі їх роботи.

2. Визначені основні групи проблем, що виникають в двигуні, а саме: перегрів газоблоку через заклинювання клапана електронного уприскування газу; недосконале програмне забезпечення системи управління двигуном; відмови в допоміжних системах постачання газового палива; руйнування форсунок подавання газоподібного палива внаслідок перегріву.

3. Для модернізації форсунок подавання газоподібного палива проведено аналіз технічних рішень, що дозволив визначити напрямок подальших досліджень.

4. Для поліпшення роботи клапанів нагнітання газу обґрунтована конструктивна зміна газорозподільного отвору, що передбачає збільшення товщини стінки та зміну форми отвору, тобто виконання отвору у формі сопла (рис.4) зі ступенем звуження n = 0,5.

5. Дослідження течій з візуалізацією результатів розрахунків в запропонованій конструкції оголовку клапану нагнітання газу можливо за допомогою комп'ютерного моделювання потоків – CFD моделювання.

Перелік використаних джерел

1. WÄRTSILÄ ENCYCLOPEDIA OF SHIP TECHNOLOGY/ Jan Babicz. – Helsinki, 2015. – 663 p.

2. MAN Energy Solutions. MAN B&W ME-LGIP dual-fuel engines. – Копенгаген: MAN Diesel & Turbo, 2020. – 29 с. Режим доступу: www.man-es.com.

3. MAN Energy Solutions .Service experience – two-stroke technologies. – Копенгаген: MAN Diesel & Turbo, 2020. – 52 с. Режим доступу: www.man-es.com.

4. Основи термодинаміки, теплопередачі, гідромеханіки: навчальний посібник/ О.В. Кіріс, Б.А. Гарагуля, В.В. Афтанюк. – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – 148 с.

5. Кіріс О.В., Лісін В.В. Гідромеханіка. – Одеса: ОНМА, 2003. – 75 с.

10.31653/smf47.2023.11-22

Богач В.М., Обертюр К.Л., Довиденко Ю.М.

Національний університет «Одеська морська академія»

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ МАСТИЛА В ЦИЛІНДРИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. При аналізі ефективності роботи лубрикаторних систем суднових МОД рівень зношування в циліндрі, характеристики нагароутворень і витрати циліндрового масла тривалий час залишалися лише критеріями оцінки його експлуатаційних властивостей.

Дослідженнями [1] доведено, що значна частина мастила (при існуючих системах) неминуче надходить у циліндр у період руху поршня нижче мастильних отворів і потрапляє на бокову поверхню головки, а також його днище, де воно стає додатковим джерелом утворення нагару (рис.1), який, як відомо, погіршує стан і умови роботи циліндра.

Ця некерована подача масла на поверхні поршня температура яких досягає 500°С і більше, ставить масло в критичні (не заплановані при їх створенні) умови. У таких умовах із-за недосконалості лубрикаторних систем, відбувається не тільки пряме, невиправдане спалювання дефіцитних циліндрових масел, а й суттєве приховування проявів їх якості та справжньої ефективності.

Звідси випливає, що створення мастильних систем без уявлення про формовані ними процеси неприпустимо. Недосконалість маслоподаючих пристроїв не може і не повинно компенсуватися підвищенням вимог до якості мастил.

Зусилля по двох напрямках - створення масел і систем, історично ізолюваних один від одного, повинні бути об'єднані, що дозволить отримати резерви в підвищенні надійності та економічності дизелів, а також збільшити ефективність використання циліндрових мастил.

Виходячи з цієї перспективи виникає завдання аналізу факторів, що визначають рівень характеристик процесу подачі масла в циліндри МОД. Насамперед це стосується тих характеристик у зміні яких криється реальний техніко-економічний результат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження [1,2] показали, що процес витікання масла в циліндр формується в передкамері і супроводжується загальним для всіх двигунів нераціональним

використанням мастил повязаним з концентрованими подачами їх на перших оборотах циклу, та недостатньою кількістю на останніх обертах.

Це, разом з різницею швидкостей подачі масла, а також особливостями, зумовленими приналежністю предкамери до конкретної конструкції двигуна, визначило напрямок пошуку факторів впливу на характеристики руху масла при виході його в циліндр. Їх можна поділити на дві групи.

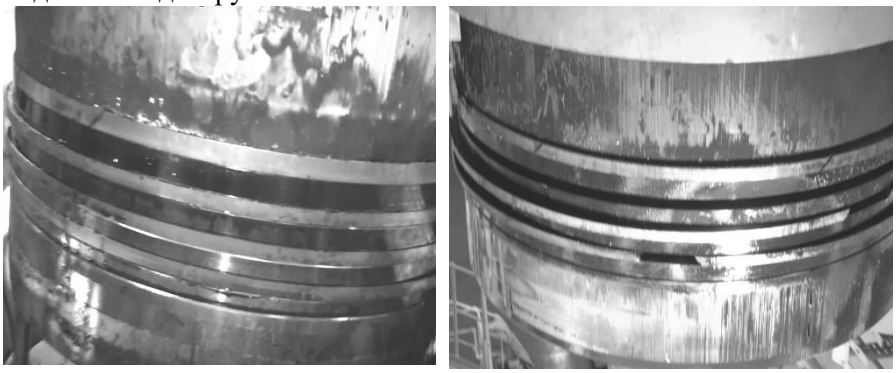


Рис.1. Відкладення на боковій поверхні головки поршня

У першу групу входять конструктивні фактори: об'єм предкамери; діаметр каналу в стінці втулки та його довжина; рівень розташування мастильних отворів по висоті циліндра; нахил каналу в стінці втулки [3].

Другу групу складають експлуатаційні фактори: величина порцій масла, що подаються в передкамеру; температура масла в передкамері; число оборотів двигуна та його навантаження; крен або диферент судна.

При почерговій оцінці впливу кожного з перерахованих факторів на процес подачі масла, вдалося виявити головні з них і визначити напрямок вдосконалення існуючих систем мащення.

Постановка завдання. Мета дослідження – полягає у розробці нових ефективних конструкцій маслоподаючих пристроїв, що являють собою заключну частина нагнітального тракту систем змащування циліндрів МОД.

Викладення матеріалу дослідження.

Розглядаючи характер руху масла по каналах системи встановлено [1, 2, 3], що основними умовами організації цього процесу є вільні поверхні масла в передкамері, деформація їх під дією ударних імпу-

льсів тиску газу зсередини циліндра з подальшим утворенням гребеня, який замикає канал, замикаючи газові порожнини з одночасним їх стисненням (рис.2), що відбувається до кінця підвищення тиску імпульсу.

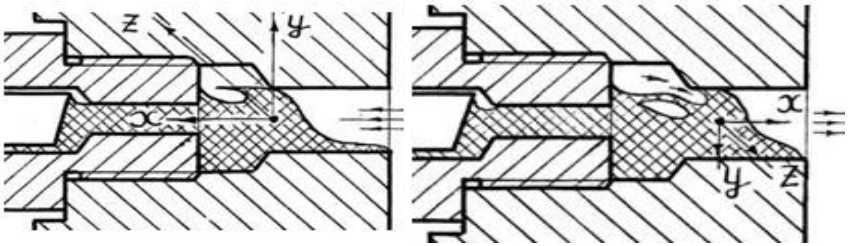


Рис.2. Характер руху масла по каналах ЦВ

Збільшення діаметра каналу призводить до зменшення нерівномірності порцій масла від оберту до оберту тому, що замикання його (тобто дотик гребеня з верхньої межі каналу) відбувається рідше. Крім того, зв'язок вершини гребеня з верхньою стінкою каналу стає, у міру збільшення діаметра, більш слабким і легше руйнується як при русі гребеня в глиб каналу, так і в період розширення в ньому газів.

Це приводить до більш швидкого зрівнювання тиску перед гребенем і після нього, до інтенсивного згасання інерції маси гребеня і, природно, до зниження кількості масла, що надходить в циліндр концентрованими порціями. Формування гребеня, здатного перекрити канал, вимагає певної його довжини. У короткому каналі, за час наростання імпульсу тиску, гребінь не встигає розвинутися до розмірів, що забезпечують перекриття перерізу і замикання газової порожнинию

Разом з геометрією заклапаної порожнини, характеристика руху масла визначається і низкою інших умов, наприклад, рівнем розташування мастильних отворів по висоті циліндра. Цей фактор зумовлює число імпульсів тиску, що діють у заклапаній порожнині за один оборот, їх величину, швидкість наростання та падіння тиску, проміжок часу між імпульсами і температуру масла в передкамері.

Зростання числа оборотів двигуна, за інших незмінних умов, супроводжується збільшенням частоти імпульсів і явища концентрованої подачі. Це відбувається за рахунок підвищення рівня масла та наближення його вільної поверхні до верхньої стінки каналу, що

сприяють більш ранньому замиканню газової порожнини гребенем. Підвищення рівня масла в каналі пояснюється скороченням часу між імпульсами та зменшенням можливостей витікання його з отворів у цей період.

Оскільки підвищення рівня масла в каналі веде до збільшення можливості концентрованої подачі, то більшим порціям, що подаються в передкамеру, має відповідати більша кількість масла, що надходить у циліндр концентровано.

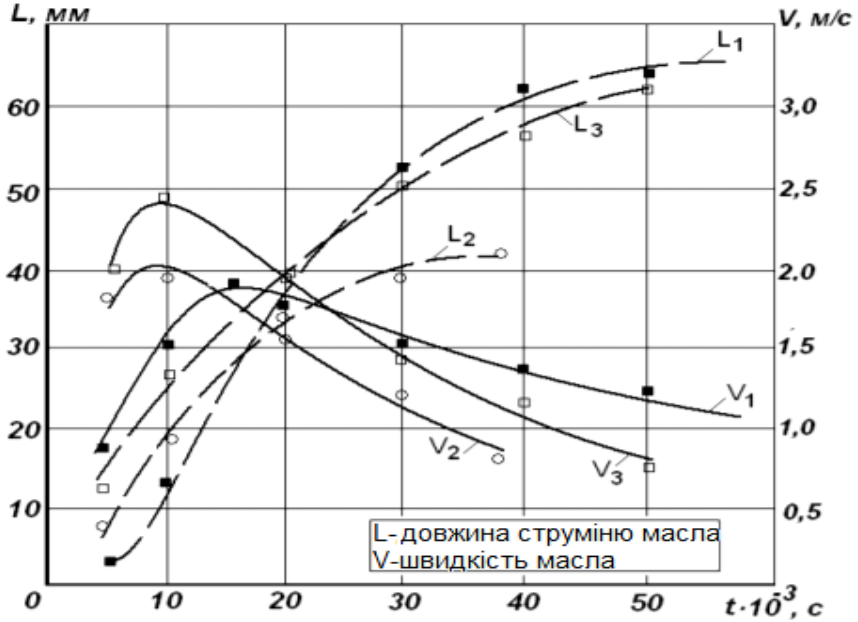


Рис.3. Характеристики руху мастила на виході в циліндр

Циклові подачі масла при експлуатації двигуна, особливо в періоди обкаток, змінюються в широкому діапазоні, тому отримана графічна залежність рис.3, що вказує на зміну характеристик надходження масла в циліндр за згаданих умов, має практичне значення, оскільки вона дає кількісну інформацію про ту частину масла, яка обумовлює інтенсифікацію нагаровідкладень. З графіків шляхом графічного диференціювання, визначено зміна швидкості переднього фронту частини масла, що здійснює вихід за межі зрізу масляного отвору.

На збільшення кількості масла (рис.4), що надходить в циліндр з відривом від стінки втулки при підвищенні числа обертів, рівня в

каналі, а отже і товщини його шару, ймовірно впливають резонансні явища коливань вільної поверхні масла і тиску газів над нею. Ці коливання, а також зворотно - поступальний рух масла в каналі під дією різкої зміни величин тиску та напрямів потоку газів, призводять до інтенсивного приготування в передкамері газомасляної суміші.

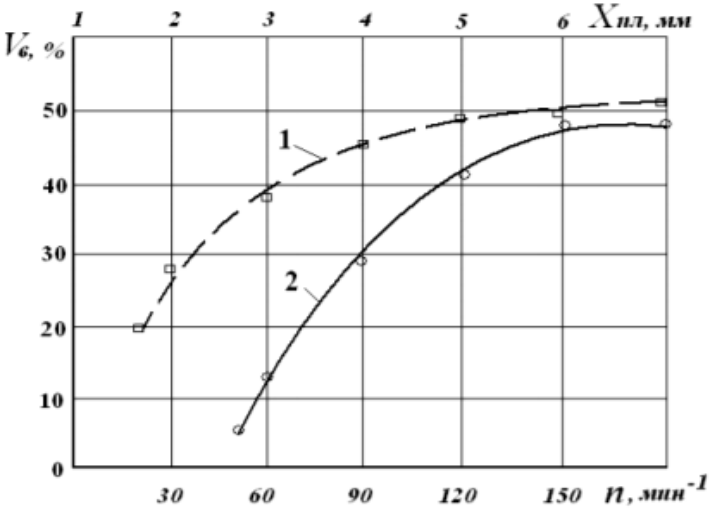


Рис.4. Обсяг струйного витікання масла ($V_в$) в залежності від: ходу плунжера $X_{пл}$ – 1; обертів двигуна n – 2

Різні періоди поповнення каналів маслом, відповідні черги робочих ходів плунжерів лубрикаторів, зумовлюють лише різницю в умовній черговості пропуску надходження масла з отворів. Чергування форм концентрованої подачі, проміжки між ними та перерви в подачі масла з отворів свідчать про значне спустошення каналів.

Встановлено [3], що у зв'язку з спустошенням каналу та рухом масла від дзеркала до зворотного клапана в період наростання тиску газу у мастильного отвору, відбувається оголення стрижня, розміщеного в каналі штуцера. В результаті стрижень швидко прогрівається і стає акумулятором тепла, що прискорює розкладання масла (яке відбувається насамперед на поверхні самого стрижня) аж до загоряння каналу, як відомо, характерного для МОД, особливо при використанні циліндрових масел з низькою термо-окислювальною стабільністю.

Таким чином, складні некеровані взаємозв'язки, характерні для існуючих систем, значною мірою визначають хаотичність організації

змащування циліндрів і раптовість виникнення їх зносу. Складність цих обставин доповнюється відсутністю надійних методів прогнозування також оцінки поточного зміни умов роботи ЦПГ і труднощами (в цих умовах) вибору, а також правильного визначення придатності того чи іншого сорту масел для забезпечення надійної роботи циліндрів.

Тому, разом зі створенням нових сортів масел, в такій же мірі необхідно займатися вивченням роботи існуючих маслоподаючих пристроїв, вдосконалювати їх і створювати нові конструкції, більш ефективні і пристосовані до сучасної тенденції форсування дизелів, а також експлуатації їх на важких сортах палив, що все погіршуються.

З аналізу зміни кількості масла, що надходить у циліндр концентрованими порціями в залежності від конструктивних факторів, випливає, що головними геометричними характеристиками нагнітального тракту, що мають основний вплив на подачу масла в циліндр, є об'єм, довжина та неоднорідність передкамери, а також кут її нахилу.

Для ліквідації концентрованої подачі (або щонайменше граничного її зниження) можуть бути використані різні варіанти:

- перетворення предкамери в канал постійного обмеженого перерізу з капілярними властивостями, що забезпечують постійну заповненість його маслом;
- максимально можливе наближення безповоротного клапана до дзеркала циліндра;
- надання передкамері форм, що забезпечують газову подачу без концентрованої подачі та ін.

Ці результати, стали основою для вдосконалення існуючих систем, і вихідною позицією при створенні цілої групи нових маслопідвідних пристроїв, що мають властивості, які принципово відрізняються, та істотно підвищують ефективність лубрикаторних систем.

Використання мікропроцесорів при управлінні двигуном дозволило підвищити ефективність роботи лубрикаторної системи. У традиційній системі, де використовується механічний привід лубрикаторів, ряд фірм для зменшення подачі масла до циліндрів при зниженні навантаження двигуна пов'язували механізм подачі з положенням рейки паливних насосів. Але, на жаль, не змогли досягти синхронізації подачі з рухом поршня робочого циліндра, а це призводило до того, що частина масла, що надходить зі штуцерів, потрапляла в циліндр над поршнем, і при його русі вгору поршневими кільцями переміщалося в напрямку камери згоряння де вигорало.

Інша частина масла виходила зі штуцерів циліндра під поршень і при його русі вниз кільцями закидалося в продувні та випускні вікна. Ідеальною вважається подача в момент, коли масло виходить зі штуцера в проміжок між першим і другим поршневими кільцями. Тоді масло добре розноситься по поверхні циліндра і раніше зазначені втрати зменьшуються.

Концепція нової системи мастила циліндрів з електронним керуванням представлена на рис.5. Масло з цистерни надходить у насосну станцію, де його тиск піднімається до 4,5 МПа і направляється в індивідуальні для кожного циліндра акумулятори і далі в лубрикатори. У станції знаходяться два робочі насоси і один, що автоматично включається в режимі stand-by. Кількість лубрикаторів (1 або 2) на кожному циліндрі залежить від розмірів циліндра (кількості штуцерів).

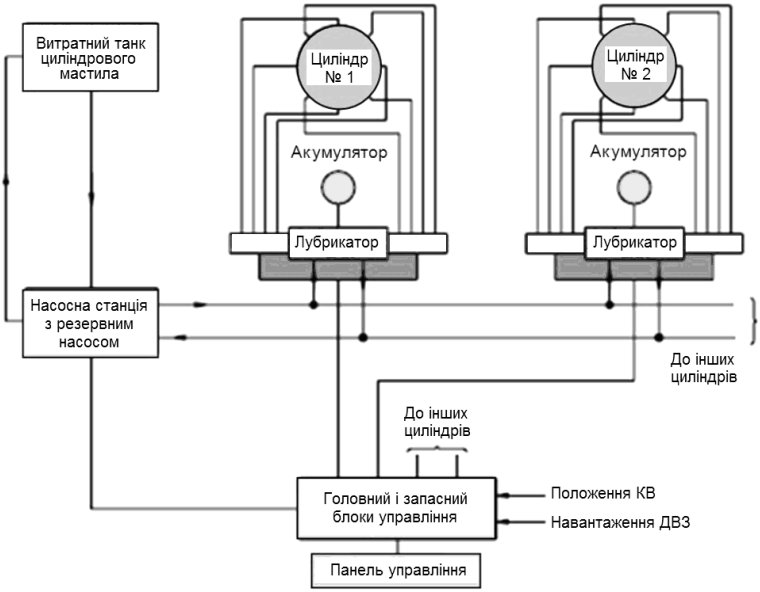


Рис.5. Система мащення циліндрів з електронним управлінням

Лубрикатор (рис.6) забезпечений поршнем гідропідсилювача, подача масла на який здійснюється через швидкодіючий двопозиційний клапан, керований мікропроцесором. Поршень надає руху розміщеним по колу плунжерам насосів високого тиску, що забезпечують подачу однакових кількостей масла по всіх точках мащення і, практично, в один момент часу.

Лубрикатор подає масло через кожні в 4…6 оборотів колінчастого валу в залежності від необхідної величини подачі. Збільшення подачі досягається збільшенням частоти подач, зменшення – навпаки. Час уприскування (момент подачі) задається мікропроцесором з великою точністю з тим, щоб надходження масла в штуцер відбувалося в період, коли поршень своїм комплектом кілець знаходиться в площині каналів на дзеркалі циліндра.

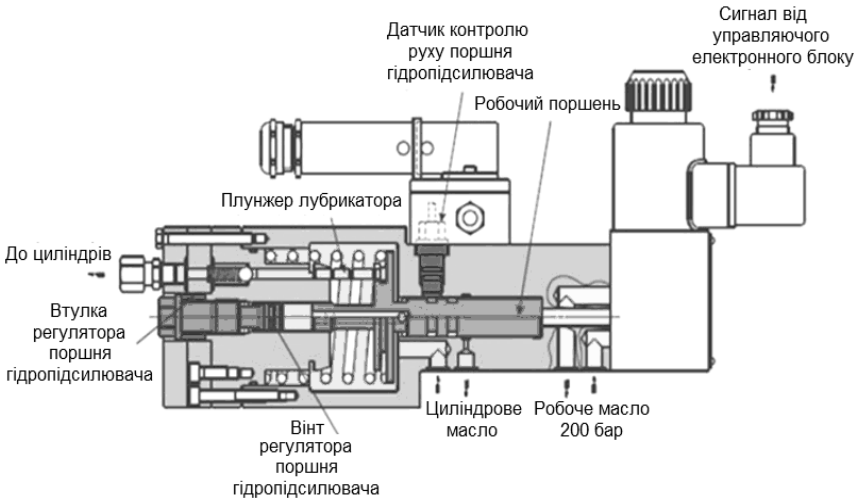


Рис. 6. Лубрикатор системи мащення з електронним управлінням

Канал повинен мати обмежений переріз і мати капілярні властивості, завдяки яким забезпечується постійна заповненість його маслом, що виключає утворення газових порожнин. Такий варіант, при довгих пристроях, спрощує технологію їх виготовлення. У той же час істотні відмінності у витратах і швидкостях зміни напору масла, а також у довжинах каналів, що залежать від конструктивних особливостей двигуна, зумовлюють необхідність відшукання методу оцінки правильності вибору розмірів маслопідвідних органів і величини кільцевої щілини, що забезпечують вихід мастила без відриву від дзеркала втулки.

Описана конструкція рекомендується для двигунів, у яких штуцера розташовані у верхній частині циліндра. Характерною рисою наведених конструкцій є розташування клапана поблизу дзеркала циліндра. Це гранично зменшує шкідливий об'єм і дозволяє наблизи-

ти вихід масла в циліндр до моменту подачі його лубрикатором. Остання обставина особливо важлива для дизелів з синхронізованим приводом насосів і розташуванням мастильних отворів в зоні відносно низького тиску.

Завдяки бічним отворам масло подається по дотичній до кола циліндра і отримує спрямований рух по обидва боки від точки змащування. Це покращує розподіл його по дзеркалу і запобігає подачі на головку поршня.

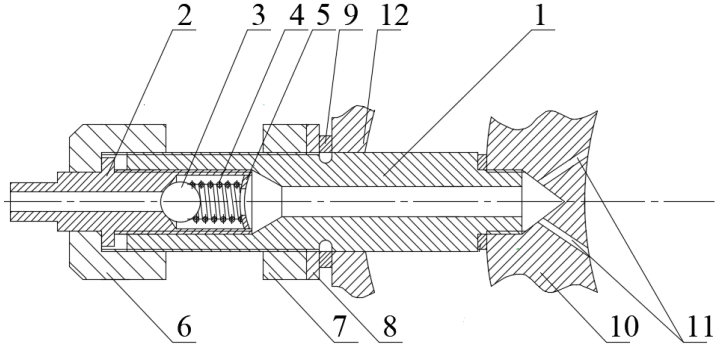


Рис.7. Вдосконалений вузол мащення циліндрової втулки:
1 – корпус штуцера; 2 – корпус незворотного клапану; 3 – кулька; 4 – пружина; 5 – біметалева мембрана; 6 – гайка накидна; 7 – гайка притискна; 8 – шайба; 9 – ущільнення; 10 – тіло циліндрового втулки; 11 – похилі отвори мащення 12 – тіло блоку циліндрів

Враховуючи існуючі недоліки лубрикаторних систем нами розроблено вдосконалений вузол мащення циліндрової втулки (рис.7), що складається зі штуцеру з отвором для мастила, незворотного клапану, накидної та притискної гайок та ущільнень, та який відрізняється тим, що кулька незворотного клапану притискується пружиною, що спирається на біметалеву мембрану, а у тілі втулки канали для мащення виконані під кутом до осі штуцера.

Технічний ефект досягається завдяки тому, що комбінація отворів та пружних елементів забезпечує:

- зменшення вузлів концентрації механічних напруг та забруднення у циліндровій втулці;
- більш ефективне мащення дзеркала циліндрової втулки;
- організацію процесу мащення з урахуванням дійсної температури та в`язкості мастильних матеріалів;

- підвищення ресурсу циліндрового втулки;
- зниження експлуатаційних та ремонтних витрат;
- можливість швидкої імплементації у виробничий процес.

Розробка відноситься до пристроїв підведення мастильних матеріалів від лубрікаторів до дзеркала циліндрового втулки суднових двигунів внутрішнього згоряння.

Область застосування – системи мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння [1,3].

Відомий вузол мащення циліндрового втулки, що складається зі штуцеру з отвором для мастила, незворотного клапану, накидної та притискної гайок та ущільнень. Штуцер має один отвір, вісь якого збігається з віссю штуцера [4].

Недоліком даного вузла є:

- неефективне мащення дзеркала циліндрової втулки завдяки великому діаметру мастильного отвору;
- ніяким чином при організації процесу мащення не враховується температура та в`язкість мастильних матеріалів;
- відносно великий мастильний отвір, а особливо канавки на дзеркалі втулки певним чином негативно впливає на її міцність.

Найбільш близьким за технічною сутністю та результатом, що досягається, до розробки, що пропонується, є вузол мащення циліндрової втулки, що складається зі штуцеру з отвором для мастила, незворотного клапану, накидної та притискної гайок та ущільнень. Для організації процесу мащення на дзеркалі циліндрової втулки виконані похилі поглиблення [2,5].

Недоліки застосування одного отвору для подачі мастильних матеріалів та поглиблень (канавок) на дзеркалі циліндрового втулки полягають у том, що:

- похилі поглиблення є джерелом концентрації механічних напруг та забруднення у циліндровій втулці;
- збільшуються витрати на технічне обслуговування двигуна;

Задачею розробки є створення вузла мащення, що забезпечить більш ефективну роботу лубрикаторної системи, відсутність вузлів концентрації механічних напруг та забруднення у циліндровій втулці, організацію процесу мащення з урахуванням дійсної температури та в`язкості мастильних матеріалів, підвищення ресурсу циліндрової втулки, можливість швидкої імплементації у виробничий процес. А також у знижені експлуатаційних витрат та одночасному збережені простоти технічних рішень вузлів мащення відомих типів.

Суть розробки пояснюється кресленням (рис.6), де зображено корпус штуцера 1, який містить незворотний клапан 2. У корпусі клапану містяться сталева кулька 3, яка перекриває канал мащення. Кульку підтискує пружина 4, яка спирається на біметалеву мембрану 5. Корпус незворотного клапану фіксується у корпусі штуцера накидною гайкою 6. Штуцер фіксується у тілі циліндрового втулки 10 різьбовим з'єднанням. Мастило потрапляє до дзеркала втулки через отвори 11, які виконані під кутом до осі штуцера. Між штуцером та втулкою та між штуцером та тілом блоку циліндрів встановлені мідні ущільнення. До тіла блоку циліндрів ущільнення притискується гайкою притискною 7 через шайбу 8.

У розробці застосовано комбінацію отворів та пружних елементів. У статичному режимі (двигун вимкнено) кулька незворотного клапана, яка притискується пружиною та мембраною, замикає канал мащення.

У динамічному режимі (двигун працює) мастило під тиском надходить від лубрікатору до незворотного клапану. Коли тиск досягне номінального значення, струм мастила відтискує кульку і мастило через центральний отвір у штуцері та похилі отвори надходить до дзеркала циліндрового втулки. Завдяки похилим отворам мастило рівномірно розподіляється по дзеркалу, а самі отвори зменшеного діаметру не спричиняють появу точок концентрації напруги у тілі втулки.

Якщо відбувається зміна температури та в`язкості мастильного матеріалу біметалева пластинка підсилює або зменшує сумарний тиск на кульку незворотного клапану. Тим самим відбувається організація процесу мащення з урахуванням дійсної температури та в`язкості мастильних матеріалів

Висновки і перспективи подальших досліджень. Сутність описаних вище конструкцій мастильних пристроїв випливає з результатів попередніх досліджень і представляє собою канонічні в техніці рішення. В даному випадку вони істотно покращують процес маслоподачі і значно підвищують ефективність існуючих систем.

В цілому описані вище рішення забезпечують підведення всього масла безпосередньо до стика "кільце-втулка" і, тим самим, створюють умови для подальшого вдосконалення організації змазування циліндра.

За рахунок капілярних властивостей каналу, що забезпечують постійну заповненість його маслом, гранично обмежене проникнення

гарячих газів, яке, крім окисних процесів, супроводжувалося інтенсивним перемішуванням з маслом і приготуванням суміші, що інтенсифікує концентрованість порцій.

Розроблені нові та вдосконалені мастильні пристрої забезпечують виведення всього масла на дзеркало регулярними і рівномірними порціями.

Перелік використаних джерел

1. Богач В.М. Підвищення ефективності суднових дизелів шляхом удосконалення лубрикаторних систем: Монографія / В.М. Богач – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – 294 с.

2. Богач В.М. Аналіз умов подачі масла в циліндри дизелів морських суден / В.М. Богач, І.М. Слободянюк, А.М. Шебанов // Суднові енергетичні установки: наук-техн. зб. Вип. 41. - Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С. 20-28.

3. Богач В.М. Особливості роботи лубрикаторних систем суднових довгоходових двигунів / Богач В.М., Довіденко Ю.М., Дуранов О.П. // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вып. 44. - Одеса: НУ «ОМА», 2022. С. 53-63.

4. А. с. 303474 СССР, МПК F16n 7/38. Лубрикаторная система смазки ци-линдров / 303474 (СССР). – 1292233/24-6; заявл. 23.12.68; опубл. 13.05.71.

5. Двигуни внутрішнього згоряння / В. Г. Дяченко; за ред. А. П. Марченка. - Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – 488 с.

10.31653/smf47.2023.23-31

Заблоцький Ю.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Енергетичні комплекси суден морського та внутрішнього водного транспорту є багатокомпонентними структурними об'єктами, при цьому:

- їх функціонування починається з прийому на борт судна робочих рідин (палива, мастила, води) [1, 2];
- їх основним експлуатаційним завданням є перетворення потенційної енергії робочих рідин на корисну роботу, що забезпечує або рух судна, або вироблення теплової та електричної енергії [3, 4];
- завершальним етапом їх виробничого циклу є видалення відпрацьованих газів і охолоджувальних рідин у довкілля [5, 6].

При цьому необхідно забезпечувати не тільки вимоги щодо отримання ефективної потужності і підтримки екологічних параметрів, але й мінімальний рівень втрат енергії під час перетворення вхідної енергії на корисну роботу. Системами, які сприяють цьому, є системи мащення, які за своїм призначенням та функціюванням поділяють на циркуляційні та циліндрові [7, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Конструкційні та технологічні заходи, що забезпечують зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), розглядалися в різних роботах. При цьому увага приділялася модифікації поверхонь циліндро-поршневої групи [9, 10], забезпеченню мінімальної витрати палива [11, 12] ї властивостей робочих поверхонь основних елементів дизеля [13, 14].

Постановка завдання. Аналіз досвіду проектування та експлуатації суднових пропульсивних комплексів, що забезпечують мінімальний рівень необертових втрат, показує, що їх вдосконалення доцільно вести за наступними напрямками:

- підвищення стійкості роботи деталей кривошипно-шатунного механізму (КШМ) і підшипників руху [15, 16];
- зниження втрат енергії за рахунок підвищення пружнодемпфуючих властивостей мастильного матеріалу, що забезпечує

процеси мащення та охолодження КШМ і підшипників ковзання, а також працездатний стан колінчатого валу та лінії валопроводу [17, 18];

- мінімізації гідравлічних втрат і контактних навантажень у паливній апаратурі високого тиску [19];
- розвитку методів діагностики технічного стану вузлів і деталей дизеля, а також функціональних характеристик робочих рідин, що забезпечують отримання корисної роботи [20];
- удосконалення методів, що сприяють зниженню термічних і динамічних навантажень на рухомі та нерухомі деталі дизеля та валопроводу [21].

Найбільшим доступним в умовах експлуатації вже існуючого енергетичного обладнання є оптимізація роботи циркуляційних систем мащення.

Виклад основного матеріалу дослідження. З цілого ряду методів, що є найбільш прийнятними для суднових умов (з технологічної та фінансової точки зору), є використання оптимального доливання мастила в систему та застосування поверхнево активних речовин (ПАР) [22, 23].

Вплив інтенсивності доливання моторного мастила в загальний об’єм циркуляційної системи мащення на механічні втрати енергії можливо оцінити за зміною механічного коефіцієнту корисної дії (ККД) дизеля для різних умов експлуатації (різних умов поповнення системи мащення свіжим мастилом). Для цього виконувалось вимірювання механічного ККД на різних режимах роботи дизелів 6EY22AW (що відповідають 35-ти, 50-ти, 65-ти і 80-ти %-ому навантаженню) за різної інтенсивності поповнення системи мащення:

- 1-ий дизель – через кожні 100 годин роботи;
- 2-ий – через кожні 25 годин роботи№
- 3-ий – через кожні 10 годин роботи.

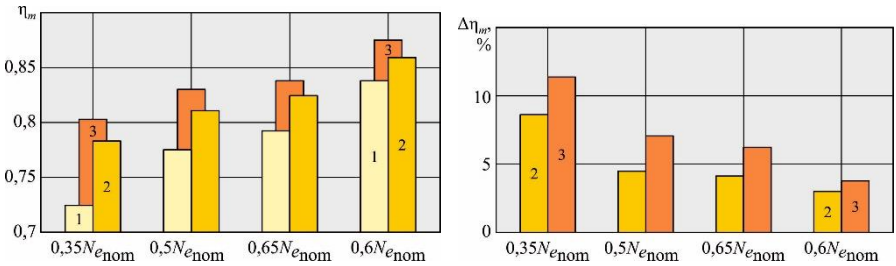
На кожному з досліджуваних режимів ($0{,}35N_{еном}$, $0{,}5N_{еном}$, $0{,}65N_{еном}$, $0{,}8N_{еном}$) дизелі експлуатувалися рівний проміжок часу, який залежно від навантаження суднової електростанції становив 1,5...2,5 години. Зміна навантаження на двигуни за цей час не перевищувало ±2,5 %, а отриманий масив значень механічного ККД дозволяв із високою точністю визначити його середнє значення.

У результаті були отримані значення, узагальнені у вигляді таблиці 1, за результатами якої побудована діаграма, що наведена на рис. 1.

Таблиця 1. Механічний ККД та відносне збільшення механічного ККД, %, суднових дизелів 6EY22AW фірми Yanmar за різних умов експлуатації

Умови експлуатації	Навантаження на двигун			
	$0{,}35N_{еном}$	$0{,}5N_{еном}$	$0{,}65N_{еном}$	$0{,}8N_{еном}$
Двигун № 1 (поповнення через 100 годин)	0,722 / –	0,776 / –	0,793 / –	0,842 / –
Двигун № 2 (поповнення через 25 годин)	0,786 / 8,86	0,812 / 4,64	0,828 / 4,41	0,868 / 3,09
Двигун № 3(поповнення через 10 годин)	0,803 / 11,22	0,831 / 7,09	0,842 / 6,18	0,874 / 3,80

Відносне збільшення механічного ККД, значення якого наведені в таблиці 1, визначалось за виразами $\Delta\eta = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta} \cdot 100\%$ – для двигуна № 2 та $\Delta\eta = \frac{\eta_3 - \eta_1}{\eta} \cdot 100\%$ – для двигуна № 3, де η_1, η_2, η_3 – механічний ККД відповідних дизелів.



а) *б*)

Рис. 1. Зміна механічного ККД (*а*) та відносне збільшення механічного ККД (*б*) суднових дизеля 6EY22AW фірми Yanmar за різної інтенсивності доливання мастила:
1 – через 100 годин; 2 – через 25 годин; 3 – через 10 годин

Наведені в таблиці 1 і на рис. 1 результати підтверджують зниження втрат енергії під час скорочення часу між доливанням мастила в обсяг циркуляційної системи.

Для визначення впливу ПАР на втрати енергії суднових середньообертових дизелів експерименти отримали наступне продовження [9, 15, 18]. Як і в попередній серії експериментів, дизелі експлуатува-

лися на рівновеликому навантаженні (250...750)±(15...45) кВт, однакову кількість часу 12...15 годин/добу.

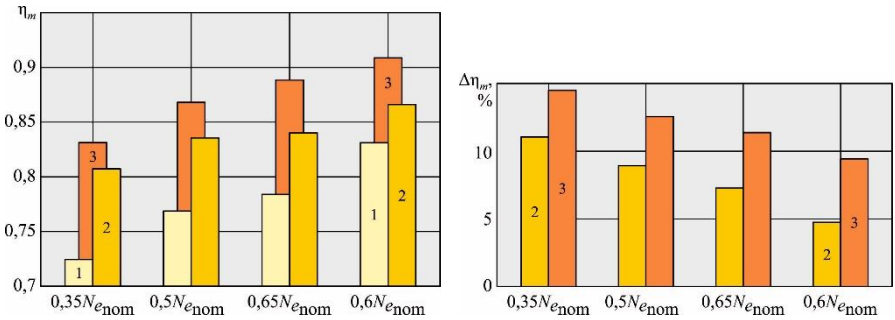
Технологічна послідовність проведення експериментів полягала в наступному. Перший дизель був «контрольним», і після заміни мастила в його системі мащення інших технічних заходів з ним не проводилося, і відповідно до вимог заводу-виробника його експлуатація здійснювалася протягом 100 годин роботи без проміжного поповнення мастила в системі. За цей період експлуатації кількість мастила в циркуляційній системі дизеля не знижувалась нижче гранично допустимого значення. При цьому в циркуляційній системі з точністю ±(2,5...3) % підтримувалися постійний тиск і температура мастила. Система мащення другого дизеля поповнювалася свіжим мастилом через кожні 10 годин роботи до верхнього рекомендованого в картері дизеля, що відповідало максимально можливому обсягу мастила в системі. Даний період поповнення було визначено в якості оптимального під час проведення попередніх експериментів. Система мащення третього дизеля спочатку заповнювалася мастилом з ПАР, що містить у своєму складі солі міді. Оптимальна концентрація ПАР становила 0,1 % від обсягу мастила в системі мащення і була встановлена за допомогою попередніх оптичних і триботехнічних досліджень [7, 8, 13, 17]. Крім того, через кожні 10 годин роботи здійснювалося поповнення циркуляційної системи мащення даного дизеля мастилом з такою ж концентрацією ПАР.

Аналогічно попередній серії експериментів, для кожного дизеля в діапазоні навантажень (0,35...0,8)$N_{е\text{ном}}$ виконувалося визначення механічного ККД. Результати цих експериментів наведені в таблиці 2 та надані на рис. 2.

Таблиця 2. Механічний ККД та відносне збільшення механічного ККД, %, суднових дизелів 6EY22AW фірми Yanmar за різних умов експлуатації

Умови експлуатації	Навантаження на двигун			
	$0{,}35N_{е\text{ном}}$	$0{,}5N_{е\text{ном}}$	$0{,}65N_{е\text{ном}}$	$0{,}8N_{е\text{ном}}$
Поповнення через 100 годин	0,726 / –	0,771 / –	0,789 / –	0,832 / –
Поповнення через 10 годин	0,808 / 11,29	0,841 / 9,08	0,847 / 7,35	0,872 / 4,81
Поповнення через 10 годин та додавання ПАП	0,834 / 14,88	0,871 / 12,97	0,881 / 11,66	0,912 / 9,62

Відносно збільшення механічного ККД, значення якого наведені в таблиці 2, розраховувалось відповідно вищевикладеної методики.



а) *б*)

Рис. 2. Зміна механічного ККД (*а*) та відносне збільшення механічного ККД (*б*) суднових дизеля 6EY22AW фірми Yanmar за різної інтенсивності доливання мастила:
1 – робота системи мащення в штатному режимі; 2 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи; 3 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи і додавання поверхнево активної присадки

Висновки і перспективи подальших досліджень. Із цілого ряду методів зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях найбільш прийнятними для суднових умов (з технологічної та фінансової точки зору) є використання оптимального доливання мастила в систему циркуляційного мащення і застосування поверхнево активних речовин. Перший (доливання мастила) рекомендовано заводом-виготовлювачем, але, як правило, розроблено для номінального режиму роботи дизеля за умови його експлуатації за стандартних умов. Другий (застосування присадок) не має широкого розповсюдження через необхідність додаткових досліджень та розробки спеціальних рекомендацій, що враховують особливості експлуатації дизелів на різних експлуатаційних режимах, а також у випадках зміни одного сорту палива на інший.

Зниження механічних втрат оцінюється прямо пропорційним зростанням механічного ККД дизеля. Цей параметр під час роботи дизеля 6EY22AW фірми Yanmar з рекомендованою фірмою-виробником інтенсивністю доливання моторного мастила в циркуляційну систему мащення та без додаткового додавання ПАР до об’єму моторного мастила в діапазоні навантаження (0,35…0,8)$N_{еном}$ знаходиться в межах 0,722…0,842.

Вибір оптимального режиму поповнення циркуляційної системи, а також додавання в загальний обсяг циркуляційної системи поверхнево-активної присадки з оптимальною концентрацією (визначення якої здійснюється попередніми лабораторними дослідженнями), сприяє збільшенню механічного ККД дизеля до рівня 0,834…0,912 та відповідному зниженню механічних втрат та збільшенню ефективної потужності.

При оптимальному поповненні циркуляційної системи (яке відповідно до експериментальних досліджень складає 10 годин) та додаванням до обсягу циркуляційної системи мащення ПАР (з оптимальною концентрацією 0,1 % за загальним обсягом системи) можливо досягнення 9,62…14,62 %-е збільшення механічного ККД дизеля та відповідне зменшення його механічних втрат.

Перелік використаних джерел

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

2. 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.

3. Sagin S., Sagin A. 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. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.

4. 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.

5. 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 and Technology. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

6. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic

Performance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – 120. https://doi.org/10.3390/jmse11010120.

7. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.

8. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса : ОНМУ. – С. 78-88.

9. 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.

10. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

11. Звєрьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

12. Кривий М. О., Сагін С. В. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 18 - 24. doi:10.31653/smf343.2021.18-24

13. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.

14. 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.

15. 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). – 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.

16. Мельник О.М., Онищенко О.А., Парменова Д.Г. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.

17. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2011. – № 26. – Одесса : ОНМА. – С.116-125.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

10.31653/smf47.2023.32-45

Кривий М.О.

Національний університет «Одеська морська академія»

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРНИХ КУТІВ ПАР КОВЗАННЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми в загальному вигляді. Пари ковзання є одним із основних динамічних вузлів суднових енергетичних установок (СЕУ), довговічність роботи яких суттєво впливає на довговічність СЕУ в цілому. Для розрахунку і прогнозування безаварійної роботи пар ковзання використовують інтегральні показники пари ковзання використовують інтегральні показники їх роботи, такі як коефіцієнт навантаження, коефіцієнти спротиву обертанню та гідродинамічного тертя. Обчислення цих показників залежить від так званих *характерних кутів* роботи пари ковзання, до яких будемо відносити: початок і кінець робочої зони, кут максимального тиску і кут відхилення лінії центрів. Предметом дослідження даної роботи є отримання математичних моделей для визначення *характерних кутів* роботи пари ковзання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню роботи пар ковзання, зокрема, за допомогою рівняння Рейнольдса присвячено багато робіт [1 - 9]. Вони розглядали різні аспекти вказаної проблеми і виконувались різними методами. Зокрема, в роботах [8, 9], запропонована достатньо повна математична модель для визначення розподілу гідродинамічного тиску в мастильному шарі. На основі отриманих там розв’язків отримані у вигляді таблиць інтегральні характеристики мастильного шару, якими користуються для розрахунків довговічності роботи підшипників ковзання. В роботах [4-7] цей підхід отримав подальший розвиток, що дозволило отримати інтегральні характеристики для неньютонівських мастильних шарів. Однак, недоліком існуючих розв’язків є те, що завчасно невідомі характерні кути мастильного шару і не враховується значення радіального зазору підшипника ковзання. Але саме цей параметр змінюється в процесі експлуатації і його не врахування може призвести до не коректної оцінки довговічності роботи пар ковзання суднових енергетичних установок. Усуненню цього недоліку і присвячена дана робота.

Постановка і математична модель задачі. Розглянемо пару ковзання: підшипник – шип, (втулка – вал), в якій відсутнє торцеве

витікання мастил (плоска задача гідродинамічної теорії мащення). Позначимо через $h = h(\varphi)$ товщину мастильного шару в робочій зоні пари ковзання, тобто в зоні в якій виникає додатній гідродинамічний тиск $p = p(\varphi)$. Кут φ задовольняє умові $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$, де φ_1, φ_2 – кути, які визначають границі робочої зони мастильного шару (Рис.1). Ці два кути будемо першими двома *характерними кутами* пари ковзання. В мастильному шарі виникає дотичне гідродинамічне напруження зсуву $\tau_{xy} = \tau_\varphi = \tau_\varphi(\varphi)$. Визначення тиску $p(\varphi)$ і зсувного напруження τ_φ є *основною задачею* для розрахунку критеріїв безаварійної роботи підшипника ковзання. Ця задача розпадається на дві послідовно розв'язуванні задачі, а саме: задачу визначення гідродинамічного тиску $p(\varphi)$ і задачу по визначенні гідродинамічного напруження зсуву τ_φ.

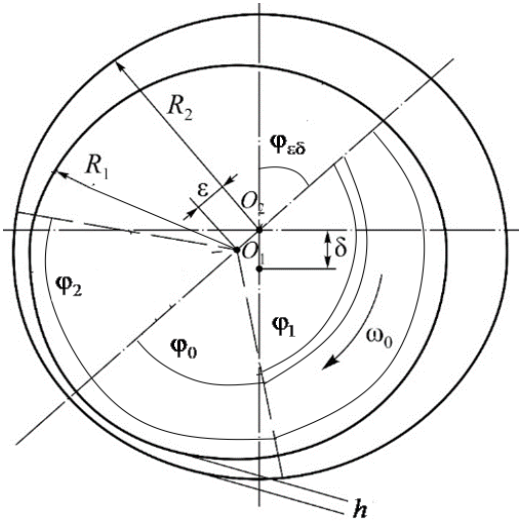


Рис. 1. Модель руху пари ковзання СЕУ

Для розв'язання першої задачі скористаємось диференціальним рівнянням Рейнольдса, яке в припущеннях стаціонарності процесу, що обумовлюється сталої швидкістю обертання ω_0, для ньютонівських мастил, подамо так [4, 8]

$$\frac{d}{d\varphi}\left(h^3 \frac{dp}{d\varphi}\right) = 6\omega_0 \mu_0 R_1^2 \frac{dh}{d\varphi}, \quad \varphi_1 < \varphi < \varphi_2, \tag{1}$$

де $\mu_0\left[кг/(с\cdot м)\right]$ – динамічна в'язкість мастила, яка відповідає зовнішньому тиску при температурі мастил в робочій зоні; R_1 – радіус цапфи.

Для обчислення $h(\varphi)$, можна скористаємось поданням [4]:

$$h(\varphi)=\delta+\varepsilon\cdot\cos\varphi=\delta(1+\varepsilon_0\cdot\cos\varphi)=\delta\tilde{h}(\varphi) \qquad (2)$$

де $\delta=R_2-R_1$, ε – ексцентриситет центрів тіл пар ковзання; $\varepsilon_0=\dfrac{\varepsilon}{\delta}$ – відносний ексцентриситет

Умови рівність нулю гідродинамічного тиску на кінці і початку робочої зони, а також його не від'ємність в середині робочої зони подамо так

$$p(\varphi_1)=p(\varphi_2)=0,\ p'(\varphi_2)=0. \qquad (3)$$

Перейдемо в рівнянні (1) і поданні (2) і умовах (3) до безрозмірних величин, тобто до безрозмірного тиску $\tilde{p}(\varphi)$ і товщини мастильного шару $\tilde{h}(\varphi)$:

$$p(\varphi)=k_1\tilde{p}(\varphi),\ h(\psi)=\tilde{h}(\varphi)\delta, \qquad (4)$$

де $k_1=\dfrac{\mu_0\omega_0}{\delta_0^2}\left[\dfrac{кг}{м\cdot c^2}=1\text{Па}\right]$.

Скориставшись математичною моделлю (1) - (3), отримаємо відносно безрозмірного питомого тиску $\tilde{p}(\varphi)$ наступну краєву задачу

$$\begin{cases}\dfrac{d}{d\varphi}\left(\tilde{h}^3\dfrac{d\tilde{p}}{d\varphi}\right)=6\dfrac{d\tilde{h}}{d\varphi}; \quad \varphi_1<\varphi<\varphi_2.\\ \tilde{h}(\varphi)=1+\varepsilon_0\cos\varphi\end{cases} \qquad (5)$$

$$\tilde{p}(\varphi_1)=\tilde{p}(\varphi_2)=0;\ \tilde{p}'(\varphi_2)=0. \qquad (6)$$

Визначення відносного гідродинамічного тиску і напружень в'язкого зсуву. Згідно перших двох умов із (6), існує кут $\varphi_0\in(\varphi_1;\varphi_2)$ в робочій зоні пари ковзання, в якій контактний тиск $\tilde{p}(\varphi_0)$ досягає максимуму: $\tilde{p}_0=\tilde{p}(\varphi_0)=\max\limits_{\varphi\in(\varphi_1;\varphi_2)}\tilde{p}(\varphi)$. Кут φ_0 будемо вважати третім *характерним кутом* пари ковзання. З огля-

дом на це, точний розв'язок диференціального рівняння (5), який задовольняє другій крайовій умові в (6), подамо так

$$\tilde{p}(\varphi) = 6\int_{\varphi}^{\varphi_2}\left(\frac{1+\varepsilon_0\cos\varphi_0}{\left(1+\varepsilon_0\cos\varphi\right)^3} - \frac{1}{\left(1+\varepsilon_0\cos\varphi\right)^2}\right)d\varphi\,,\ \varphi\in(\varphi_1;\varphi_2)\,. \quad (7)$$

Реалізація першої крайової умови із (3.2): $\tilde{p}\left(\varphi_1\right)=0$, приводить до рівняння відносно кута φ_0

$$\cos\varphi_0 = j_\varphi\,; \quad (8)$$

де

$$j_\varphi = \frac{j_3^c(\varphi_1,\varphi_2,\varepsilon_0)}{j_3(\varphi_2,\varphi_2,\varepsilon_0)}\,;\ j_k(\varphi,\varphi_2,\varepsilon_0) = \int_{\varphi}^{\varphi_2}\frac{d\varphi}{\left(1+\varepsilon_0\cos\varphi\right)^k}\,;$$

$$j_k^c(\varphi,\varphi_2,\varepsilon_0) = \int_{\varphi}^{\varphi_2}\frac{\cos\varphi d\varphi}{\left(1+\varepsilon_0\cos\varphi\right)^k}\,,\ j_k^s(\varphi,\varphi_2,\varepsilon_0) = \int_{\varphi}^{\varphi_2}\frac{\sin\varphi d\varphi}{\left(1+\varepsilon_0\cos\varphi\right)^j}\,.$$

Отриманий розв'язок (8) і диференціальні рівняння Ньютона та Рейнольдса дають можливість визначити зсувні напруження у мастильному шарі на цапфі

$$\tilde{\tau}_{sh} = \frac{4}{1+\varepsilon_0\cos\varphi} - \frac{3(1+\varepsilon_0\cos\varphi_0)}{(1+\varepsilon_0\cos\varphi)^2}\,, \quad (9)$$

Основну характеристику пари ковзання, а саме *коефіцієнт навантаженості* (*коефіцієнт несучої сили*) Φ_P визначають із умов силової рівноваги пари ковзання. Останні, при вертикальному завантаженні (див. рис. 1), зовнішньою силою: $\vec{F}_r = (P;0)$, подамо так

$$\Phi_P = 2\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\cos(\psi+\varphi_\varepsilon)\tilde{p}(\psi)d\psi - 2\delta_0\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\sin(\psi+\varphi_\varepsilon)\tilde{\tau}_\varphi(\psi)d\psi\,, \quad (10)$$

$$0 = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\sin(\psi+\varphi_\varepsilon)\tilde{p}(\psi)d\psi - \delta_0\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\cos(\psi+\varphi_\varepsilon)\tilde{\tau}_\varphi(\psi)d\psi\,, \quad (11)$$

де $\delta_0 = \delta R_1^{-1}$ – відносний радіальний зазор.

В цих рівняннях міститься четвертий *характерний кут* пари ковзання, а саме кут φ_ε відхилення лінії центрів від вертикальної осі, для його визначення скористаємося співвідношенням (11), яке перепишемо так

$$0=\cos\varphi_\varepsilon\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\cos\psi(\tilde{p}'(\psi)-\delta_0\tilde{\tau}_\varphi(\psi))d\psi-\sin\varphi_\varepsilon\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\sin\psi(\tilde{p}'(\psi)-\delta_0\tilde{\tau}_\varphi(\psi))d\psi$$

Звідси для визначення кута φ_ε отримаємо наступне рівняння

$$\mathrm{tg}\varphi_\varepsilon=\frac{A_c^-}{A_s^-}. \qquad (12)$$

$$A_c^-=-2\delta_0 j_1^c+(3+1.5\tilde{h}_0\delta_0)j_2^c-3\tilde{h}_0 j_3^c;$$

$$A_s^-=-2\delta_0 j_1^s+(3+1.5\tilde{h}_0\delta_0)j_2^s-3\tilde{h}_0 j_3^s,\ \tilde{h}_0=1+\varepsilon_0\cos\varphi_0$$

Відмітимо, що, в балансі сил (10), (11), зазвичай, не враховують сили в’язкого зсуву. Обґрунтовуючи це тим, що присутній там в якості множника відносний радіальний зазор δ_0, приймає малі значення $(\approx 10^{-3})$. Однак в процесі експлуатації відносний радіальний зазор має тенденцію до збільшення, що може призводить до похибок в оцінці точності довговічності роботи пари ковзання.

Побудова математичних моделей для характерних кутів пари ковзання та їх аналіз. Для дослідження процесів, які відбуваються в мастильному шарі пари ковзання, в першу чергу підлягають визначенню характерні кути пари ковзання і обчислення відносного гідродинамічного тиску та напружень в’язкого зсуву. Вхідним параметром для визначення вказаних величин для ньютонівських мастил є відносний ексцентриситет ε_0, а також, в меншій мірі, відносний радіальний зазор δ_0.

Складність числового моделювання гідродинамічних процесів в парі ковзання полягає в тому, що границі робочої зони мастильного шару φ_1, φ_2 заздалегідь не відомі. Для подолання цієї проблеми пропонується застосувати метод послідовного наближення або метод варіації границь, який полягає в наступному. Будемо за рахунок варіації параметрів φ_1, φ_2, досягати виконання наступних умов, які витікають із запропонованої математичної моделі:

$$\begin{cases}\left|\tilde{p}(\varphi_1)\right|<e_1,\ \tilde{p}(\varphi_2)=0,\\ \left|\tilde{p}'(\varphi_2)\right|<e_2,\\ \left|\varphi_1+\varphi_{\varepsilon\delta}-90^\circ\right|<e_3.\end{cases} \qquad (13)$$

Тут $e_k,(k=\overline{1,3})$ – точності обчислень, при цьому для практичних розрахунків, достатньо виконання умов $e_1<10^{-5}$, $e_2<10^{-3}$, $e_3<10^{-2}$. Виконання умови $\tilde{p}(\varphi_2)=0$ досягається за рахунок вибору подання (7) розв'язку диференціального рівняння (1).

Реалізацію цього методу можна виконати багатьма способами, зокрема, і за допомогою нейронних сіток. Не зупиняючись на деталях реалізації числового моделювання, яке виконано в середовищі Mapl, наведемо деякі результати. Зокрема, в таблиці 1 наведенні значення характерних кутів пари ковзання: φ_1, φ_2, $\varphi_{\varepsilon\delta}$, φ_0 і довжини дуги робочої зони $\Delta\varphi_\varepsilon$ в градусах в залежності від відносного ексцентриситет ε_0, при значенні відносного радіального зазору $\delta_0=1.63\cdot10^{-3}$. Там також наведені значення кутів відхилення лінії центрів φ_ε при $\delta_0=0$, і відомі значення [8, 9] кута відхилення лінії центрів $\varphi_{\varepsilon k}$.

Використавши, данні таблиці 1, за допомогою регресивного аналізу[11-14], розроблено загальний підхід до побудови математичних моделей характерних кутів пари ковзання. Нехай φ_{ha} деякий характерний кут пари ковзання, його залежність від відносного ексцентриситету ε_0, будемо розшукувати у вигляді

$$\varphi_{ha}=q_1\arccos(\varepsilon_0)+q_2\varepsilon_0. \qquad (14)$$

Невідомі параметри q_1, q_2 визначені, спираючись стандартну схему регресійного і дисперсного аналізу. Побудовану модель будемо вважати адекватною, якщо виконуються критерії, які наведені в роботах [11-14]. В таблиці 2 наведенні значення коефіцієнтів q_1, q_2 та їх рівні значимості відповідно γ_1, γ_2 (P – значення), які визначені за допомогою *t*- критерію Стьюдента, а також нормоване значення коефіцієнту кореляції $\tilde{R}^2$ (R – квадрат) кожної моделі в цілому. Зауважимо, що для адекватності отриманих моделей, вирішальним є виконання двох умов:

1) значення коефіцієнта кореляції повинно приймати найбільш можливе значення: $\tilde{R}^2\to1$;

2) рівні значимості кожного регресора приймати найменші можливі значення: $\gamma_k\to0$.

Таблиця 1. Значення кутів φ_1, φ_2, $\Delta\varphi_\varepsilon$, $\varphi_{\varepsilon\delta}$, φ_ε, $\varphi_{\varepsilon k}$, φ_0.

ε_0	φ_1	φ_2	$\Delta\varphi$	$\varphi_{\varepsilon\delta}$	φ_ε	$\varphi_{\varepsilon k}$	φ_0
0,001	11,8	254,2	242,40	78,2028	66,6499	-	106,09
0,01	27,7	248,1	220,4	62,3030	60,5694	-	111,89
0,05	30,71	244,34	213,63	59,2961	58,9103	-	115,46
0,1	32,07	241	208,93	57,9341	57,7267	72,55	118,998
0,2	34,53	234,34	199,81	55,479	55,3601	61,18	125,65
0,3	37,12	228,07	190,95	52,8878	52,7974	54,30	131,93
0,4	39,96	222,08	182,12	50,0431	49,9664	49,98	137,92
0,5	43,15	216,34	173,19	46,8552	46,7865	46,77	143,66
0,6	46,8	210,75	163,95	43,2037	43,1408	43,12	149,25
0,65	48,87	207,98	159,11	41,1396	41,0793	40,96	152,02
0,7	51,14	205,193	154,053	38,8674	38,8097	38,75	154,81
0,75	53,68	202,37	148,69	36,3216	36,2668	36,03	15763
0,8	56,61	199,449	142,839	33,3983	33,3469	33,33	160,55
0,85	60,08	196,37	136,29	29,9269	29,8796	29,7	163,63
0,9	64,45	192,981	128,531	25,5514	25,510	25,5	167,02
0,925	67,22	191,075	123,855	22,7822	22,7447	22,68	168,93
0,95	70,69	188,9043	118,2143	19,3108	19,2783	19,27	171,10
0,975	75,59	186,1956	110,6056	14,4159	14,3912	14,37	173,80
0,99	80,38	183,87853	103,49853	9,6291	9,6122	9,62	176,12

Вважається відмінним зв’язок між характерними кутами та регресорами $\arccos(\varepsilon_0)$ і ε_0, а запропоновані моделі (14) адекватними, якщо виконуються умови: $0.9 \le \tilde{R}^2 < 1$, $\gamma_k \le 10^{-3}$.

Таблиця 2. Значення параметрів моделей (14) і їх регресійні характеристики

	q_1	γ_1	q_2	γ_2	$\tilde{R}^2$
$\varphi_{\varepsilon\delta}$	39,999757	10^{-15}	7,842786	10^{-8}	0,998541
$\varphi_{\varepsilon k}$	44,473716	10^{-16}	4,6165924	$9\cdot10^{-4}$	0,996539
φ_1	12,867107	10^{-6}	66,64278	10^{-14}	0,986075
φ_2	150,87762	0	138,92802	10^{-15}	0,996906
φ_0	67,411397	0	153,61016	0	0,998389
$\Delta\varphi$	138,01051	0	72,285239	10^{-12}	0,997327

Отже, побудовані моделі (14) є адекватними для усіх характерних кутів із максимально можливим значенням коефіцієнту кореляції $\tilde{R}^2$.

На рис. 2 наведенні залежності кута повороту лінії центрів $\varphi_{\varepsilon\delta}$ від відносного ексцентриситету ε_0, отримані за допомогою таблиці 1 – точкова крива чорного кольору, і за допомогою моделі (14) – червона суцільна крива. Очевидно, обидві залежності відмінно узгоджуються і практично співпадають. Там же наведені залежність для кута повороту $\varphi_{\varepsilon k}$, яка отримана за допомогою моделі (14) - синя суцільна крива, і значення кута повороту лінії центрів $\tilde{\varphi}_\varepsilon$ - зелена суцільна лінія, яка отримана в припущеннях, що центр цапфи описує півколо, тобто має місце рівність: $\cos\tilde{\varphi}_\varepsilon = \varepsilon_0$. Із наведених графіків слідує, що найкраще поведінку кута відхилення центрів описує залежність для $\varphi_{\varepsilon\delta}$, яка добре узгоджується із експериментальними даними [8, 9], де встановлено, що при значеннях $\varepsilon_0 < 0{,}8$, траєкторія центру цапфи суттєво відрізняється від півкола.

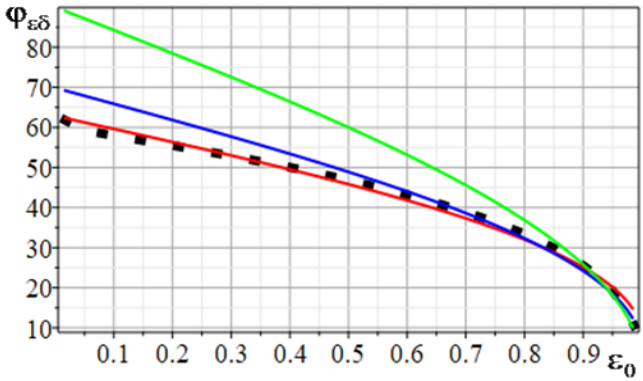


Рис. 2. Залежність кутів повороту лінії центрів від ε_0

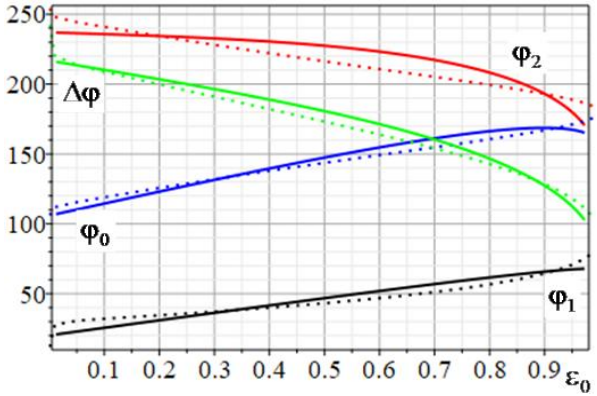


Рис. 3. Залежність характерних кутів від ε_0.

На рис. 3 наведені залежності характерних кутів, які отримані за допомогою сплайн-апроксимації на основі таблиці 1, це точкові криві, і за допомогою моделей (14) – суцільні криві. При цьому лінії чорного кольору описують поведінку кута φ_1, лінії червоного кольору поведінку кута φ_2, лінії синього кольору поведінку кута φ_0 і лінії зеленого кольору зміну довжини робочої зони $\Delta\varphi$ (в градусах) в залежності від відносного ексцентриситету ε_0.

Отримані графіки показують відмінне співпадіння результатів, отриманих за допомогою нових математичних моделей, із табличними значеннями.

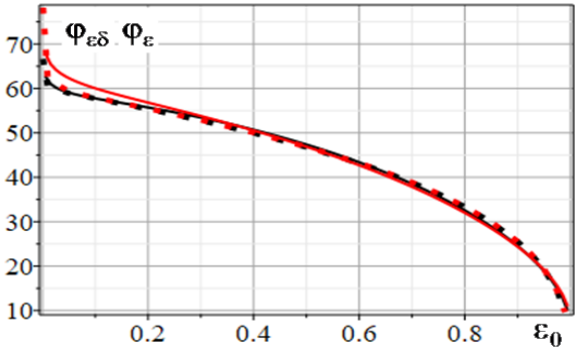


Рис. 4. Залежність кутів повороту лінії центрів від ε_0

На рис. 4 наведенні залежності кутів повороту лінії центрів $\varphi_{\varepsilon\delta}$, φ_{ε} (в градусах) від ε_0, які отримані лінійною сплайн-апроксимацією даних таблиці 1 і за допомогою математичних моделей (14). При цьому лінії червоного кольору відповідають куту $\varphi_{\varepsilon\delta}$, а лінії чорного кольору відповідають куту φ_{ε}.

Порівняння залежностей для кутів $\varphi_{\varepsilon\delta}$ і φ_{ε}, які отримані відповідно для $\delta_0 = 0.00163$ і $\delta_0 = 0$, показує відмінність їх значень при відносному ексцентриситеті $\varepsilon_0 < 0.2$. Оскільки ці значення характерні для усталеного руху, виникає потреба дослідити, як залежить кут відхилення центрів $\varphi_{\varepsilon\delta}$ від відносного радіального зазору δ_0. Для цього проаналізуємо розв'язки рівняння (12).

На рис. 5, 6 наведені залежності кута $\varphi_{\varepsilon\delta}$ від відносного ексцентриситету ε_0, при різних значеннях відносного радіального зазору δ_0. На обох рисунках крива чорного кольору відповідає значенню $\delta_0 = 0.0001$; червоного – значенню $\delta_0 = 0.001$; синього - значенню $\delta_0 = 0.002$; зеленого - значенню $\delta_0 = 0.003$; жовтого - значенню $\delta_0 = 0.01$; коралового - значенню $\delta_0 = 0.02$; пурпуровий - значенню $\delta_0 = 0.035$. На рис. 5 відносний ексцентриситет ε_0 змінюється на всьому проміжку від 0,0097 до 0,99, а на рис. 6 на проміжку (0,0097; 0,2).

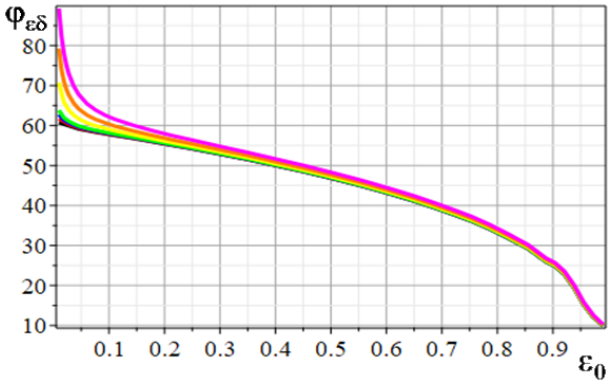


Рис. 5. Залежність кута повороту лінії центрів від ε_0

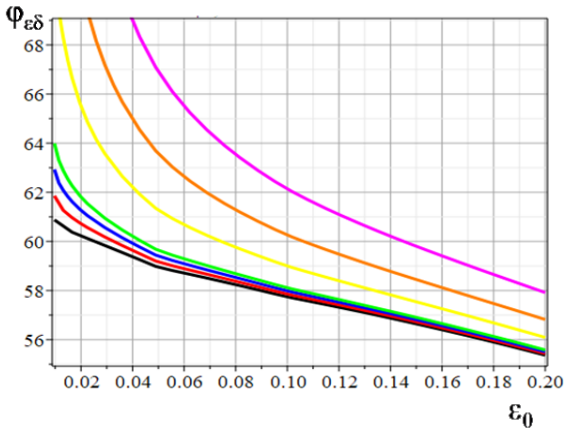


Рис. 6. Залежність кута повороту лінії центрів від ε_0

Результати обчислень показують, що на значення кута повороту лінії центрів $\varphi_{\varepsilon\delta}$ відносний радіальний зазору δ_0 практично не впливає при $\varepsilon_0 > 0.2$, і впливає при малих значеннях $\varepsilon_0 < 0.2$. Цей вплив виявляється особливо суттєвим при $\delta_0 > 0.003$, тобто при наявності деформацій і зношування в елементах пари ковзання в результаті тривалої експлуатації при екстремальних режимах роботи. Крім того, при усталених режимах експлуатації відносний ексцентриситет прямує до нуля: $\varepsilon_0 \to 0$, тому нехтування впливу значення δ_0 на положення лінії центрів є необґрунтованим.

На тривимірному рис. 7 показано загальну картину поведінки кута відхилення лінії центрів $\varphi_{\varepsilon\delta}$ при максимально можливій зміні відносного ексцентриситету ε_0 і відносного радіального зазору δ_0

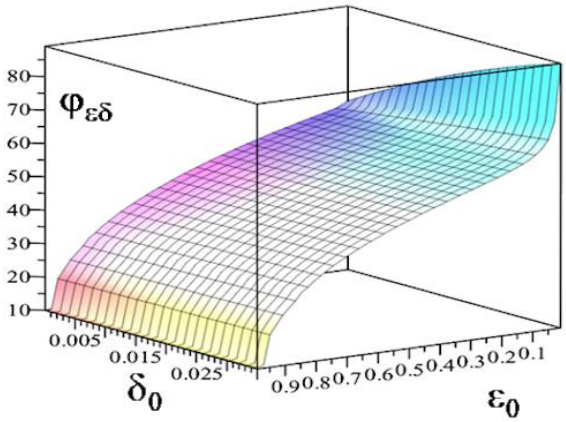


Рис. 7. Залежність кута лінії центрів від ε_0 і δ_0.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отже, розробленим методом варіації границь, отримані розв'язки математичної моделі мастильного шару пари ковзання, що дало можливість отримати у вигляді таблиці уточнені значення для характерних кутів. За допомогою останніх і методів регресивного аналізу побудовані *нові математичні моделі* для характерних кутів, які залежать від відносного ексцентриситету ε_0, а математичні моделі кута відхилення лінії центрів $\varphi_{\varepsilon\delta}$ і від відносного радіального зазору δ_0. Встановлено, що при малих значеннях відносного екситриситету: $\varepsilon_0 < 0.2$ (усталений режим) і при значному часі експлуатації пар ковзання потрібно враховувати значення радіального зазору δ_0 при дослідженні довговічності роботи пар ковзання суднових енергетичних установок.

Запропонований підхід може бути використаний для отримання математичних моделей інтегральних характеристик мастильного шару пари ковзання.

Перелік використаних джерел

1. Deters, L. (2014). Plain Bearings. In: Mang, T. (eds) Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2_14.

2. He T., Zou D., Lu X., Guo Y., Wang Z., Li W. Mixed-lubrication analysis of marine stern tube bearing considering bending

deformation of stern shaft and cavitation / Tribology International. – 2014. Vol. 73, pp. 108-116. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.01.013.

3. Yabo Zhou et al 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 394 042042 DOI 10.1088/1757-899X/394/4/042042.

4. Сагін С. В., Кривий М. О. Визначення розподілу тиску в шарі неньютонівських мастил у суднових енергетичних установках // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. Наук. праць. – 2020. – № 2(62). – С. 160-170. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-160-170.

5. Сагін С. В., Кривий М. О. Розрахунок контактного тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 84 – 92. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-84-92.

6. Кривий М. О., Сагін С. В. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання суднових дизелів/Суднові енергетичні установки. 2021, № 43. – С. 18-23. DOI: 10.31653/smf343.2021.18-24.

7. Кривий М. О., Сагін С. В. Математична модель мастильного шару в парах ковзання в суднових енергетичних установках // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференцій «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика» 05.11.2019 –06.11-2019 р. Одеса, НУ «ОМА». – С. 144 - 148. dx.doi.org/10.31653/2706-7874.

8. A. Szeri, Fluid film lubrication, Cambridge Univ. Press, 1st Ed., Cambridge, U.K., 1998

9. B. Hamrock, S. Schmid, B. Jacobson, Fundamentals of Fluid Film Lubrication, 2nd Ed., Marcel Dekker Inc, N.Y., 2004.

10. Кривой М.А. Обеспечение режимов смазывания подшипниковых узлов малооборотных дизелей при режимах пуска и реверса // Суднова енергетика: стан та проблеми : Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв : Національний університет кораблебудування, 2017. – С. 74 - 78.

11. Кривий М. О. Особливості реології моторних мастил при забезпеченні режимів змащення пар тертя суднових мало-обертових дизелів // Матер. наук.-техн. конференції «Річковий та морський флот : експлуатація і ремонт», 23.03.2017 – 24.03.2017. Частина 1. – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – С. 31 - 34.

12. Кривой А.Ф., Миюсов М.В. Математические модели гидродинамических характеристик пропульсивного комплекса судна для

произвольных углов дрейфа // Судовождение, вып. 28, С. 88-103, 2018. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.88-102.

13. Kryvyi O. F, Miyusov M. V.: “Mathematical model of hydrodynamic characteristics on the ship's hull for any drift angles”, Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Taylor & Francis Group, London, UK., pp. 111-117, 2019.

14. Kryvyi O. F, Miyusov M. V.: The Creation of Polynomial Models of Hydrodynamic Forces on the Hull of the Ship with the help of Multi-factor Regression Analysis /8 International Maritime Science Conference. IMSC 2019. Budva, Montenegro, pp.545-555 http://www. imsc2019. ucg.ac.me/IMSC2019_ BofP. Pdf.

15. Kryvyi O., Miyusov M.V.: Construction and Analysis of Mathematical Models of Hydrodynamic Forces and Moment on the Ship's Hull Using Multivariate Regression Analysis // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2021,Vol. 15, No. 4, pp. 853-864, 2021 doi:10.12716/1001.15.04.18.

10.31653/smf47.2023.46-54

Крупов І.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЗЕМСНАРЯДАМИ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Процес днопоглиблення є важливою галуззю для гірничо-будівельних робіт, а автоматизація цього процесу може призвести до підвищення продуктивності та зменшення потреби у людському персоналі. Однак, автоматизація стикається з численними технічними та інженерними викликами, особливо управлінням якірними землесосами при малій швидкості. Під час днопоглиблення, точність утримання на курсі та контроль над робочими параметрами ґрунту і води відіграють вирішальну роль у забезпеченні безперебійності та ефективності процесу. Основним викликом є розробка та інтеграція систем датчиків автоматичного контролю, які б забезпечували точне вимірювання та моніторинг параметрів ґрунту, тиску, вакууму, тяжіння, товщини ґрунту, а також витрати робочого середовища. Крім цього, системи автоматичного управління земснарядами повинні забезпечувати автоматичну реакцію на різноманітні ситуації, такі як забитий всмоктуючий отвір, забій напірної частини ґрунтопровода чи зміна зовнішніх умов під час роботи.

Іншим важливим аспектом є розвиток систем автоматичного регулювання землесоса (САРЗ), які дозволили б автоматично контролювати швидкість руху снаряда в залежності від геологічних умов та потреби в заборі ґрунту . Це вимагає розробки алгоритмів та програмного забезпечення для ефективного управління рухом землесоса.

Наприклад, системи орієнтації, такі як "Автоствір", потребують подальших досліджень для поліпшення точності та надійності їхньої роботи. Узагальнюючи, автоматизація систем днопоглиблення створює численні технічні завдання та вимагає комплексного підходу до розробки та імплементації систем датчиків, контролю та управління для забезпечення ефективної та безперебійної роботи процесу днопоглиблення.

Запит практики. Наукова стаття описує важливі технології та системи по автоматизації днопоглиблення. Її практична значимість полягає у підвищенні продуктивності, зниженні ризиків аварій, оп-

тимізації ресурсів та покращенні точності даних, що сприяє більш ефективній та безпечній роботі в галузі судноплавства.

Об'єкт дослідження: процес днопоглиблення у морських умовах.

Предмет дослідження: технології, системи та датчики для автоматизації та покращення ефективності днопоглиблення, включаючи манометри, вакуумметри, тягоміри, шароміри, ґрунтометри та витратоміри, а також системи автоматичного управління та орієнтації суднових технічних засобів для цього процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття [1] містить аналіз систем реального часу керування земснарядами, заснованих на штучних нейронних мережах. Розглядаються різні аспекти управління, включаючи точність, стабільність та ефективність роботи системи з використанням нейронних мереж. Досліджуються переваги та обмеження реалізації таких систем та пропонуються рекомендації щодо їх подальшого розвитку.

У статті [2] проводиться аналіз продуктивності пропорційно-інтегрально-диференціального (PID) контролера для управління рухом механізму під'єму екскаватора (руки). Автори досліджують параметри контролера та аналізують відгук руки екскаватора на різні вхідні сигнали. Оцінюються показники ефективності та стабільності роботи контролера та пропонуються рекомендації щодо його оптимізації.

У статті [3] проводиться аналіз систем «наглядового керування» для автономних земснарядів. Досліджуються процеси координації та прийняття рішень пов'язані з автономними операціями земснарядів. Розглядаються техніки планування маршруту, уникнення перешкод та пріорітизації завдань. Аналізуються переваги та обмеження систем наглядового управління та пропонуються можливості для їх покращення.

У статті [4] наведено аналіз адаптивних систем управління для операцій ковша земснаряду. Досліджуються алгоритми адаптивного керування, які оптимізують продуктивність копання, регулюючи параметри, такі як сила копання, траєкторія та глибина. Аналізуються переваги та обмеження адаптивних систем управління та пропонуються рекомендації щодо їх застосування та розвитку.

У статті [5] представлено розробку автоматизованої системи моніторингу та управління для днопоглиблювальних земснарядів. Опи-

сується архітектура системи та методики управління параметрами процесу.

У статті [6] розглядається моделювання системи автоматичного керування днопоглиблювальним земснарядом з використанням системи «Автоствір»

Подано динамічну модель [7] днопоглиблювального обладнання на основі бонд-графів та аналіз її параметрів.

У статті [8] описується розробка та застосування системи автоматичного управління днопоглиблювальним земснарядом.

Статті [9-13] пропонують детальний аналіз та дослідження в галузі автоматичного управління днопоглиблювальними земснарядами. Вони охоплюють різні аспекти, включаючи розробку експертних систем, застосування алгоритмів машинного навчання, оптимізацію процесів з використанням генетичних алгоритмів та створення автоматизованих систем керування для підвищення ефективності операцій.

Ці статті представляють цінну інформацію про різні аспекти систем автоматичного керування земснарядами. Дослідження, представлені у зазначених статтях, допомагають зрозуміти основні принципи, переваги та виклики, пов'язані з розробкою та оптимізацією систем автоматичного управління земснарядами.

Виклад основного матеріалу. Процес днопоглиблення характеризується великою кількістю змінних параметрів. При високій потужності сучасних земснарядів і доступності ряду засобів контролю, керування та управління, оператор (судноводій) не завжди може оптимально управляти процесом та досягти максимальної продуктивності управляючих об'єктів.

На сьогоднішній день на всіх снарядах вже автоматизований процес забору ґрунту : потужні снаряди оснащені системами автоматичного переміщення. Спеціалістам найлегше оптимізувати рухи при допомозі свайно-попільонажних землесосів, а також при роботі великими траншеями. Автоматизація дозволяє підвищити продуктивність днопоглиблювальних снарядів та зменшити чисельність екіпажу. Проте автоматизація управління якірними землесосами, особливо при роботі великими траншеями, викликає певні труднощі через недосконалість консистометрів (ґрунтомірів).

До основних датчиків входять манометр, вакуумметр, тягомір для керування лебідкою, шаромір, ґрунтомір та витратомір. Системи регулювання продуктивності землесосів базуються на зміні швидко-

сті руху снаряда, яку отримують від трьох-чотирьох датчиків, що контролюють режими забору ґрунту та гідротранспорту. Вимірювання швидкості підняття (вибирання) операційних канатів, яке виконується при русі по траншеї і боковому русі (при переміщенні по папільонажній стрічці), здійснюється за допомогою тягоміра або швидкісного вимірювача, який вимірює швидкість піднімання каната.

У річкових траншейних снарядах широко використовуються системи автоматичного регулювання землесоса (САРЗ), де швидкість руху снаряду встановлюється оператором вахтовим багермейстером в залежності від розрахункового насичення пульпи ґрунтом, а САРЗ підтримує цей режим. У разі сигналу про засмічення всмоктуючого отвору або наявності ознак забою напірної частини ґрунтопровода, рух земснаряду в траншейі автоматично зупиняється. Якщо всмоктування ґрунту , який обвалився, відбувається після сигналу "завал", то система автоматично відновлює рух снаряда в траншеї.

Автоматизація технологічного процесу днопоглиблення передбачає включення автоматичного вибору оптимального режиму для приводу черпака або ґрунтонагнітаючої установки і автоматичного переміщення снаряда, що відповідає цьому режиму. Серед відомих систем САРЗ варто виділити "Волгу" і "Шар".

Тому для аналізу обраний модернізований земснаряд «HEGEMANN- IV» (Німеччина).

Судно повністю забезпечене навігаційним обладнанням, що дозволяє якісно утримувати його на позиції та виконувати днопоглиблювальні роботи (рис 1).

Рубка судна ергономічна та комфортна, як для роботи, так і для короткочасного відпочинку (рис 2).

На містку встановлено: 1-ин монітор з електронними навігаційними картами; 2-а монітори навігаційного радара; відповідні датчики (від швидкості перекладки керма і кута повороту пера керма, щільності та швидкості прийому вантажопотоку ґрунта), планшет для утримання судна на ділянці.

Повністю запрограмований інтерфейс керує всіма системами судна з капітанського (операторського) містка рубки. Як штурман-судноводій, так і оператор-багермейстер мають ідентичні панелі приладів і взмозі автономно один від одного виконувати функції з навантаження/розвантаження судна та бункерування його запасами (рис 3).

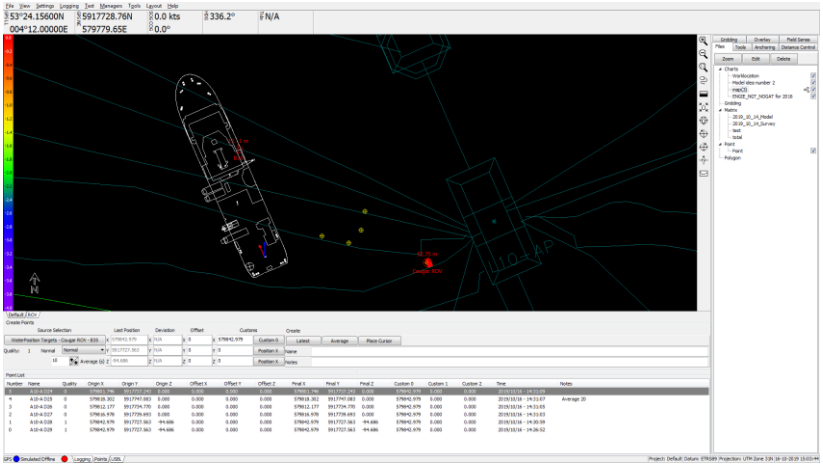


Рис. 1. Точки попередження

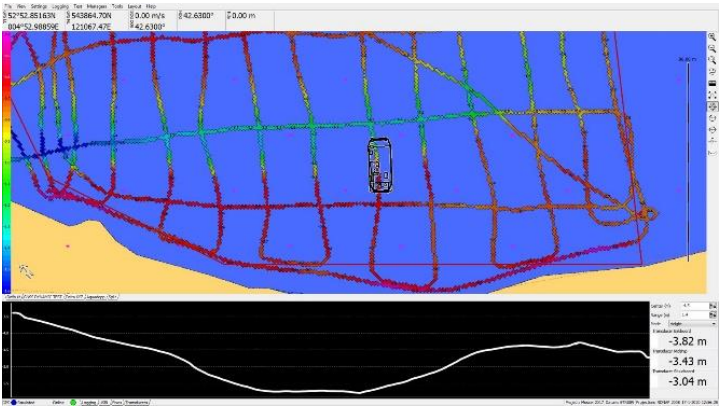


Рис. 2. Створення сітки точок проміру

Достатня кількість засобів УКХ зв’язку, GPS навігатори забезпечують роботу авторульового приладу. Завдяки цього судно досить добре утримується на курсі як при переході морем, так і при роботі на ділянці ґрунтозабору (рис. 4).

Панель авторульового виведена як до місця штурмана, так і до місця оператора. Окремо встановлений в рубці телеграф з високою швидкістю дозволяє перекладати лопаті гвинта для дачі ходу «вперед» та реверсу «назад». Запуск головних та допоміжних двигунів і систем «з містка».

На містку також розташований окремий інтерфейс керування комп’ютерами, насосами і, відповідно, всіма клінкетами, які розта-

шовані на верхній палубі та забезпечують роботу з навантаження / розвантаження судна, а також освітлення та висвітлення цього технологічного процесу.

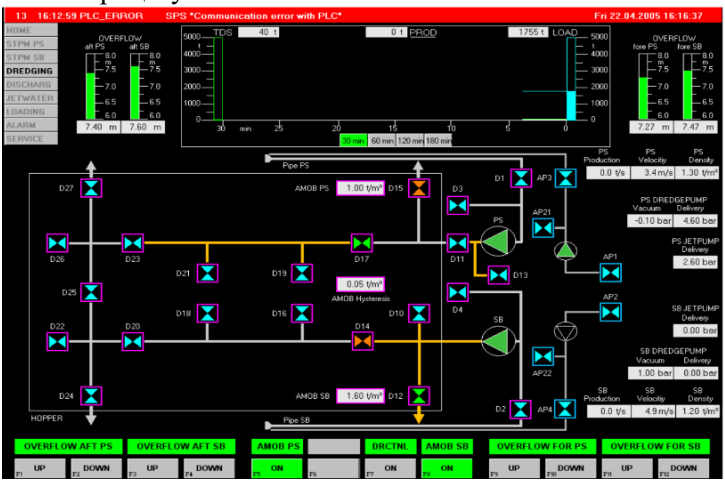


Рис. 3. Операція з виїмки ґрунту

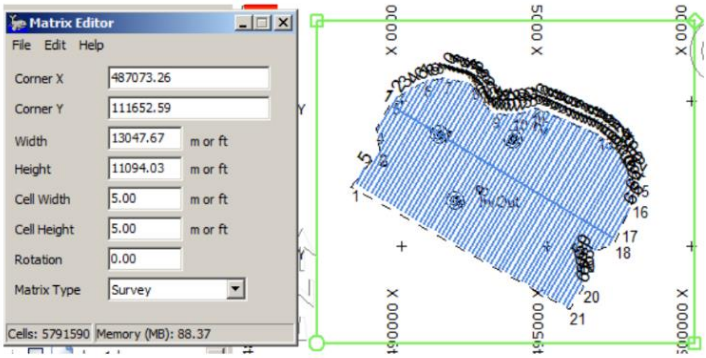


Рис. 4. Створення матриці ґрунтозабор

У складі обладнання «містка» розташовані системи: тривог, датчиків, які контролюють усі процеси у машинному відділенні, телефони та кермові машини.

Офісна частина рубки містить: постійний інтернет Starlink зв’язок, апаратуру GMDSS, приймач NAVTEX, навігаційний стіл з комплектом карт, бібліотеку Усіх сучасних посібників та міжнародних конвенцій.

Після виходу судна штурманом на галс з похибкою у 60, 50, 40 см, оператор опускає всмоктувачі земснаряда на задану глибину і, регулюючи їхнє заглиблення, направляє подачу води ґрунторозмивними насосами до місця ґрунтозабору. Безпосередньо у трюмі судна знаходиться шість клінкетів: три – по лівому борту і три – по правому.

Включаючи клінкети одночасно або в певній послідовності, регулюється процес рівномірного завантаження трюму. Швидкість руху судна від 1,0 до 3,0 вузлів, термін проходу по ділянці 1,5…2,0 год. Після цього судно рухається до звалища для розвантаження.

Процес ґрунтозабору починається з того, що оператор заздалегідь готує апаратуру до роботи. Запускає дизеля або дизель-генератори й насос подачі забортної води, окремий дизель-генератор для живлення водоструменевих насосів, флеш-насоси для отлива сальника на валах днопоглиблювальних помп. Підготовчий термін триває 5…10 хв. залежно від температурного режиму роботи. Днопоглиблення може здійснюватися на глибину до 22 метрів, а з додатковими насадками – до 25 метрів.

Сучасна система автоматизованого управління снарядом включає в себе систему автоматичної орієнтації з використанням лебідок. Наприклад, система орієнтації "Автоствір" працює на основі радіофазного методу вимірювання відстані за допомогою лазерної техніки.

Використання лазерних створів під час роботи на підходах до портових каналів протягом практично півстоліття підтвердило свою надійність і точність в системі орієнтації снарядів в будь-який час доби. Застосування лазерних створів під час роботи на підходах до портових каналів дозволило зменшити робочу ширину каналу з проектної 4,0 м до 1,5 м, що становить майже у 3 (2,7) рази менше.

Система «днопоглиблення» складається, в свою чергу, з трьох підсистем: «орієнтація», «ґрунтозабір» та «управління допоміжними операціями». Перші дві підсистеми виміряють продуктивність снаряду і автоматично управляють електроприводом станової лебідки з метою забезпечення максимально можливою продуктивністю снаряду в даних умовах експлуатації. Остання підсистема автоматизує процеси переходу снаряду з траншеї на траншею, з серії на серію, ухід з прорезу для пропуску суден і повернення на попереднє місце

знаходження, управління кінцевим понтоном плавучого трубопроводу, тощо.

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

Автоматизація процесу днопоглиблення являє собою важливу галузь розвитку морської та гідротехнічної інфраструктури, яка сприяє підвищенню ефективності та зниженню ризиків при виконанні багермейстерських робіт.

Датчики, такі як манометри, вакуумметри, тягоміри, шароміри, ґрунтометри та витратоміри, відіграють ключову роль у зборі даних про параметри ґрунту та стан робочого середовища. Їхня інтеграція в систему автоматичного управління забезпечує надійний контроль процесу.

Системи автоматичного регулювання землесосів (САРЗ) дозволяють ефективно керувати швидкістю снаряда, що особливо важливо при днопоглиблення з використанням якірних землесосів та роботі з малою швидкістю руху.

Системи орієнтації, такі як "Автоствір", забезпечують високу точність позиціонування снаряда, що сприяє більш ефективному виконанню робіт на ґрунті.

Програмне управління земснарядами надає можливість гнучко налаштовувати робочі процеси та досягати оптимальних результатів суднового обаднання.

Автоматизація процесу днопоглиблення сприяє зниженню ризику аварійних ситуацій, оптимізації продуктивності та забезпечує надійну та безперебійну роботу суден та землесосів.

Дослідження підкреслює перспективність та актуальність автоматизації днопоглиблення у сучасній морській та гідротехнічній індустрії, що сприяє покращенню умов виконання робіт та зниженню екологічних ризиків.

Перелік використаних джерел

1. Lee S., Kim H., Park J. Analysis of Real-Time Control Systems for Excavators Based on Artificial Neural Networks // International Journal of Control, Automation, and Systems. – 2016. – Vol. 14. – № 3. – P. 659-670.

2. Zhang L., Lee C., Kwan C. Performance Analysis of Proportional Integral Derivative (PID) Controller for Excavator Arm Movement //

IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 61. – № 5. – P. 2338-2346.

3. Chen W., Feng Y. Analysis of Supervisory Control Systems for Autonomous Excavators // Robotics and Autonomous Systems – 2013. – Vol. 61. – № 3. – P. 245-258.

4. Wang H., Guo Y., Zhou B. Analysis of Adaptive Control Systems for Excavator Bucket Operations // Journal of Control Science and Engineering. – 2011. – Vol. 11. – P. 13-19.

5. Tang J., Wang Q., Zhong T. Automatic monitoring and control system for cutter suction dredgers // Ocean Engineering. – 2009. – Vol. 36. – № 17-18. – P. 1273-1281.

6. Li S., Liu Y., Huang D. Modeling of automatic control system for cutter suction dredger based on improved particle swarm optimization algorithm // Ocean Engineering. – 2015. – Vol. 110. – P. 55-62.

7. Chen X., Zhang Y., Qin H. Dynamic modeling and analysis of an earthmoving equipment based on bond graph // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 19580-19592.

8. Tian Y., Li H., Chen X. Design and application of automatic control system for cutter suction dredger // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 228. – P. 108782.

9. Doe J. Automation of Dredging Operations: Development and Implementation of an Expert Control System // International Journal of Dredging Engineering. – 2019 – Vol. 10. – № 3. – P. 1-14.

10. Smith A. et al. A Hierarchical System for Monitoring and Control of Cutter Suction Dredgers // Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications. – 2018. – P. 917-924.

11. Johnson B., Brown C. Intelligent Control System for Dredging Equipment Based on Machine Learning Algorithms // Journal of Automation in Construction. – 2016. – Vol. 27. – P. 24-38.

12. Wilson D. et al. Analysis and Optimization of Automated Dredging Processes using Genetic Algorithms // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2019. – Vol. 35. – 205-218.

13. Thompson E., Davis F. Design and Implementation of an Automated Dredging Control System for Improved Efficiency // Journal of Navigation. – 2019. – Vol. 72. – №. 4. – P. 925-938.

10.31653/smf47.2023.55-68

Мадей В.В.[1], Волков О.М.[1], Сторчак О.О.[2]

[1]Національний університет «Одеська морська академія»
[2]Одеський національний морський університет

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ДИЗЕЛІВ МОРСЬКИХ СУДЕН ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Плавання морських суден неможливе без використання джерела механічної енергії. Навіть для невеликих вітрильних суден вітрила використовуються як додаткове джерело, яке забезпечує рух, а як основне – встановлюється тепловий двигун. Найпоширенішими тепловими двигунами з усіх, що використовуються на транспорті, є двигуни внутрішнього згоряння (дизелі) [1, 2]. Дизелі є джерелами механічної енергії автомобільного, залізничного, морського та внутрішнього водного транспорту, а також сільськогосподарської та мобільної (малогабаритної чи переносної) техніки [3, 4]. Саме дизелі в даний час набули домінуючого поширення на всіх без винятку суднах морських та внутрішнього водного транспорту, незалежно від їх водотоннажності, типу та призначення. Провідні дизелебудівні концерни та фірми випускають суднові дизелі в широкому діапазоні розмірів (діаметром циліндра від 0,1 м до 0,98 м), кількості циліндрів (від 4-х до 18-ти) та потужності (від 100 кВт до майже 100000 кВт) [5-7]. Отримання корисної енергії в будь-якому тепловому двигуні неможливо без використання палива. В суднових енергетичних установках (в парових котлах, газових турбінах та дизелях) найбільш розповсюдженим видом палива є рідке паливо нафтового походження. Розвиток дизелів, що під час експлуатації використовують рідке та газове паливо (двох паливні дизелі, або duel fuel) по-перше не має на теперішній час широкого виробництва та встановлення на суднах, по-друге як правило має поширення на суднах, в яких газове паливо транспортується як вантаж (на суднах газовозах), по-третє не виключає використання рідкого палива нафтового походження. Встановлення на суднах акумуляторних батареї забезпечує рух суден в обмежений час, тому впроваджується лише для суден внутрішнього водного транспорту, які здійснюють нетривалі перевезення та яки мають можливість поновлення потужності батареї в разі її критичного зменшення. Використання

сонячних батареї не забезпечує рух транспортних суден та може виконувати лише функції додаткового постачання енергії на суднове допоміжне обладнання. Тому на найближчий час рідке паливо нафтового походження продовжить займати домінуюче положення серед джерел енергії для суднової енергетики [8-10].

Одночасно з цим на суднах морського та внутрішнього водного транспорту активно впроваджуються альтернативні паливо, одним з найбільш розповсюджених з яких є паливо біологічного походження. Ці види палива характеризуються сумірними значеннями густини та в'язкості з паливом нафтового походження тому забезпечують створення паливних сумішей з ними, які в подальшому використаються для роботи дизелів. Ефективне використання подібних сумішей неможливо без визначення найбільш раціонального складу паливних сумішей – відсоткового вмісту в них палива біологічного походження та найбільш раціональних режимів впорскування цих сумішей в циліндр дизеля. Розв'язання цих завдань сприятиме підвищенню ефективності використання в суднових дизелях палива біологічного походження та покращенню їх енергетичних, економічних та екологічних показників.

Постановка завдання. Використання паливних сумішей, до складу яких входить біопаливо, змінює перебіг робочого циклу в циліндрі дизеля та процес згоряння. Це призводить до зміни експлуатаційних показників дизелів, при цьому виникає завдання визначення фаз паливоподачі (насамперед кута випередження подачі палива) за яких зміна цих показників підвищує ефективність роботи дизеля та покращує його екологічні показники. Розв'язання цієї задачі можливе шляхом проведення експериментів на основних експлуатаційних режимах роботи дизеля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час одним з найпоширеніших видів палива біологічного походження є біодизельне паливо (біодизель), яке отримають з рослинних жирів та олій шляхом їх обробки метанолом або етанолом [12-15]. Згідно з Євростандартом DIN EN 14214-2019 "Liquid petroleum products. Fatty acid methyl esters for use in diesel engines and heating applications", таке паливо відносять до класу FAME. Це паливо рекомендують використовувати в дизелях автомобільного та залізничного транспорту та дизельних електростанціях. Водночас обмеження використання біодизельного палива на суднах пов'язане з його невеликим терміном зберігання. Це обмежує його використання під час тривалих океансь-

ких чи морських переходів [16-18]. Ще одним недоліком біодизельного палива є його більш низька енергетична ефективність порівняно з рідким нафтовим паливом, що не дозволяє використовувати його як самостійне джерело енергії, і вимагає створення сумішей палива, в яких більша частина складається з нафтового палива, а біодизельне паливо використовується як добавка [19-21]. Однак досвід використання таких сумішей дозволяє поступово впроваджувати біодизельне паливо на суднах із дизельними двигунами. Цьому також сприяє порівняні значення густини та в'язкості біодизельного та нафтового палива [22-24].

Однією з незаперечних переваг використання сумішей біодизельного та нафтового палива є покращення екологічних показників роботи дизелів на суднах, особливо зниження концентрації оксидів сірки та азоту у випускних газах [25-27].

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на морському спеціалізованому судні класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн. В енергетичну установку судна входили дизелі 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6EY18ALW Yanmar. Основні характеристики дизелів представлені у табл. 1.

Таблиця 1 Основні характеристики дизелів судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн

Параметр	5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo	6EY18ALW Yanmar
Діаметр циліндра, м	0,6	0,18
Хід поршня, м	2,4	–
Кількість циліндрів	5	6
Потужність на номінальному навантаженні, кВт	8050	800
Частота обертання валу, хв$^{-1}$	89	900
Питома витрата палива у діапазоні експлуатаційних навантажень 45–100 %, г/(кВт·год)	0,187…0,174	0,198…0,183
Кількість у складі суднової енергетичної установки	1	3

Під час експлуатації дизелів в спеціальних екологічних районах з контролю емісії викидів сірки (Sulphur Emission Control Areas – SECAs) використовувалося паливо DMA, під час експлуатації дизелів за межами SECAs використовувалося паливо RME180 [28, 29]. Це забезпечувало вимоги ДодаткуVI Міжнародної конвенції МАРПОЛ

та сприяло зменшенню забруднення довкілля оксидами сірками в цих районах. Основні характеристики палив наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Характеристики палив

Параметр	RME180	DMA	FAME B30
В'язкість за 50 °С, сСт	184	12.8	36.3
Густина за 15 °С, кг/м^3	928	896	914
Вміст сірки, %	0.48	0.082	0.018
Температура спалаху, °С	73	67	71
Теплотворна здатність, кДж/кг	40480	43420	36890

На судні була реалізована технологія, яка дозволяє застосовувати біодизельне паливо, як використання палива B30 класу FAME (таблиця 2). Це дозволяло як для головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo, також і для допоміжних 6EY18ALW Yanmar використовувати паливні суміші, основним компонентом яких було паливо нафтового походження (RME180 або DMA), як добавка – паливо біологічного походження FAME B30 [30, 31].

Принципова схема паливної системи, яка дозволяла використовувати суднові моторні палива DMA та RME180, а також біодизельне паливо FAME B30 наведено на рис. 1.

Робота головного двигуна 16 та допоміжних двигунів 10, 11, 12 була можлива на паливі DMA (під час знаходження судна в SECA) та на паливі RME180 (під час знаходження судна поза SECA). Крім того, дизелі могли працювати на суміші нафтового палива DMA, RME180 та біодизельного палива FAME B30. Вміст біодизельного палива FAME B30 в його суміші з паливом DMA або RME180 становив 15 %. Це значення було визначено як найбільш раціональне під час серії попередніх досліджень, проведених на суднах різного призначення, на різних дизелях та за умови використання різних сортів палива [11, 14, 31-33].

Подача палива до двигунів здійснювалася паливним насосом 3 (з RME180 паливного танка), паливним насосом 6 (з DMA паливного танка), паливним насосом 9 (з FAME B30 паливного танка). Очищення палива забезпечувалася у фільтрах 2, 5, 8. Необхідна концентрація біодизельного палива FAME B30 в його суміші з паливом DMA або RME180 забезпечувалася дозатором 15 залежно від показань витратоміра 13 та контролювалася мікроконтролером 14 [28, 34].

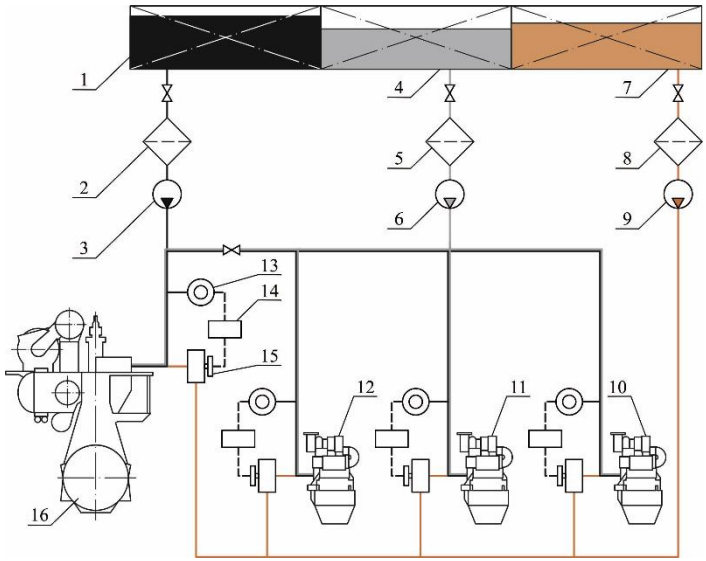


Рис. 1. Принципова схема паливної системи:
1 – RME180 паливний танк; 2, 5, 8 – паливний фільтр; 3, 6, 9 – паливний насос; 4 – DMA паливний танк; 7 – FAME B30 паливний танк; 10 – допоміжний двигун №3; 11 – допоміжний двигун №2; 12 – допоміжний двигун №1; 13 – витратомір; 14 – мікроконтролер; 15 – дозатор; 16 – головний двигун

Як контрольні показники, за якими оцінювались експлуатаційні показники суднових дизелів, обирались максимальний тиск згоряння p_z, питома ефективна витрата палива b_e та концентрація оксидів азоту в випускних газах NO_X. Їх визначення виконувалось за допомогою суднової системи моніторингу та діагностування. Вибір саме цих показників ґрунтувався наступним. Максимальний тиск згоряння характеризує енергетичну ефективність робочого циклу дизеля, з його збільшенням підвищуються всі основні показники роботи дизеля, насамперед середній індикаторний тиск та індикаторна / ефективна потужність. Максимальний тису згоряння є обов'язковим показником, якій контролюється під час експлуатації дизеля, при цьому також обов'язково ця величина визначається для кожного окремого циліндра, середнє для всіх циліндрів дизеля, а також відхилення цього значення для окремих циліндрів від середнього. Це відхилення не повинно перевищувати ±3,5 %. Питома ефективна витрата палива характеризує паливну економічність роботи дизеля та характеризує економічну доцільність вибору тих чи інших

параметрів паливоподачі. Також питома витрата палива прямопропорційно пов'язана з загальною витратою палива (годинною або добовою) та впливає на суднові запаси палива, показник, що є актуальним саме для суден морського транспорту, які здійснюють довготривалі морські або океанські переходи без можливості бункерування. Концентрація оксидів азоту в випускних газах є основним показником, що характеризує екологічні показники роботи суднових дизелів. Її значення регламентується відповідно вимог Додатку VI МАРПОЛ та залежить від швидкісного режиму роботу дизеля та року побудови судна.

Дослідження виконувались під час експлуатації дизелів 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6EY18ALW Yanmar на суміші, яку складали паливо RME180 та біопаливо FAME B30 (з концентрацією 15 %), а також паливо DMA та біопаливо FAME B30. Під час досліджень кут випередження подачі палива для суднового дизеля 6EY18ALW Yanmar змінювався в діапазоні -18…-6 °повороту колінчатого валу (пкв), для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo – в діапазоні -7…-1 °пкв. Саме цей діапазон рекомендований фірмами виробниками під час експлуатації дизелів, при цьому як найбільш раціональний для дизеля 6EY18ALW Yanmar рекомендований кут -14 °пкв, для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo – кут -4 °пкв. Саме з такими кутами випередження впорскування експлуатувались дизелі під час використання палива без додавання до його об'єму палива біологічного походження, саме ці кути були обрані як «базові» під час випробувань з використанням паливних сумішей. Дослідження виконувались для наступних експлуатаційних режимів роботи дизеля 6EY18ALW Yanmar – 0,4$N_{еном}$, 0,55$N_{еном}$, 0,7$N_{еном}$, 0,85$N_{еном}$ та 0,6$N_{еном}$, 0,7$N_{еном}$, 0,8$N_{еном}$, 0,9$N_{еном}$ для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo (де $N_{еном}$ – номінальне навантаження відповідного дизеля).

Результати досліджень наведені в таблицях 3, 4.

Величини максимального тиску згоряння та питомої ефективної витрати палива під час використання суміші, що складалась з палива RME180 та біопаливо FAME B30 та суміші, що складалась з DMA та біопаливо FAME B30 за однакових навантажень на дизелі характеризувались збігом значень та їх відхилення одно від одного знаходились в межах похибки експерименту. Саме тому для цих показників (а саме максимального тиску згоряння p_z, МПа, та питомої ефективної витрати палива b_e, г/(кВт·год))в таблицях 3, 4 наведені загальні

значення цих показників. Значення концентрації оксидів азоту в випускних газах під час використання різних сумішей відрізнялись одні від інших, тому в таблицях 3, 4 ці значення наведені окремо для кожного випадку (а саме під час використання суміші палива RME180 та біопалива FAME B30, а також під час використання суміші палива DMA та біопалива FAME B30).

Таблиця 3. Зміна експлуатаційних показників роботи суднового дизеля 6EY18ALW Yanmar за різних кутах випередження подачі паливної суміші до складу якої входить паливо біологічного походження

		Кут випередження подачі палива, φ, °пкв						
Експлуатаційний показник	навантаження на дизель	-18	-16	-14	-12	-10	-8	-6
Максимальний тиск згоряння p_z, МПа	$0{,}4N_{еном}$	10,12	10,27	10,23	10,22	10,03	9,82	9,63
	$0{,}55N_{еном}$	13,72	13,98	13,97	13,83	13,77	13,55	13,38
	$0{,}7N_{еном}$	15,75	15,82	15,73	15,72	15,51	15,44	15,32
	$0{,}85N_{еном}$	16,03	16,24	16,21	16,15	16,12	15,95	15,78
Питома ефективна витрата палива, b_e, г/(кВт·год)	$0{,}4N_{еном}$	201,3	197,3	192,2	188,6	187,3	183,2	196,5
	$0{,}55N_{еном}$	197,6	195,3	190,2	186,2	184,8	184,5	193,7
	$0{,}7N_{еном}$	193,4	190,7	187,3	184,1	183,3	182,9	188,3
	$0{,}85N_{еном}$	186,7	186,3	184,6	183,6	182,7	182,4	185,2
Концентрація NO_X[1], г/(кВт·год)	$0{,}4N_{еном}$	7,17	6,98	6,92	6,86	6,66	6,62	6,58
	$0{,}55N_{еном}$	7,38	7,28	7,17	7,12	7,05	6,95	6,81
	$0{,}7N_{еном}$	7,55	7,45	7,37	7,32	7,25	7,12	7,03
	$0{,}85N_{еном}$	7,93	7,72	7,52	7,44	7,31	7,18	7,11
Концентрація NO_X[2], г/(кВт·год)	$0{,}4N_{еном}$	7,27	7,11	7,02	6,96	6,88	6,71	6,62
	$0{,}55N_{еном}$	7,48	7,35	7,32	7,28	7,18	7,07	6,93
	$0{,}7N_{еном}$	7,83	7,61	7,51	7,48	7,32	7,22	7,15
	$0{,}85N_{еном}$	8,04	7,76	7,71	7,54	7,35	7,28	7,16

[1] – під час використання суміші палива RME180 та біопалива FAME B30;
[2] – під час використання суміші палива DMA та біопалива FAME B30

Під час проведення досліджень контролювались та підтримувались в необхідному діапазоні також всі основні параметрі роботи головного та допоміжних дизелів, а також параметри в системах, що забезпечують їх функціонування. До них були віднесені тиск в циліндрі наприкінці стиснення, температура випускних газів, середній індикаторний тиск, а також відхилення цих показників від середнього значення по всім циліндрам; частота обертання валу дизеля; фази газорозподілу (кути відкриття та закриття продувних та випускних

клапанів); тиск та температура охолоджуючої води та циркуляційного мастила на вході та виході з дизелів,

Візуалізація значень, що наведені в таблицях 3, 4 виконана в вигляді рис. 2-3. В зв'язку з односпрямованим перебігом процесів та сумірними значеннями результатів, на рис. 2-3 наведені лише дані, що відповідають максимальному навантаженню на дизелі, а саме 0,85$N_{еном}$ для дизеля 6EY18ALW Yanmar та 0,9$N_{еном}$ для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo.

Таблиця 4. Зміна експлуатаційних показників роботи суднового дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo за різних кутах випередження подачі паливної суміші до складу якої входить паливо біологічного походження

		Кут випередження подачі палива, φ, °пкв						
Експлуатаційний показник	навантаження на дизель	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
Максимальний тиск згоряння p_z, МПа	0,6$N_{еном}$	11,3	11,42	11,45	11,42	11,35	11,18	11,11
	0,7$N_{еном}$	12,73	12,88	12,92	12,85	12,82	12,72	12,48
	0,8$N_{еном}$	14,03	14,14	14,18	14,12	13,95	13,85	13,72
	0,9$N_{еном}$	14,62	14,74	14,75	14,7	14,55	14,38	14,28
Питома ефективна витрата палива b_e, г/(кВт·год)	0,6$N_{еном}$	185,6	183,7	182,1	178,6	177,3	177,3	182,3
	0,7$N_{еном}$	183,4	182,7	180,7	178,1	176,8	175,8	178,8
	0,8$N_{еном}$	180,7	179,6	178	177,2	175,7	174,6	177,3
	0,9$N_{еном}$	178,3	178,3	177,4	175,4	175,4	174	176,6
Концентрація NO_X[1], г/(кВт·год)	0,6$N_{еном}$	11,82	11,64	11,48	11,38	11,22	11,05	10,86
	0,7$N_{еном}$	12,32	12,08	11,92	11,78	11,52	11,24	11,08
	0,8$N_{еном}$	12,84	12,68	12,62	12,52	12,45	12,28	11,62
	0,9$N_{еном}$	13,28	13,08	12,85	12,66	12,52	12,35	12,08
Концентрація NO_X[2], г/(кВт·год)	0,6$N_{еном}$	12,45	12,37	12,21	11,97	11,88	11,79	11,65
	0,7$N_{еном}$	12,77	12,68	12,58	12,36	12,08	11,98	11,71
	0,8$N_{еном}$	13,28	13,05	12,88	12,72	12,54	12,34	12,21
	0,9$N_{еном}$	13,65	13,54	13,11	12,81	12,73	12,54	12,28

[1] – під час використання суміші палива RME180 та біопалива FAME B30;
[2] – під час використання суміші палива DMA та біопалива FAME B30

Висновки та перспективи подальших досліджень. Експерименти, що були проведені на суднових дизелях 6EY18ALW Yanmar та 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo дозволили визначити наступне.

1. В теперішній час в дизелях суден морського та внутрішнього водного транспорту, що виконують головних та допоміжних двигунів, як альтернативне паливо використовуються суміші палива біологічного походження з нафтовим моторним паливом. При цьому до основних підстав цього використання відноситься не лише прагнення

до зменшення витрати нафтових палив, а також, як головне, поліпшення екологічності роботи суднових дизелів та насамперед зниження викидів оксидів азоту з випускними газами.

2. Під час спалювання в циліндрі дизеля паливних сумішей, до складу яких входить біопаливо, змінюються (в порівнянні з експлуатацією дизеля лише на нафтовому паливі) процеси окислення та згоряння, що призводить до зміни термодинаміки процесу згоряння. Це стає підставою зміни основних експлуатаційних показників дизеля.

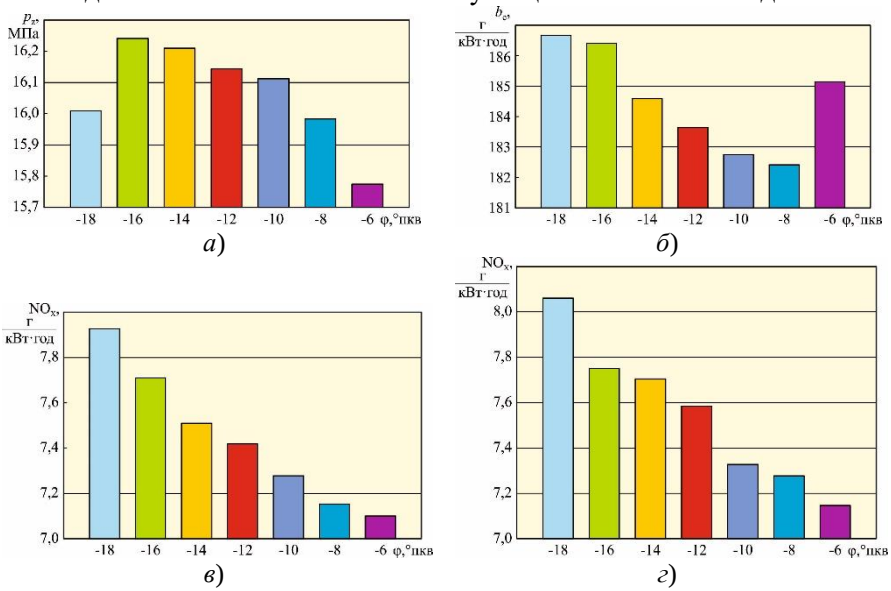


Рис. 2. Зміна експлуатаційних показників роботи суднового дизеля 6EY18ALW Yanmar за різних кутах випередження подачі паливної суміші до складу якої входить паливо біологічного походження (під час навантаження $0{,}85N_{еном}$):

а – максимальний тиск згоряння p_z, МПа; *б* – питома ефективна витрата палива b_e, г/(кВт·год); *в* – концентрація оксидів азоту в випускних газах, NO_X, г/(кВт·год) (під час використання суміші палива RME180 та біопалива FAME B30); *г* – концентрація оксидів азоту в випускних газах,NO_X, г/(кВт·год) (під час використання суміші палива DMA та біопалива FAME B30)

3. Підвищення ефективності використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, полягає не лише в визначенні оптимального вмісту біопалива в суміші, але також в визначенні оптимальних кутів процесу подачі паливної суміші (кутів випередження впорскування палива) зміна яких необхідна в зв’язку зі зміною складу паливної суміші, що потрапляє для спалю-

вання в циліндр дизеля. Обидва значення (вміст біопалива в паливної суміші та кут випередження впорскування) визначаються експериментальним шляхом та залежать від характеристик дизеля.

4. З метою підвищення ефективності використання паливних сумішей необхідно змішувати процес впорскування в бік верхньої мертвої точці, тобто знижувати кут випередження подачі палива, при цьому діапазон цієї зміни повинен відповідати рекомендаціям заводів виробників щодо можливих кутів впорскування палива.

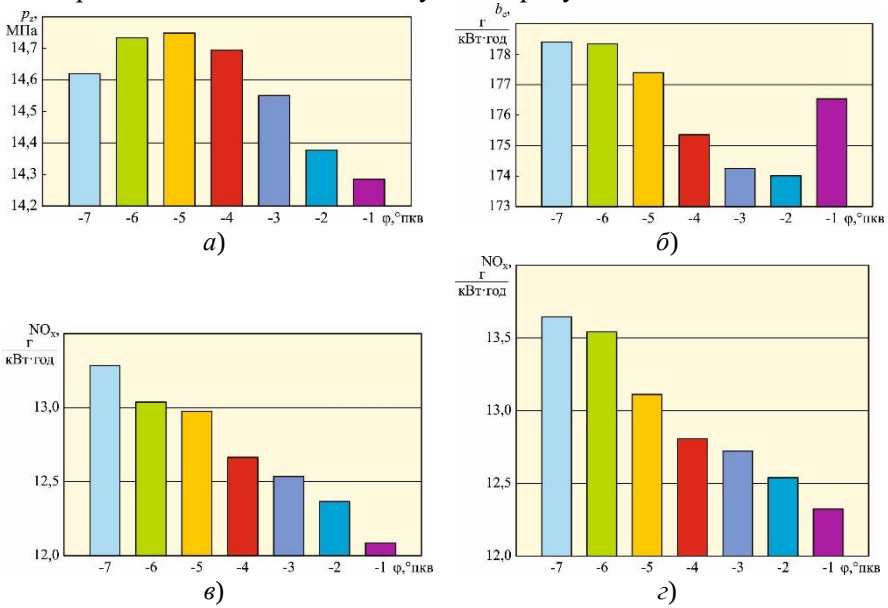


Рис. 3. Зміна експлуатаційних показників роботи суднового дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo за різних кутах випередження подачі паливної суміші до складу якої входить паливо біологічного походження (під час навантаження $0{,}9N_{еном}$):

а – максимальний тиск згоряння p_z, МПа; *б* – питома ефективна витрата палива b_e, г/(кВт·год); *в* – концентрація оксидів азоту в випускних газах, NO_X, г/(кВт·год) (під час використання суміші палива RME180 та біопалива FAME B30); *г* – концентрація оксидів азоту в випускних газах,NO_X, г/(кВт·год) (під час використання суміші палива DMA та біопалива FAME B30)

5. Під час зменшення кута випередження подачі палива зменшується емісія оксидів азоту на всьому діапазоні кута впорскування, що є позитивним фактором цього процесу. Одночасно з цим за цих умов відбуваються синусоїдальні зміни максимального тиску згоряння, при цьому зі зменшенням кута випередження зменшується тиск зго-

ряння, що відноситься до негативного фактору. Під час зменшення кута випередження подачі палива здійснюється зменшення питомої витрати палива, але за умови досягнення критичних значень кута випередження спостерігається зростання витрати палива.

6. Визначення оптимальних кутів випередження палива досягається експериментальним шляхом та сприяє забезпеченню експлуатаційних показників роботи суднових дизелів.

Перелік використаних джерел

1. Звєрьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

2. Ратайчук О.В., Сагін С.В. Підвищення ефективності процесу наддува суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. - техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 15-19. DOI : 10.31653/smf341.2020.15-19.

3. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.

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

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

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

7. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн.сб. – 2011. – № 26. – Одесса : ОНМА. – С.116-125.

8. Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двига-

теля // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – Одесса : ОНМА. – С.109-118.

9. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. Зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 -100.

10. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса : ОНМУ. – С. 78-88.

11. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93-110. doi: 10.31653/smf44.2022. 93-110.

12. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 69 - 80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

13. 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.

14. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – Vol. 2(1(64)). – P. 34–41. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959.

15. 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.

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

17. 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.

18. 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.

19. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.

20. 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 Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

21. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.

22. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.

23. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 79 - 89.

24. 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. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

25. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72 - 80.

26. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енерге-

тичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА».– С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

27. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

28. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-142.

29. Сагін С.В., Кривий М.О. Розрахунок контактного тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 84-92. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-84-92.

30. 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 and Technology. – 2022.– Vol. 69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

31. Мадей В.В. Використання альтернативного палива в суднових середньообертових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА».– С. 45-53. doi: 10.31653/smf343.2021.41-53.

32. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93-110. doi: 10.31653/smf44.2022. 93-110.

33. 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.

34. 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.

10.31653/smf47.2023.69-81

Малахов О.В., Бондаренко А.В., Палагін О.М., Найденов А.І., Ліхогляд К.А.

Національний університет “Одеська морська академія”,
Дунайський інститут Національного університету “Одеська морська академія”

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ СУДНОВИХ ЛЬЯЛЬНИХ ВОД

Вступ. Проблема виникнення, збору, зберігання та сепарації багатофазного потоку води з нафтопродуктами, що позначається в умовах експлуатації засобів водного транспорту як суднові льяльні води (СЛВ) є дуже актуальною. При роботі суден СЛВ є найбільш багатотоннажним видом відходів і для їх обробки всі судна згідно з регламентуючими вимогами [1] повинні обладнуватися сепараторами СЛВ. Вихідна концентрація домішок в очищеній воді повинна становити менше 15 мл/л, а в ряді особливих районів планети скидання СЛВ за борт взагалі заборонено. При всебічному аналізі порушеної проблеми можна констатувати, що з економічної точки зору одержувані з СЛВ вторинні нафтові продукти становлять великий інтерес як джерело додаткових паливних ресурсів судна.

1.Загальна постановка проблеми.

Загальні джерела виникнення СЛВ. СЛВ є технологічними стоками, які в умовах роботи судна виникають у машинному відділенні, у вантажних трюмах, а також під час експлуатації палуби та палубних механізмів.

Згідно з виконаним аналізом роботи морських суден було встановлено, що основними генераторами компонентів, що складають основу СЛВ, які в кінцевому підсумку потрапляють у збірні льяльні колодязі та танки, є:

- конденсати від систем охолодження головного та допоміжного двигунів;
- конденсати від пускового та допоміжного компресорів подачі стисненого повітря;
- конденсати від системи палубних підігрівачів;
- дистилят від рефрижераторних установок та компресорних установок, що обслуговують системи кондиціювання;

- конденсат від систем підігріву нафтових танків (сепараторний танк, танк для інсінератора тощо);
- протікання трубопроводів та суднових допоміжних механізмів, зокрема: забортної води, паливної, масляної та парової систем;
- відпрацьована вода з продуктами легкої хімії після збирання чи чищення розмивом палуб машинного відділення та піддонів суднових допоміжних механізмів;
- продукти промивання або чищення розмивом, палуби, палубних механізмів, технологічної апаратури та допоміжного обладнання;
- проточна вода для особистої гігієни працівників машинного відділення великих багатотоннажних суден;
- відведення дощової води із суднових димоходів у разі відсутності окремих ліній їх скидання;
- продукти миття вантажних трюмів або танків, що збираються в окремому, так званому SLOP-танці;
- продукти розливів нафтопродуктів при бункеруванні або при вантажно-розвантажувальних операціях, що збираються в окремому SLOP-танці;
- злив із носових, кормових та центральних суднових колодязів та гатерсів.

Загальні особливості СЛВ. Якісний та кількісний склад СЛВ не є універсальним і є величиною змінною. До середньостатистичного переліку основних компонентів СЛВ можна віднести:

- розчинені гази;
- олії (індустріальні, відпрацьовані машинні тощо) з концентрацією до 1000 мг/л;
- відпрацьовані нафтопродукти та їх складові, а також нафтошлам (концентрація до 8000 мг/л);
- миючі речовини (концентрація до 5-10 мг/л);
- суспензії (концентрація до 300-500 мг/л);
- сульфати (концентрація до 200 мг/л);
- феноли (концентрація до 50 мг/л).

Всі перераховані вище компоненти, крім газів, характеризуються великим значенням питомої ваги в порівнянні з аналогічним параметром для води.

Якщо класифікувати компоненти СЛВ, як газоподібні, рідкі та тверді, то можна констатувати, що залежно від співвідношення між щільністями окремо аналізованої компоненти ρ_c та води ρ_w можливі наступні два варіанти поведінки суміші:

- у нерухомому стані з часом при $\rho_c<\rho_w$ за певний час при розшаруванні компоненти СЛВ спливатимуть вгору;

- при русі та $\rho_c>\rho_w$ компоненти СЛВ випадатимуть в осад.

Розглядаючи СЛВ як оброблюваний багатокомпонентний потік доцільно відзначити, що при аналізі практики експлуатації сепараційних установок було встановлено, що висока ефективність очищення має місце при концентрації шкідливих компонентів тільки до 100 мг/л [2]. Перевищення цієї величини призводить до ускладнення використовуваних методів сепарації.

Технології сепарування СЛВ. Загальні принципи функціонування технологічних схем, призначених для сепарації СЛВ безпосередньо визначаються робочими процесами, які застосовуються для розподілу їх складових компонентів. Принципово, в умовах експлуатації судна, можна виділити три основні напрямки очищення: фізичний, хімічний та біологічний. Найчастіше їх використовують у комбінації [3, 4].

В основі фізичного напряму лежить використання масових та значно в менших обсягах поверхневих сил. До масових сил у разі відносять сили інерції, тяжкості, спливання тощо.

Реалізація хімічних процесів при сепарації СЛВ базується на використанні різних реагентів у комбінації з електрохімічним окисленням потоку, що оброблюється.

Біологічний напрямок сепарації СЛВ базується на використанні тих мікроорганізмів, що забезпечують у процесі своєї життєдіяльності знищення складових компонентів продуктів нафтохімії.

При роботі судів найбільшого поширення набули сепаратори, які працюють за принципом відцентрового розподілу потоку. Єдиним недоліком суднових відцентрових сепараторів є обмеженість їхньої продуктивності. Вони не можуть переробляти великі обсяги СЛВ за короткі проміжки часу. В основному подібне обмеження викликано довжиною шляху, який повинні долати частинки нафтовмісних домішок до потрапляння на вільну поверхню води або налипання на контактну поверхню сепаратора.

При сепарації СЛВ завжди використовується попередня фільтрація потоку, що обробляється. Вона базується на фізичному методі очищення і в її основі лежить використання напірної чи безнапірної фільтрації. Під час фільтрації використовують невибірковий оборотний процес, що базується на використанні сил міжмолекулярної вза-

ємодії між молекулами фільтраційного матеріалу та молекулами компонентів СЛВ.

2. Постановка завдання. На підставі проведеного аналізу методів сепарування з урахуванням їх переваг та недоліків для подальшого проведення науково-дослідних робіт було обрано напрямок, пов’язаний з використанням штучної кавітації. До головної проблеми, що має місце при використанні гідромеханічних характеристик потоку для його сепарування можливо віднести відсутність даних, що описують залежність параметрів штучної каверни від характеристик потоку на вході до камери сепарування. Таким чином в якості головного завдання досліджень було обрано питання встановлення загальних залежностей процесу сепарування від параметрів потоку та методів утворення штучної кавітації.

3. Аналіз досліджень та публікацій щодо використання штучної кавітації для процесу сепарування СЛВ. Перевагою технології сепарації потоку СЛВ з використанням процесу суперкавітації зі штучною вентиляцією каверни є можливість очищення потоку з високою концентрацією шкідливих домішок. Такий метод може бути альтернативою електрохімічним методам сепарації, які в даний час вважаються практично єдиними ефективними методами, які можна застосовувати при загальній концентрації домішок у воді, що перевищує 1 г/л [5].

У силу складності процесів, що протікають при штучній кавітації, в даний час не існує чітко сформульованої теорії, що описує зв'язок між основними характеристиками такого перебігу і гідродинамічними силами, що впливають на просторові розміри каверни. Також не відомі дані, які вказують як витрата та тиск повітря, що подається на вентиляцію каверни, впливають на ці величини [6].

Просторова поведінка кавітаційних каверн безпосередньо визначається геометрією течії, у якій вони формуються. Форма каверни може суттєво змінюватися під впливом близько розташованих гідродинамічних особливостей. При цьому, залежно від їхньої інтенсивності та розташування щодо кавітаційної порожнини, можливо отримувати різний ступінь деформації її меж. При цьому, у разі дуже високих відносних швидкостей руху потоку вплив сил тяжкості рідини на геометрію каверни практично відсутній.

Наявність жорстких стінок поблизу каверни може призводити до виникнення асиметрії її меж щодо горизонтального перерізу. За наявності горизонтальної стінки каналу максимальна довжина кавіта-

ційної суперкаверни залежить від числа кавітації. Якщо каверна виникає за диском, то її довжина може бути описана співвідношенням виду

$$L_{max} = \frac{1{,}66d}{\Omega_{min}}, \quad (1)$$

d – діаметр диска, м; Ω_{min}- мінімальне число кавітації.

Величина мінімальної відстані *h* між стінкою та межами каверни при якій не буде спостерігатися її руйнування добре описується залежністю

$$h = \frac{0{,}375}{Fr_d^{4/3}}, \quad (2)$$

Fr – число Фруда.

Для наближеної оцінки часу *τ*, за який кавітаційна суперкаверна сферичної форми с радіусом *r* буде повністю заповнена водяною насиченою парою можна знайти за формулою

$$\tau = \frac{r}{3\alpha}\left(\frac{2\pi M}{Rt}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

При розширенні каверни тиск пари всередині її обсягу не завжди відповідатиме тиску насиченої пари. Для задоволення їх рівності необхідно, щоб виконувалось

$$t_s > \frac{r_{max}}{3\alpha}\left(\frac{2\pi M}{Rt}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

де t_p – час виходу каверни на стаціонарний стан.

Оцінка виразу (4) показує, що при температурі СЛВ, що дорівнює $20^0\ C$, тиск водяної пари всередині каверни дорівнюватиме тиску насичених пар при дотриманні наступної нерівності

$$\frac{r_{max}}{t_s} \leq 17{,}8\ m/sec. \quad (5)$$

Для випадку штучного вдування повітря в кавітаційну суперкаверну в першому наближенні (без урахування розриву суцільності основного потоку СЛВ) була виконана оцінка залежності швидкості на межі суперкаверни від швидкості вдування. Якщо прийняти, що на вході до робочої камери кавітатора: значення швидкості та тиску потоку СЛВ складають P_{bsw}, V_{bsw}; швидкість і тиск повітря, що вдується, складають P_a, V_a; швидкість та тиск на межі каверни потоку

СЛВ складають P_c, V_c, то швидкість потоку на кордоні каверни може бути знайдена як

$$V_c = V_{bsw}\sqrt{1+\Omega} + \frac{\rho_a V_a^2}{2} \quad (6)$$

ρ_a - щільність повітря, кг/м^3; V_a - швидкість подання повітря, м/с.

Оскільки в СЛВ завжди присутні розчинені гази, то на початковій стадії виникнення каверни необхідно враховувати їх масу. Для випадку, коли зовнішні межі кавітаційної каверни обмежені плоским прямокутним каналом, маса розчинених газів дорівнює

$$G_g = \frac{4}{3}\frac{C_g}{K} bL^3 \quad (7)$$

де G_g - маса газу всередині каверни в момент її виходу на стійкий стан; C_g – початкова концентрація газу в потоці СЛВ; K – постійна Генрі; b – товщина каверни; L – довжина каверни.

4. Теоретичне дослідження процесу розділу СЛВ на компоненти

Початкові постулати. Математична модель, що описує динамічну поведінку кавітаційної суперкаверни з урахуванням процесу її штучної вентиляції була розроблена на основі гіпотези:

- потік СЛВ, що моделюється, є ідеальним і має вагу;
- потік, що знаходиться за межами каверни, є нестислим;
- початок та закінчення кавітаційної каверни завжди відомі та відповідають входу та виходу в робочу камеру сепаратора;
- вагу газової складової всередині каверни можна враховувати за допомогою гідростатичного тиску;
- на початку процесу сепарації повітря для вентиляції каверни надходить до неї у кожній точці її початкового перерізу;
- основний потік СЛВ є плоским та одномірним.

Основні рівняння та розрахункова схема. У формі Ейлера рух основного потоку поза каверною було записано у такому вигляді

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} = \rho g y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} \quad (8)$$

Рух паро-водяної суміші в середині каверни має аналогічний вигляд

$$\frac{\partial V_{st}}{\partial t} + V_{st}\frac{\partial V_{st}}{\partial x} = \rho_{st} g y - \frac{1}{\rho_{st}}\frac{\partial P_{st}}{\partial x} \quad (9)$$

На межі розділу основного потоку СЛВ та суперкавітаційної каверни повинні завжди виконуватись дві наступні умови

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_{st}}{\partial x} \quad (10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V_{st}}{\partial x} \quad (11)$$

Жорсткі граничні умови моделюють безпосередній вплив стінок робочої камери каналу кавітації. На відміну від вільної поверхні розділу, що відповідає зовнішній межі суперкаверни з оброблюваним потоком СЛВ на жорстких стінках робочої камери сепаратора, необхідно виконувати умову повного непротікання. У цьому випадку граничними умовами для вирішення загальних рівнянь руху потоку СЛВ та парогазової суміші (8)-(9) є:

- жорсткі стінки зі сторони головного потоку СЛВ:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \frac{\partial P}{\partial x} \quad (12)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

- жорсткі стінки всередині кавітаційної каверни:

$$\frac{\partial P_{st}}{\partial x} = P_{s.st} \quad (14)$$

$$\frac{\partial V_{st}}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

t - час, с; n - координата нормалі до поверхні, м; P_{st} – тиск пари, Па; $P_{s.st}$ – тиск насиченої пари, Па.

Розрахункова схема. Для проведення теоретичних досліджень процесу штучної вентиляції суперкавітаційної каверни з урахуванням чисельних методів була розроблена розрахункова схема. При її використанні була прийнята гіпотеза про те, що:

- конструкція робочої камери кавітаційного каналу передбачає чітке замикання кордонів суперкаверни на вихідну жорстку стінку (всі інші випадки вважаються такими, що не є технологічно припустимими);

- швидкість на межі каверни приймалася рівною швидкості потоку в розрахунковому перерізі, який збігається з входом в кавітаційний канал. Така умова узгоджується з експериментальними результатами роботи [7] і в цьому випадку вплив нестаціонарних явищ у хвостовій частині каверни на умови обтікання її головної частини відсутні.

Перевагою запропонованої розрахункової схеми є подолання парадоксу Бріллуена - на межі каверни швидкість є величиною постійною та відмінною від нуля. У своїй хвостовій частині вона містить критичну точку з нульовою швидкістю, яка при цьому фізично відповідає верхній кромці вихідної пластини. За рахунок такої фіксованої точки задовольняється умова Жуковського-Чаплигіна – під час проведення розрахунків має місце плавне сходження ліній струму з поверхні кавітаційної суперкаверни.

Для вирішення диференціальних рівнянь математичної моделі процесу сепарації СЛВ було використано метод кінцевих різниць. В цьому випадку вся розрахункова область розбивалася на розрахункові перерізи з рівномірним кроком. Розмір кроку вздовж віссі OX і OY вибиралася виходячи з результатів попередніх розрахунків і зазвичай становила $\left(x_{i+1} - x_i\right) = L \cdot 10^{-4}$ та $\left(y_{i+1} - y_i\right) = H \cdot 10^{-6}$.

Всі складові рівнянь математичної моделі відповідають суцільному однорідному потоку СЛВ. При використанні кінцево-різницевого методу, що передбачає заміну суцільного середовища дискретним вони були розписані за допомогою їх різницевих аналогів. Залежно від розташування розрахункової точки стосовно твердих меж розрахункової області були використані центральні, лівосторонні і правосторонні різниці другого порядку вірогідності.

5. Результати досліджень

При моделюванні процесу сепарації СЛВ була визначена залежність подовження каверни L по відношенню до ширини робочого каналу кавітаційного сепаратора СЛВ. Розрахунок проводився без урахування вдування повітря, оскільки відповідно до висновків роботи [7] на геометрію каверни не впливає ні спосіб її створення ні форма тіла, за якою вона утворюється. Результати розрахунків показані рисунку 1, де видно, що зниження швидкості потоку, відповідне графіку зростання числа кавітації призводить до істотного скорочення розмірів каверни. Робочі розміри кавітаційної каверни лежать діапазоні чисел кавітації від 0,1 до 0,15. В цьому випадку довжина каверни становить від 5 до 4 калібрів ширини робочої камери кавітаційного каналу.

Для контролю розрахункових даних щодо зростання кавітаційної каверни в поперечному перетині по всій її довжині використовувалися результати роботи [7]. Для необмеженого потоку в цій роботі пропонується використання співвідношення виду

$$\frac{D_{max}}{d} = \frac{0.955}{\sqrt{\Omega}} \tag{16}$$

де D_{max} – максимальний діаметр кавітаційної каверни, м; d – діаметр насадка, за яким створюється кавітаційна каверна, м.

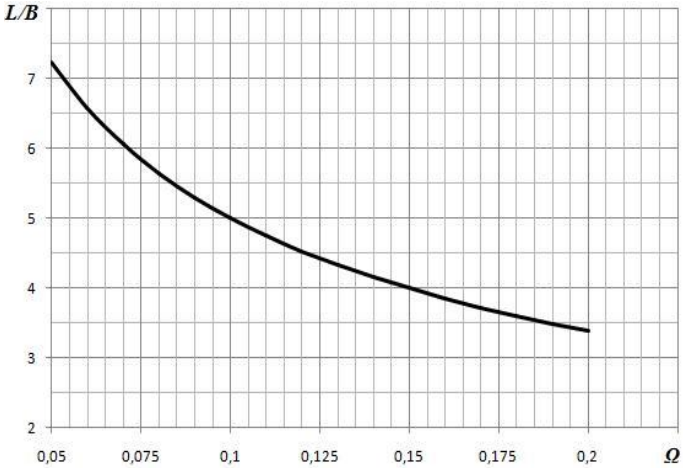


Рис. 1. Залежність довжини каверни від швидкості потоку

Результати розрахунку, які відповідають кавітаційній каверні, що виникає за плоскою вхідною стінкою кавітаційної камери сепаратора СЛВ показані на рисунку 2. На ньому видно, як змінюється ширина каверни в залежності від зростання вхідної швидкості потоку у двох випадках – необмеженому потоці та в потоці, який обмежений двома твердими стінками. Порівняльний аналіз графіків показує, що наявність жорстких стінок, що стискають потік, призводить до зменшення поперечного розміру кавітаційної каверни в порівнянні з випадком, коли кавітаційна порожнина утворюється в необмеженому потоці. Відмінність у графіках також можна пояснити різною формою насадок, що моделювалися в розрахунках (диск і прямокутна пластина).

При проведенні розрахунків було виконано оцінку ступеня впливу жорсткої горизонтальної межі робочої камери кавітаційного каналу на деформацію нижнього контуру кавітаційної каверни. Розрахунок ординат профілю каверни був проведений для трьох значень відносної висоти $\bar{h}$ вхідної пластини кавітатора. Ця величина розраховувалася як відношення висоти передньої стінки на вхідному отворі робочого каналу h до загальної висоти кавітаційного каналу H.

Результати розрахунків показані на рисунку 3, де видно, що падіння величини $\bar{h}$ призводить до вирівнювання контуру каверни до плоскої форми.

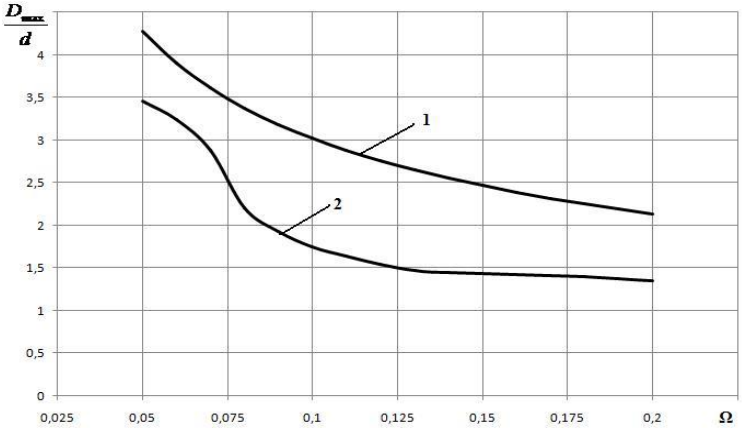


Рис. 2. Вплив швидкості потоку на ширину кавітаційної суперкаверни. 1 – розрахунок для необмеженого потоку; 2 – розрахунок для обмеженого потоку

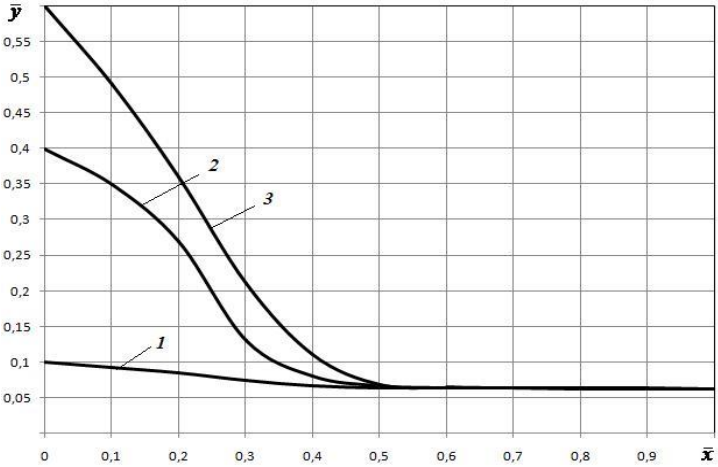


Рис. 3. Вплив геометрії течії на контур каверни
1 – $\bar{h}$=0.1; 2 – $\bar{h}$=0.4; 3 – $\bar{h}$=0.6

Горизонтальна вісь на рисунку 3 відповідає відносному подовженню каверни $\bar{x} = \frac{x}{L}$, а вертикальна вісь - зміні її відносної ординати $\bar{y} = \frac{y}{H}$.

Специфічна особливість процесу сепарації СЛВ визначається проявом головної фізичної властивості СЛВ – густини. Основні нафтовмісні компоненти не підпорядковуються відомому закону Ньютона. Тому структура багатофазного потоку повинна розглядатися як решітка, що містить воду. Ця решітка в свою чергу складається з набору молекул парафіну і смол, що хаотично розташовуються між собою [4].

У разі коли густина потоку СЛВ є невідомою її можна в першому наближенні знаходити за значеннями величин густини складових n компонент з урахуванням їх об'ємного вмісту a_i.

$$\nu = \nu_1 a_1 + \nu_2 a_2 + \cdots + \nu_n a_n \tag{17}$$

Через яскраво виражену нелінійність реологічних властивостей у потоці СЛВ завжди присутній сильний опір дотичних напружень зсуву. З цієї причини більшість конструкцій гідродинамічних сепараторів суднових лляльних вод використовують плескаті канали, всередині яких має місце стратифікація оброблюваного потоку за густиною. При розрахунках була виконана оцінка величини падіння тиску всередині двомірного плоского каналу, стінки якого становлять дві паралельні площини. Значення кінематичної в'язкості потоку СЛВ бралися ідентичними і дорівнювали $\nu = 2 \cdot 10^{-6}\ m^2/sec$.

Для різних значень густини потоку СЛВ було встановлено, що зростання цього параметру призводить до збільшення величини падіння тиску при його русі. Щодо запропонованого методу гідродинамічної кавітаційної сепарації можна стверджувати, що за інших рівних умов у цьому випадку настання процесу кавітації слід очікувати за менших швидкостей руху. При цьому величина швидкості безпосередньо визначається величиною надлишкового тиску, Чим вище надлишковий тиск в суміші СЛВ, що прокачується, тим вище буде вплив кавітації на ефективність технологічного процесу сепарування.

Оскільки при виникненні кавітації в потоці СЛВ каверна, що виникає, при гідромеханічному підході може розглядатися, як місцевий опір, то цікавість оцінка величини коефіцієнта її опору. Цей параметр рекомендується розглядати як суму індуктивного та двох профільних опорів

$$C_x = C_{x\ ind} + C_{x\ t.w.} + C_{x\ b.l.} \tag{18}$$

де $C_{x\ ind}$ - індуктивний опір, що залежить від ступеня подовження каверни і кута атаки потоку, що набігає на каверну; $C_{x\ t.w.}$ - профіль-

ний кавітаційний опір, що викликається турбулентним слідом за каверною та нестаціонарним режимом замикання її кордонів; $C_{x\ b.l}$ - профільний грузький опір, що викликається за наявності жорстких перешкод прикордонним шаром, що виникає на них.

Усі складові виразу (18) безпосередньо визначаються процесами утворення вихорів уздовж межі розділу кавітаційної каверни. Індуктивний опір викликається переважно поздовжніми вихорами на межах кавітаційної каверни, а профільний опір - поперечними вихорами на її межах.

Висновки

Сучасні методи сепарації СЛВ на судах мають один загальний недолік. При реалізації на судні очищення СЛВ завжди є односпрямованою. Під час процесу сепарації вихідним продуктом є лише одна водна компонента, а вторинні продукти нафтохімії з високим ступенем концентрації дуже складно отримати у чистому вигляді та надалі їх використовувати неможливо.

Якісним розв'язанням проблеми утилізації СЛВ може бути використання нового методу сепарації, який використовує гідромеханічний підхід. При створенні штучним шляхом за рахунок вдування повітря кавітаційної каверни в потоці, що рухається, СЛВ можливо безперервно відбирати насичену водяну пару, що утворюється, і таким чином отримувати компоненти СЛВ.

При створенні штучної суперкаверни за рахунок вдування повітря для обробки СЛВ швидкість, що викликається гідродинамічними особливостями всередині кавітаційного каналу, на межі каверни в основному визначатиметься горизонтальними складовими швидкостей повітря та оброблюваного потоку СЛВ.

Під час використання процесу кавітації для сепарації СЛВ робочий тиск повинен знижуватися і це пониження має завжди компенсуватися зростанням температури потоку СЛВ, що обробляється.

Перелік використаних джерел

1. MARPOL 73/78 - International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973. 584 p.

2. Bashan, V., Demirel, H., Celik, E. 2022. Evaluation of critical problems of heavy fuel oil separators on ships by best-worst method.

3. Amran, N. A., Adibah, S. M., 2020. Oil-Water Separation Techniques for Bilge Water Treatment. Resources of Water. DOI%

10.5772/intechopen.91409.

4. Kolmetz, K., 2011, Separator vessels selection sizing and troubleshooting, Handbook of Process Equipment Design.

5. Mutch, G. A., 2022. Electrochemical separation processes for future societal challenges. Cell Reports Physical Science. Volume 3, Issue 4.

6. Nesteruk, I., 2012. Supercavitation: Advances and Perspectives A collection dedicated to the 70th jubilee of Yu.N. Savchenko, Springer. 240 p.

7. Egorov, I.T., 1971. Artificial cavitation. Leningrad: Shipbuilding. 284 p.

10.31653/smf47.2023.82-96

Малахов О.В., Маслов І.З., Найденов А.І., Генчев В.В., Мазур Т. М.

Національний університет “Одеська морська академія”,
Дунайський інститут Національного університету “Одеська морська академія”

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДЕН ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНОГО ФЛОТУ

Вступ. При експлуатації сучасних суден днопоглиблювального флоту реалізується видобуток більшої частини світової обсягу нерудних будівельних матеріалів. Саме за рахунок цих суден щорічно на шельфі США видобувають 500 млн. т, а Японії 67 млн. т. [1-2]. Продуктивність сучасних суден днопоглиблювального флоту характеризуються високими значеннями і доходить до 15000 м^3/год по пульпі, що видобувається. Цим значенням під час проведення робіт відповідає концентрація ґрунту в пульпі 30-75%.

Постановка проблеми. Модернізація технологій, що використовуються для вивантаження доставленого ґрунту при своєму правильному використанні може призвести до істотного зниження простоїв судна на місці складування [3]. Як очікуваний головний результат таких досліджень можна виділити можливість вивантаження всього перевезеного ґрунту без баластових трюмних залишків. При цьому можна констатувати, що в даний час практично повністю відсутні технічні засоби і технології, що дозволяють руйнувати ущільнений грунт безпосередньо в ході розвантаження трюмів на суднах днопоглиблювального флоту.

При аналізі властивостей грунтів, що розробляються, доцільно використовувати їх стандартну класифікацію за класами. Вона базується на труднощі розробки грунту і включає I – VII класи. Основою для такої класифікації ґрунтів є їх гранулометричний склад, прилипання та міцність. Зазначені три технологічні параметри безпосередньо визначаються щільністю та консистенцією ґрунту в умовах його природного залягання.

Усі відомі способи промислового руйнування ущільненого поверхневого шару ґрунтової поверхні є механічними та характеризуються великими енергетичними витратами. Залежно від способу застосування механічного навантаження до ґрунту їх можна поділяти на вібраційні, вібраційно-ударні, ударні та фрезерні.

Найбільш якісно, і з найменшими енергетичними витратами, процес руйнування ґрунту може відбуватися у тому випадку, коли швидкість силового впливу виконавчого елемента перевищує або є порівнянною зі швидкістю розповсюдження пластичних деформацій у ґрунті.

У ході аналізу всіх технологій видобутку, транспортування та вивантаження ґрунту суднами днопоглиблювального флоту було отримано висновок про те, що проблема руйнування ущільненого поверхневого шару ґрунту залишається, як і раніше, не вирішеною, а існуючі технічні пристрої не дозволяють одночасно обробляти всю площу ущільненого поверхневого шару з підготовкою ґрунту до його подальшого транспортування. На підставі цього висновку були сформульовані основні завдання досліджень, які полягали у розробці нової технологічної схеми видобутку та транспортування ґрунту при роботі суден днопоглиблювального флоту та розробці нових технологічних схем підвищення продуктивності суднової системи розмиву ґрунтової пульпи.

У ході попередньо виконаних досліджень було зроблено висновок про доцільність використання комбінованого способу сепарування води та ґрунту. Такий спосіб повинен об'єднувати в собі технічні рішення, що найбільш просто реалізуються, а саме:

- використання гідромеханічних характеристик рухомої суміші ґрунту з водою для первинного відбору незв'язаної з ґрунтом води;
- механічний віджимання пульпи для отримання потрібного залишкового вмісту води в ґрунті;
- аерування ґрунту з отриманням рівномірної консистенції під час завантаження в шаланду пневмотранспортом.

Аналіз досліджень і публікацій. З технічної точки зору одним із найбільш зручних пристроїв для розпушування ґрунту може бути техніка, що використовує струмені високого тиску [4]. На таких струменях рух рідини чи газу обмежено поверхнею тангенціального розриву, де спостерігається розрив таких характеристик потоку, як швидкість, температура, концентрація домішки тощо. За рахунок такого тангенціального розриву відбувається поперечна передача кількості руху від струменя до навколишнього простору. Одним із джерел струменів високого тиску може виступати гідравлічний удар – спрямована ударна хвиля високого тиску. В області грунтозабору напрям руху ударної хвилі може, як збігатися, так і бути протилежним до потоку, що рухається.

Відповідно до теорії струменів під час гідравлічного удару під час руху ударної хвилі всередині трубопроводу з абсолютно жорсткими стінками її параметри пов'язані між собою законами збереження маси, імпульсу та енергії, тобто.

$$\rho_0\left(\vec{C}-\vec{V}_0\right)=\rho\left(\vec{C}-\vec{V}\right) \tag{1}$$

$$P-P_0=\rho_0\left(\vec{V}-\vec{V}_0\right)\left(\vec{C}-\vec{V}_0\right) \tag{2}$$

$$E-E_0=\frac{P+P_0}{2}\left(\frac{1}{\rho_0}-\frac{1}{\rho}\right) \tag{3}$$

де ρ_0, P_0, V_0, E_0 – відповідно щільність, тиск, масова швидкість та внутрішня енергія одиниці маси робочого середовища перед фронтом ударної хвилі, а ρ, P, V, E – аналогічні величини за фронтом ударної хвилі; C – швидкість руху ударної хвилі.

При заданні рівняння стану середовища та зв'язку внутрішньої енергії з параметрами, що визначають стан речовини, можна побудувати адіабату Гюгоніо, що зв'язує ударний тиск із щільністю речовини. Для конденсованих речовин такий зв'язок має вигляд

$$P=\frac{\rho_0 C_a^2}{n}\,\frac{\sigma^n\left(h-\dfrac{n+1}{n-1}\right)+\sigma\dfrac{2n}{n-1}-(h+1)}{h-K\sigma} \tag{4}$$

де $\sigma=\dfrac{\rho}{\rho_0}$ - величина стиснення (для води $\sigma=1$); h – показник політропи; K – коефіцієнт пористості речовини; C_a - коефіцієнт, що враховує внутрішню структуру речовини (для заліза C_a=4650 м/с, для пористих ґрунтів C_a=1000 - 2300 м/с).

Розв'язання задачі про взаємодію ударної хвилі, що виникла при гідравлічному ударі з щільним і пористим грунтом, показало, що з урахуванням співвідношення

$$(\rho C)_{плот.грунт}>(\rho C)_{порист.грунт}>(\rho C)_{вода} \tag{5}$$

при відображенні ударної хвилі від щільного ґрунту виникає тиск P_a, а від пористого ґрунту P_b. Виходячи з співвідношення акустичної жорсткості щільного і пористого грунтів виходить, що $P_b > P_a$. Інакше кажучи, наявність пір у грунті призводить до підвищення тиску відбиття, тобто шар грунту, що розробляється, буде сприймати мен-

ше ударне навантаження. Якщо розмір пір в грунті є великим, то ударна хвиля буде приводити до їх повного схлопування, що виразиться в ще більшому значенні величини P_b.

Крім руйнування ґрунту дуже важливим питанням є концентрація ґрунтової пульпи, яка подається в трюм або шаланду для свого подальшого транспортування. Чим нижче концентрація води в такій суміші, тим більш рентабельною буде робота судна.

Постановка завдання. На підставі вище викладеного було сформульовано головне завдання досліджень. Воно полягає у розробці та визначенні головних експлуатаційних та технологічних показників установки для сепарування грунтової пульпи під час проведення робіт суднами днопоглиблювального флоту.

Основні матеріали дослідження. Розроблена в ході досліджень технологічна схема сепарації ґрунтової пульпи показана на схематичному рисунку 1. Основна енергія, необхідна для роботи сепараційної установки, передається ґрунтовій пульпі при її підйомі на борт судна ґрунтовим насосом 1. По підхідному грунтопроводу 2 пульпа надходить в циклонну камеру де за рахунок обертання потоку відбувається первинний поділ води та ґрунту. У верхній центральній частині циклону трубопроводом відведення сепарованої води 4 за рахунок роботи допоміжного насоса 5 відбувається відбір освітленої пульпи. З нижньої частини циклону ґрунт із залишковою водою потрапляє у вузол механічного віджимання 6. Його основними елементами є гвинт, що обертається на малих обертах, і жорсткі стінки корпусу. Оскільки на всіх земснарядах привід має резерв потужності, швидкість обертання віджимних гвинтів можна встановлювати в будь-якому технологічно необхідному діапазоні. У нижній частині вузла механічного віджимання 6 передбачена установка піддону з перфорованими гратами, через які видаляється залишкова вода. За рахунок регулювання прохідного робочого перерізу вузла 6 і числа оборотів віджимного гвинта у оператора з'являється можливість управління головними характеристиками суднової установки сепарації - її продуктивністю і концентрацією залишкової води в грунті, що сепарується. Таке управління надалі незмінно буде проявлятися у підвищенні ефективності експлуатації земснаряду та зниженні загальної вартості днопоглиблювальних робіт.

Вузли сепарації, що встановлюються при ремонті судна, можуть виступати єдиними технічними пристроями, які принципово змінюють вартісні і технологічні показники днопоглиблювальних робіт, що

проводяться земснарядами. При поточній експлуатації транспортних систем суднового землесосу розроблений гідромеханічний вузол сепарації повинен мати малий енергоспоживання, оскільки у своїй роботі він використовує додаткову енергію тільки на етапі остаточного віджимання ґрунту.

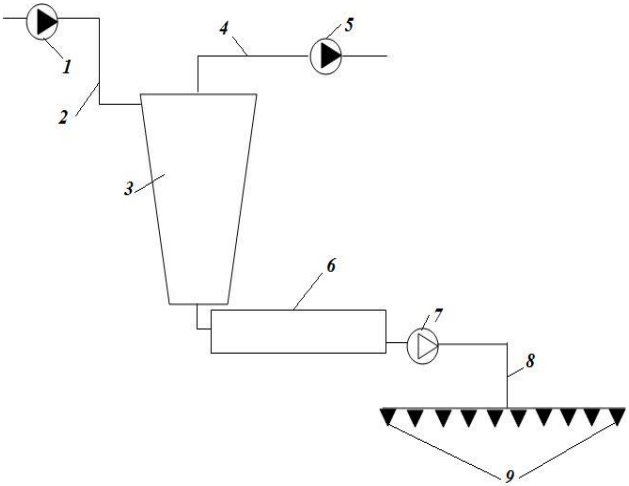


Рис. 1. Принципова схема вузла сепарації пульпи
1 – судновий ґрунтовий насос; 2 – підхідний ґрунтопровід; 3 – циклонна камера; 4 – трубопровід відведення сепарованої води; 5 – допоміжний насос; 6 – вузол механічного віджимання; 7 – компресор високого тиску; 8 – пневмолінія; 9 - розпилювальні сопла.

Основні умови теоретичного та фізичного моделювання процесу гідродинамічного поділу пульпи на складові були отримані з використанням відомої в теорії подібності π-теореми.

Процес руху пульпи із закруткою в циклоні визначається набором наступних фізичних величин: швидкістю основного потоку на виході з соплового апарату яка одночасно є кутовою швидкістю потоку в камері V, щільністю пульпи ρ, її в'язкістю μ, кутом конусності робочої камери циклону α, висотою робочої камери h, вихідним діаметром робочої камери циклону d. Шляхом зіставлення розмірності зазначених величин отримаємо їхню комбінацію в загальному вигляді

$$Q = f\left(V, \rho, \mu, \alpha, h, d\right) \tag{6}$$

Розглядаючи функціональну залежність (6) було виділено три основні розмірності, що входять до неї – *кг, с, м* кг, с, м. Додатковою розмірністю є *град*. Число безрозмірних комплексів, що характеризують процес сепарації пульпи, визначиться як

$$M = i\text{-}z = 6\text{-}3 = 3 \qquad \text{або} \qquad \left[V^{x_1}\rho^{x_2}\mu^{x_3}\alpha^{x_4}h^{x_5}d^{x_6}\right] = Q \qquad (7)$$

Аналіз функціонального зв'язку (7) у комбінації зі зіставленням з розмірностями вихідних параметрів показав, що при моделюванні процесу гідродинамічної сепарації ґрунту під час фізичних експериментів необхідно, щоб для моделі та натурного об'єкта завжди задовольнялися рівності:

- кута розчину циклону робочої камери сепараційної установки;
- відношення висоти циклону робочої камери сепараційної установки до її вихідного діаметру;
- нелінійного відношення кінематичної в'язкості пульпи до швидкості її подачі.

Ці умови моделювання у вигляді критеріїв подібності мають вигляд:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{h}{d} = idem \\ &\alpha = idem \\ &\frac{\sqrt[7]{\nu^4}}{V^7} = idem \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

У ході теоретичних досліджень було вирішено задачу про закрутку потоку ґрунтової пульпи в робочій камері циклону сепараційної установки. Рух суспензії частинок ґрунту з водою розглядався як турбулентний. Характерні значення швидкості потоку $V_{вх}$ відповідали діапазону від 3 до 18 м/с, а числа Рейнольдса перевищували 10^5.

У вибраному методі сепарування ґрунтової пульпи в умовах роботи судна принциповим питанням є кількість води, що відбирається з камери циклону. Для знаходження цього показника були проведені розрахунки, що показують, як частинки ґрунту відкидаються до стінок камери циклону в залежності від швидкості підведення вихідної суміші. При обчисленнях значення густини пульпи (вода-пісок) приймалися такими, що дорівнюють $\rho_{гр}$=1200 кг/м^3, а динамічної в'язкості пульпи μ=10^{-3} Па·с. Отримані результати розрахунків показані рисунку 2, де для різних значень швидкості потоку на вході в

циклон можна побачити зміну радіальної швидкості руху ґрунту в різних перерізах циклону.

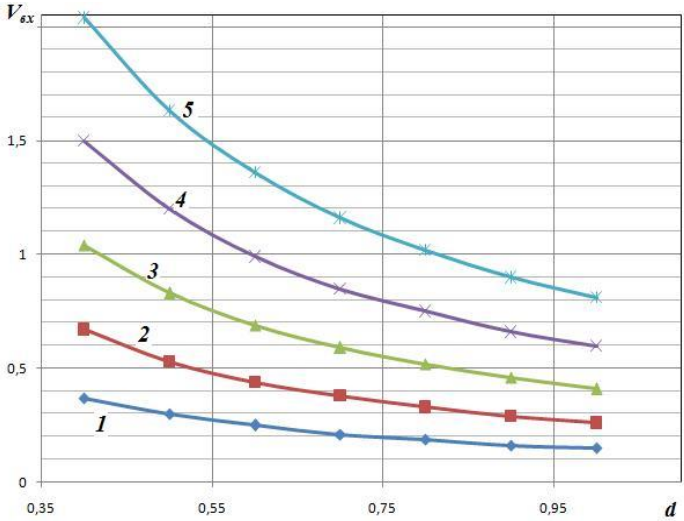


Рис. 2. Характер зміни радіальної швидкості грунту по висоті циклону
1 – $V_{вх}$=3 м/с; *2* – $V_{вх}$=4 м/с; *3* – $V_{вх}$=5 м/с; *4* – $V_{вх}$=6 м/с;
5 – $V_{вх}$=7 м/с.

Характер зміни часу, протягом якого частки ґрунту зміщуються до стінок циклону при різних значеннях швидкості підведення пульпи в робочу камеру можна побачити на рисунку 3. З графіка випливає однозначний висновок - зростання швидкості підведення пульпи в циклон значно скорочує процес її сепарування. У цьому випадку частинки ґрунту в нелінійній залежності від швидкості підведення починають швидше відходити від віссі обертання всього об'єму пульпи, що обробляється. На рис. 3 видно, що робочі значення швидкості підведення повинні перевищувати 5 м/с. Так, при швидкості входу 3 м/с час сепарації практично в 2,5 рази більше за аналогічну величину при 5 м/с і в 4 рази більше при швидкості підведення 6 м/с. Оптимальним значенням швидкості входу пульпи до сепаратора є величина 7 м/с. В цьому випадку, як видно з графіка, максимальний час відділення ґрунту від води в найбільшому перерізі робочої камери циклону становить всього 2 секунди.

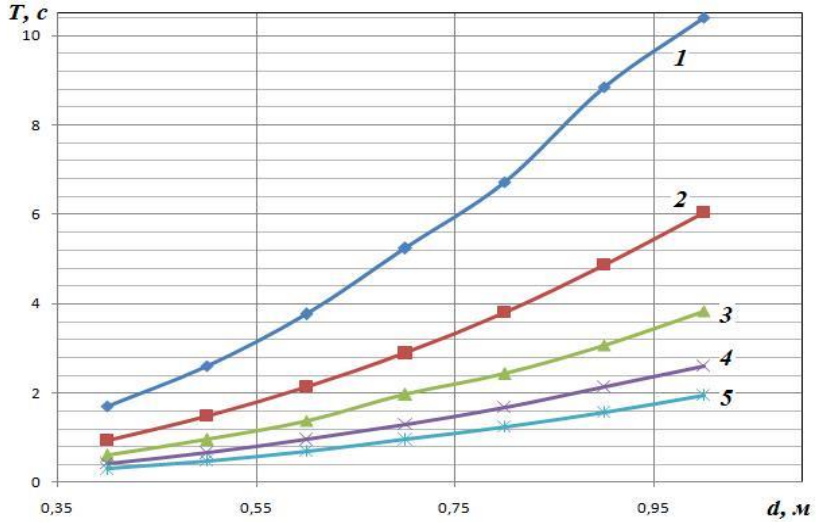


Рис. 3. Залежність часу сепарування грунту від швидкості подання *1* – $V_{вх}$=3 м/с; *2* – $V_{вх}$=4 м/с; *3* – $V_{вх}$=5 м/с; *4* – $V_{вх}$=6 м/с; *5* – $V_{вх}$=7 м/с.

Аналіз результатів, показаних на рисунку 3 не дає відповіді на основне питання про те, чи достатньо вхідної енергії потоку для повноцінного відкидання ґрунту до стінок циклону. У цьому випадку необхідно визначати залежність відстані, на яку в циклоні зміщується ґрунт із зростанням швидкості його закрутки. Результати цих розрахунків можна побачити на рисунку 4, де для різних значень швидкості потоку на вході в циклон представлений закон зміни величини зміщення ґрунту в радіальному напрямку у різних перерізах циклону.

З графіка видно, що результати підпорядковуються єдиному універсальному закону. Усі п'ять розрахункових значень вхідної швидкості потоку лягають однією лінію. Аналіз рисунка 4 дозволяє зробити однозначний висновок про те, що при сепарації ґрунту всередині робочої камери циклону радіальне зміщення частинок ґрунту не залежить від радіусу циклону.

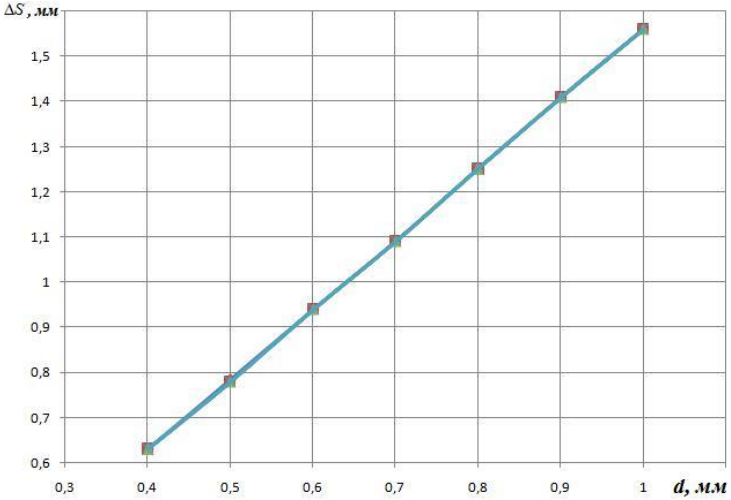


Рис. 4. Ступінь радіального зсуву грунту по висоті рабочої камери циклону

Окремим завданням під час проведення досліджень було підвищення продуктивності суднової системи розмиву ґрунтової пульпи. Під час її вирішення було встановлено, що продуктивність може бути збільшена шляхом реалізації двох напрямків. Перший напрямок відповідає технологічній стадії, яка пов'язана з видобутком ґрунту. Цей напрямок в основному визначається:

- головними технологічними показниками судна (використаним обладнанням, наявністю додаткового бустерного насоса тощо);
- ступенем підготовки оператора ведучого ґрунтовидобування;
- видом грунту, що всмоктується з дна ділянки, що розробляється.

Другий напрямок пов'язаний з вивантаженням пульпи. Швидкість розвантаження на місці складування скорочує простої судна і знижує екологічне навантаження на водний регіон карти намиву, але з технологічної погляду є складнішою, ніж процес видобутку грунту. Основні проблеми в цьому випадку пов'язані з ущільненням ґрунту, його залипанням на стінках трюму та відсутністю спеціальних пристроїв розвантаження ґрунту.

Технологія очищення трюмів суден днопоглиблювального флоту від ґрунту з використанням відцентрового відділення пульпи, що отримується, дозволяє істотно підвищити якість і продуктивність процесу вивантаження ґрунту. З іншого боку, технологічні умови, що

існують на земснарядах, а саме: великі обсяги танків (трюмів), відсутність можливості візуально контролювати всі етапи роботи установки, вимагають застосування контрольно-вимірювальної апаратури для автоматизації процесу управління розвантаженням. У цьому випадку за рахунок автоматизованого процесу розмиву стає можливим суттєво знизити вартість процесу розвантаження.

Використовувані технології розвантаження та ступінь їхньої автоматизації визначають як швидкість скидання ґрунту, так і ступінь технічної складності реалізації цієї операції. Модернізація використовуваних технологій транспортування і перевантаження ґрунту, що видобувається, при своєму правильному використанні може призвести до істотного зниження простоїв судна при скиданні грунту, і найголовніше дозволить вивантажувати весь перевезений грунт без баластових залишків.

Основна спрямованість робіт з автоматизації системи вивантаження ґрунту із трюму судна має забезпечувати безперервну реалізацію циклічного процесу ”розмив – відбір із трюму – рефулювання чи скидання за допомогою гідросистем”.

- регулювання частоти та тривалості відкриття всіх клапанів системи розмиву ґрунту.

Для реалізації перелічених вище функцій було розроблено систему автоматизованого управління технологічним процесом розвантаження грунту. До її складу входять: датчики тиску, витратоміри, вимірювачі рівня.

З метою забезпечення високої якості контролю вимірюваних параметрів системи розмиву ґрунту значна частина датчиків має бути встановлена безпосередньо на рухомій ділянці установки. Залежно від типу земснаряду можливе переміщення розмивного трубопроводу на значні відстані, які здебільшого визначаються габаритними розмірами трюму судна та швидкістю вивантаження ґрунтової пульпи. У цих умовах для надійного обміну інформацією в системі управління необхідне застосування сучасних промислових інформаційних систем, інформаційних мереж та протоколів, що мають високу надійність, швидкість і перешкодозахищеність. Цим вимогам найбільше відповідають сучасні бездротові промислові технології [5].

Однією з передових технологій бездротового обміну інформацією системах управління технологічними процесами з виробництва є технологія WirelessHART. На сьогоднішній день у світі встановлено та працює понад 30 мільйонів HART-пристроїв, і технологія HART є

найпоширенішим польовим комунікаційним протоколом для інтелектуальних вимірювальних пристроїв. Найбільш суттєвою для застосування в умовах судна властивістю технології WirelessHART є автоматичне функціонування мережі датчиків, що забезпечує:

- самоорганізацію та самовідновлення мережі;
- безперервно чинний захист;
- самоналаштування при заміні або додаванні нових пристроїв;
- Адаптацію до змін в інфраструктурі працюючої мережі.

Технологія WirelessHART забезпечує надійність наскрізної передачі даних на рівні 99,9% у будь-яких виробничих умовах, що має важливе значення в умовах судна. HART-протокол є одним з кращих промислових протоколів інформаційного обміну в мережах систем управління технологічними процесами. Він забезпечує високу надійність, швидкість, безпеку, безконфліктність і схибленість. Більшість сучасних виробників контрольно-вимірювального обладнання випускає датчики та прилади, які мають вбудовану апаратну підтримку цього протоколу.

При розробці автоматизованої системи управління розвантаженням пульпи запропоновано використовувати обладнання та технології компанії Emerson, що пропонує рішення, що відповідають найвищим вимогам, стандартам та умовам експлуатації. Устаткування Emerson поширене на сучасному технічному флоті, що дозволяє відносно легко інтегрувати цю систему в існуючу інфраструктуру суднового обладнання. Найсучасніші датчики та прилади Emerson мають вбудований бездротовий HART інтерфейс. Можливе також використання та обладнання старшого покоління за рахунок застосування бездротових HART комунікаторів, що дозволяють інтегрувати дротові прилади у бездротові мережі [6]. Схема бездротової сенсорної мережі, що самоналаштовується, розроблена в ході досліджень для системи управління судновою системою розвантаження грунту показана на рисунку 6.

Мережа заснована на сумісних зі стандартом IEEE 802.15.4 радіопередавачах. Такі передавачі працюють у промисловому, науковому та медичному діапазоні 2,4 ГГц, що повністю відповідає умовам їх інтегрування у роботу днопоглиблювального судна. Вони використовують технологію широкосмугового сигналу з прямою послідовністю та перемиканням каналів для забезпечення комунікаційної безпеки та надійності, а також технологію синхронізованого ба-

гатостанційного доступу з тимчасовим поділом каналів (TDMA) та контрольовану затримку зв'язку між пристроями в мережі.

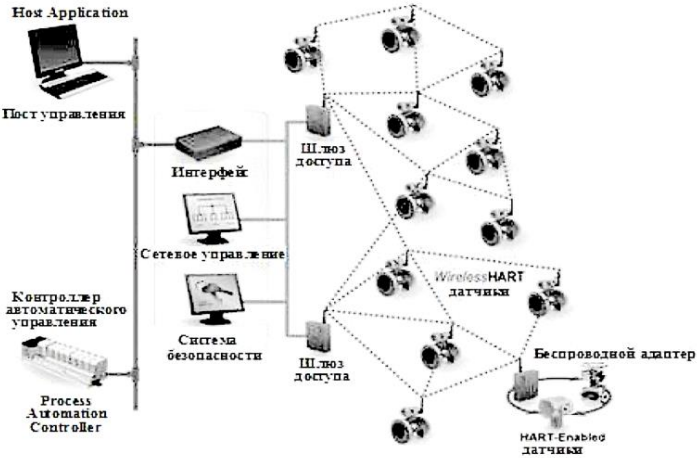


Рис. 6. Схема бездротової мережи системи керування розвантаженням грунту

Під час розробки системи автоматизованого управління вивантаженням пульпи був використаний принцип пристроїв маршрутизаторів. У цьому випадку будь-який з керованих електромагнітних клапанів може служити маршрутизатором для повідомлень від інших, сусідніх клапанів. Потрібний сигнал передається на найближчий сусідній пристрій. Цей принцип розширює масштаб мережі та забезпечує надлишкові канали передачі для підвищення надійності. Застосована вузлова схема мережі також дозволяє легко додавати та переміщувати додаткові пристрої. Пристрій завжди залишається на зв'язку, коли він знаходиться в зоні дії інших пристроїв у мережі.

Однією з основних функцій системи управління процесом розвантаження ґрунту є регулювання частоти та тривалості часу спрацьовування електромагнітних клапанів. Для завдання робочого діапазону роботи клапана було запропоновано використати емпіричний закон регулювання роботою клапана у вигляді

$$f = \frac{k_1 h}{Q_1 \left(P_2 - P_1\right)} \tag{9}$$

$$t = \frac{k_2 h}{P_2 Q_2} \tag{10}$$

де f – частота перемикання електромагнітного клапана на ділянці, що довільно розглядається як на контурній так і на розмивній ланці; h – висота положення трубопроводу щодо дна трюму; Q_1 - витрата грунту, що вивантажується; Q_2 – витрата води у живильному трубопроводі; P_1, P_2 – робочий тиск води безпосередньо за електромагнітними клапанами та в розмивних отворах; t - тривалість роботи струменів, на виході з розмивних отворів; k_1, k_2 – коефіцієнти, що визначаються емпіричним шляхом залежно від виду конструкції клапана, що використовується.

Розроблена схема алгоритму управління роботою системи автоматизації суднового вузла розмиву грунту показана на рисунку 7. Сам алгоритм управління реалізується у додатку Host Application і програмному забезпеченні Process Automation Controller, які відображені на схематичному рис. 6.

Для забезпечення гнучкості роботи мережі за різних умов роботи земснаряду стандарт WirelessHART підтримує кілька режимів передачі даних, включаючи:

- односпрямовану публікацію значень параметрів технологічного процесу та управління;
- миттєве повідомлення за винятком;
- спеціальний запит/відгук та передачу великих наборів даних з автоматичним сегментуванням.

Всі ці можливості дозволяють налаштовувати передачу даних відповідно до виробничих вимог реального процесу вивантаження ґрунтової пульпи. Основними результатами у цьому випадку є:

- можливість зниження енергоспоживання;
- скорочення часу простою судна під час проведення розвантажувальних операцій.

Розроблена мережа автоматизованого розмиву ґрунту дозволяє здійснювати динамічний контроль всіх параметрів первинних датчиків, як зі стаціонарної ПЕОМ оператора, і з мобільного терміналу управління. Під час роботи установки можливе підключення додаткових керуючих та діагностичних вузлів: монітора мережі, сервера безпеки тощо.

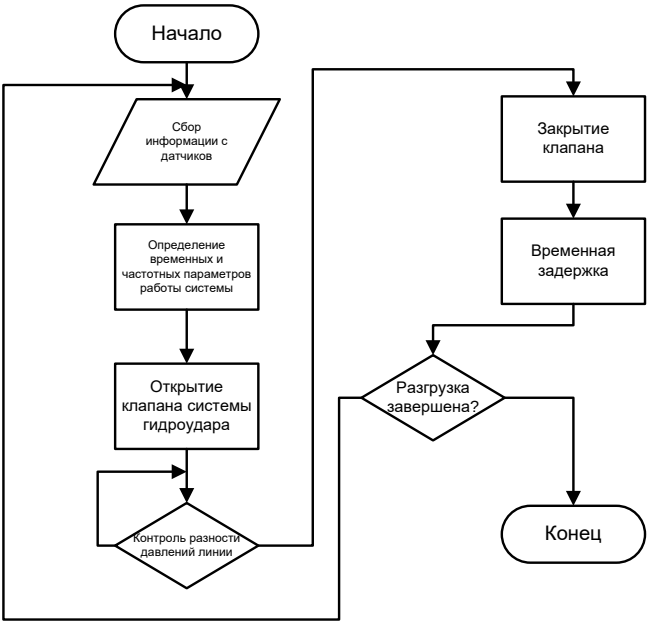


Рис. 7. Схема алгоритму керування клапаном

Висновки

Аналіз усіх технологій видобутку, транспортування та вивантаження ґрунту суднами днопоглиблювального флоту показує, що проблема руйнування ущільненого поверхневого шару ґрунту залишається, як і раніше, не вирішеною. Існуючі технічні пристрої не дозволяють одночасно обробляти всю площу ущільненого поверхневого шару з підготовкою ґрунту для його подальшого транспортування.

При сепарації ґрунту всередині робочої камери циклону радіальне зміщення частинок ґрунту не залежить від радіусу циклону.

Автоматизація процесу вивантаження ґрунту з підвищенням його концентрації в пульпі, що транспортується, дозволяє здійснювати динамічний контроль всіх параметрів первинних датчиків, як зі стаціонарної ПЕОМ оператора, так і з мобільного терміналу управління.

Перелік використаних джерел

1. Islam S., Parks, J. (2014) Economic assessment of dredging operations in Mobile Bay, USA and some additional notes on sustainable

management of dredged material. Journal of Coastal Conservation, Volume 18, Issue 3, 157-165.

2. Cutroneo L., Massa, F. Castellano, M. Canepa, G. Costa, S. Povero P., Tucci S., Capello M.(2014). Technical and public approaches to involve dredging stakeholders and citizens in the development of a port area. Environmental Earth Sciences. Volume 72, Issue 8, 3159-3171.

3. Lee K.M., Shen C. K., Leung D. H. K., Mitchell J. K. (1999) Effects of Placement Method on Geotechnical Behavior of Hydraulic Fill Sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , Vol. 125, No. 10, 832-846.

4. М.А. Колегаев, С.В. Зуев, І.З. Маслов, О.В. Малахов, Ф.А. Бендеберя. Використання хвиль ударного тиску в суднових гідравлічних системах. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. -2013. - № 1(8) - с.160-164.

5. Candell, R. , Hany, M. , Perez-Ramirez, J. and Conchas, J. (2022), An IEEE Standard for the Evaluation of Wireless Networks for Industrial Automation, IEEE Internet of Things Magazine, [online]. Режим доступу: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=934487

6. Zhang Yu-hua, Jiang Jian-guo.(2012) Dynamic Positioning Control System of the Dredger. Electrical, Information Engineering and Mechatronics. Lecture Notes in Electrical Engineering Volume 138, 1489-1495.

10.31653/smf47.2023.97-108

Нікольський В.В., Левінський М.В., Нікольський М.В.,
Слободянюк М.В., Кузьмінський Б.В.

Національний Університет «Одеська морська академія»

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ З ЕЛЕКТРОННИМ УПРАВЛІННЯМ

З початком переходу провідних виробників суднових двигунів з традиційними системами подачі палива та управління клапанами до систем з електронним управлінням постійно відбувається вдосконалення цих систем за рахунок вдосконалення як самого електронного обладнання, так і програмного забезпечення, що дозволяє підвищити надійність функціонування означених систем.

Крім того, з появою таких новітніх технологій, як Старлінк, з'являється можливість оперативного доступу до систем моніторингу та управління судновими двигунами не тільки суднової команди, а й офісу в режимі реального часу. Поява універсальних програмно-логічних контролерів з розширеними функціями дозволяє проводити модернізацію в короткі терміни шляхом заміни модуля пам'яті, або всього контролеру.

Слід зазначити, що судна, які були побудовані на початку 2000-х років обладнані системами моніторингу, в яких не передбачене подвійне резервування модулів управління та використовуються застарілі операційні системи, підтримка яких вже припинена.

Тому роботи, які пов'язані з вдосконаленням систем моніторингу суднових дизелів з метою підвищення надійності та розширення функціональних можливостей є актуальними як з наукової, так і з практичної точки зору.

Пошук в літературних і електронних джерелах інформації стосовно систем моніторингу параметрів суднового дизеля MAN-B&W типу ME показав наступний результат [2, 3, 7, 8, 10] – починаючи з 2000-х років з моменту застосування суднових двигунів з електронним управлінням подачею палива та управлінням клапанами комп'ютерні системи стали невід'ємною частиною суднового дизеля при виконанні завдань управління двигуном та моніторингу параметрів його стану, що дозволило знизити вартість експлуатації двигуна і забезпечити високий ступінь гнучкості в режимах роботи.

В цьому контексті виникають і вирішуються три основні завдання:

1) підвищення надійності двигуна: - on-line моніторинг параметрів забезпечує рівномірний розподіл навантажень між циліндрами;

2) підвищення гнучкості контролю викидів;

3) зниження витрат палива та мастила:

Електронна система управління двигуном складається з контролерів (МРС), пов'язаних між собою двома лініями мережі. Контролери одинакові по конструкції і відрізняються тільки програмним забезпеченням. До мережі також підключені дві панелі керування (МОР) на базі ПК під керуванням WindowsXP. Програмне забезпечення для всіх контролерів зберігається на жорсткому диску МОР. Така організація обміну даними сповільнена можливостей модернізації, завдяки новітнім технологіям, які дозволяють розширити функціональні можливості.

Аналіз можливих етапів вдосконалення системи моніторингу параметрів довів, що сам процес вдосконалення можливо поділити на кілька етапів: синтез первинних перетворювачів, здатних проводити вимірювання параметрів; вибір способу передачі інформації від первинних перетворювачів до суднової системи диспетчеризації; розробка системи диспетчеризації, інтегрованої з судновими системами менеджменту.

На рис. 1 приведено функціональну схему моніторингу параметрів суднового дизеля від компанії MAN-B&W типу ME, де: 1 та 2 – первинні перетворювачі з кабелями; 3 – система портативного збору інформації про тиск в циліндрі, що дозволяє побудувати індикаторну діаграму для кожного циліндру і служить для калібрування штатних первинних перетворювачів; 4 – блок калібрування; 5 – система PMI-online, яка постійно вимірює робочий процес двигуна і дозволяє проводити швидке та просте налаштування двигуна; 6 – тахогенератор; 7 – підсилювач сигналів з тахогенератора; 8 – VPN роутер [2, 3].

Система PMI-online (Performance Measurement Indicator) – це дослівно індикатор вимірювання ефективності.

На рис. 2 показані основні величини, які можливо обрати для моніторингу стану двигуна.

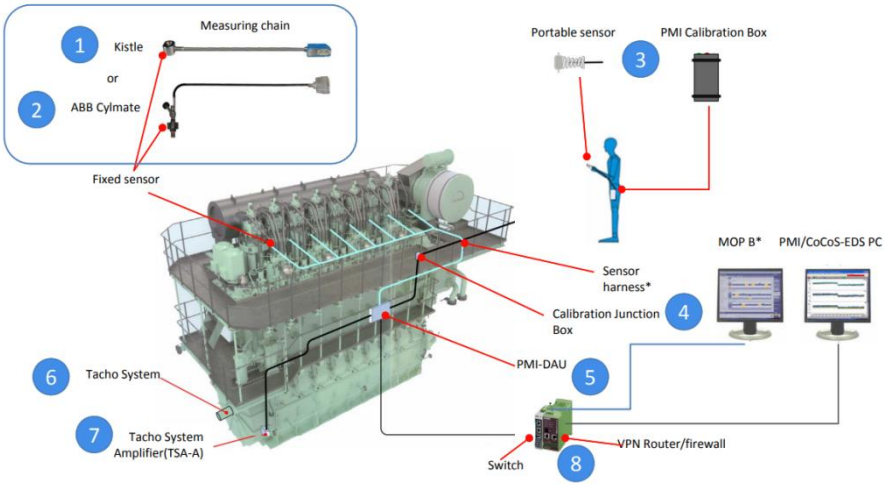


Рис. 1. Функціональна схема моніторингу параметрів суднового дизеля MAN-B&W типу ME [2, 3]

Key Values	Основні значення тиску з кожного циліндра та вихідна потужність наведені в таблиці
Balance	Відхилення основного значення тиску від «середніх» значень показано для кожного циліндра
PT	Тиск у циліндрах нанесено на графік відносно кута ВМТ кожного циліндра
P°CA	Тиск у циліндрі відкладено залежно від кута колінчастого вала
PV	Тиск у циліндрі відкладається на графіку відносного об’єму циліндра
PT (Raw Data)	Через 10 обертів колінчастого вала будується ряд кривих тиску в циліндрі. Кожна крива представляє фактичний сигнал, виміряний датчиком

Рис. 2. Зовнішній вигляд меню вибору параметрів [2, 3]

Запровадження бездротових технологій та їх переваги

На сучасному етапі розвитку бездротовий метод у системах дистанційного моніторингу та управління має відповідні переваги над дротовими системами, а саме:

– бездротовий метод дозволяє уникнути дротового підключення, спрощуючи і поліпшуючи інфраструктуру та монтаж;

– бездротові системи дистанційного управління мають більшу гнучкість у розташуванні та переміщенні обладнання, що є важливим під час проектування систем дистанційного управління;

– швидка інсталяція бездротових систем сприяє їх широкому впровадженню;

– бездротові системи зазвичай легше розширювати, модернізувати та адаптувати до зростаючих потреб.

Крім того, застосування бездротового методу у системах дистанційного управління дозволяє:

– знизити вартість обслуговування;

– покращити стійкість з'єднання;

– розширити межі доступності;

– зменшити вартість під час модернізації інфраструктури енергетичного об'єкту;

– привнести інноваційність та зменшити вплив на довкілля.

В ряді публікацій [3, 5, 6] доведено актуальність застосування бездротових технологій при передачі інформаційних потоків у системах дистанційного управління та моніторингу енергетичними об’єктами.

Починаючи з 2010 року широкого впровадження набули програмно-логічні контролери, які в своєму складі мали вбудовані Web-сервери, що надало можливості для більш гнучкого застосування систем віддаленого управління та моніторингу параметрів технологічних процесів.

На рис. 3 приведено концепцію трирівневої ієрархічної системи обміну інформацією, моніторингу параметрів від компанії Phoenix_Contact.

Запропонована ієрархічна система дозволяє запровадити не тільки бездротові технології типу WiFi і Bluetooth, а й дворівневе резервування, що значно підвищує надійність роботи запропонованої системи моніторингу та управління.

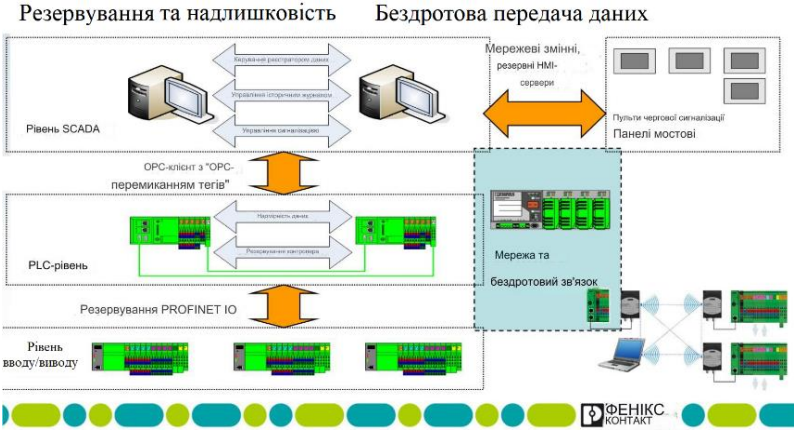


Рис. 3. Концепція суднової ієрархічної системи управління

Починаючи з 2020 року університет розпочав підготовку до впровадження отриманих результатів у навчальний процес навчально-наукового інституту інженерії. Особливий акцент було зроблено на навчальне машино-котельне відділення кафедри технічної експлуатації флоту, в якому використовується енергетичне обладнення в рамках дисципліни "Технічне обслуговування, діагностика та ремонт суднових технічних засобів".

В межах діагностики стану суднового аварійного дизель-генератора (АДГ) від компанії Kohler, модель 50EOZD з потужністю 50 кВт, який розташований в навчальному машино-котельному відділенні кафедри технічної експлуатації флоту були визначені умови застосування бездротової схеми дистанційного управління, яка була розроблена та інтегрована з системою автоматичного управління суднового АДГ без втручання в роботу штатної системи.

Розробка інформаційно моделі бездротової системи передачі інформаційного потоку аварійного дизель-генератора

Розробка бездротової системи передачі інформаційного потоку була втілена у формі структурної схеми (рис. 4). На схемі зображено систему віддаленого управління та моніторингу параметрів аварійного дизель-генератора, де: M – монітор; PC – персональний комп’ютер; PLC – програмно-логічний контролер; HMI – людино-машинний інтерфейс; SWiTCH – комутатор для розширення можливостей під’єднання додаткових пристроїв; WebCam – камера зовнішнього спостереження з можливістю двостороннього зв’язку; WiFi –

роутер; GSM/GPRS – контролер доступу до мобільного інтернету; RS485 – локальна мережа університету.

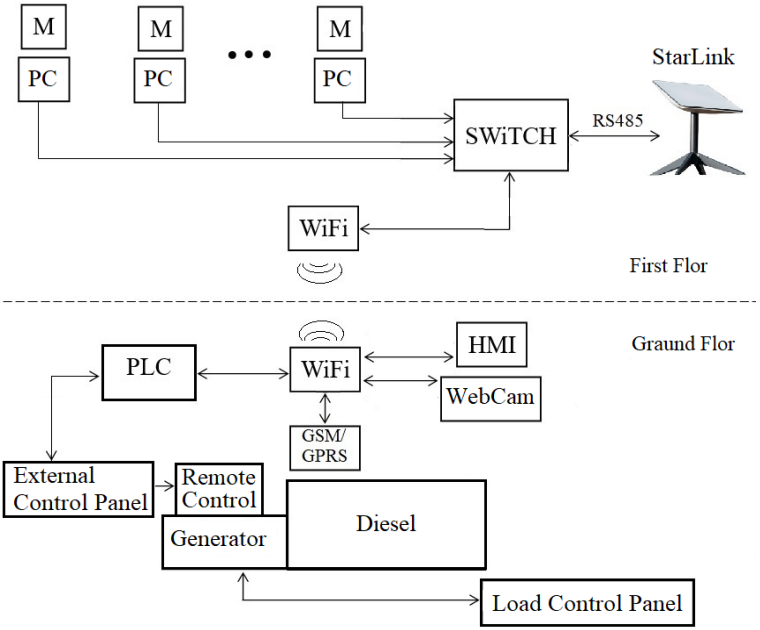
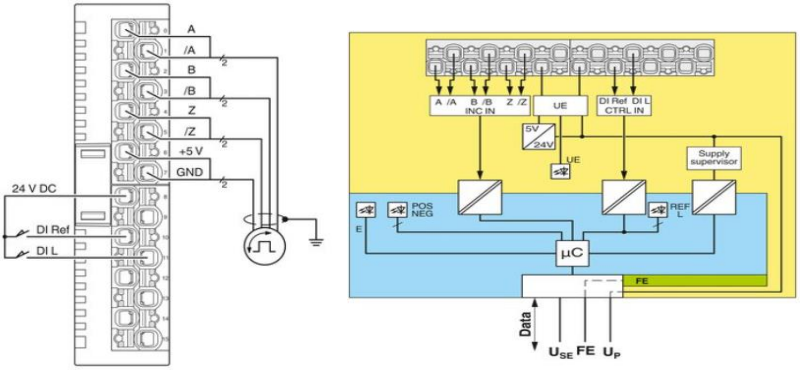


Рис. 4. Інформаційна модель бездротової системи передачі інформаційного потоку контролю параметрів аварійного дизель-генератора [5]

Такий підхід дозволяє чітко відобразити компоненти та взаємозв’язки системи, що полегшує сприйняття її функцій та структури.

Для забезпечення зв'язку між приміщеннями першим та другим поверхом була обрана технологія WiFi-мосту. Зокрема, встановлено бездротовий зв'язок, що дозволяє передавати дані безпосередньо між системою управління АДГ та комп’ютерним класом, забезпечуючи зручний та ефективний обмін інформацією.

Для додаткової можливості відображення кількості обертів колінчастого валу був використаний датчик обертів на базі геркону, який був встановлений на шків колінчастого валу. Але таке рішення не дозволяло визначати кут повороту валу. Тому на відміну від обладнання, яке запропоновано в роботі [6], контролер PLCnext Control AXC F 2152 було додатково облаштовано модулем визначення положення інкрементальніх енкодерів AXL SE INC1 SYM (Item number 1088130).



а) *б*)

Рис. 5. Модуль визначення положення інкрементальніх енкодерів AXL SE INC1 SYM:

а – приклад підключення; *б* – схема внутрішніх з’єднань

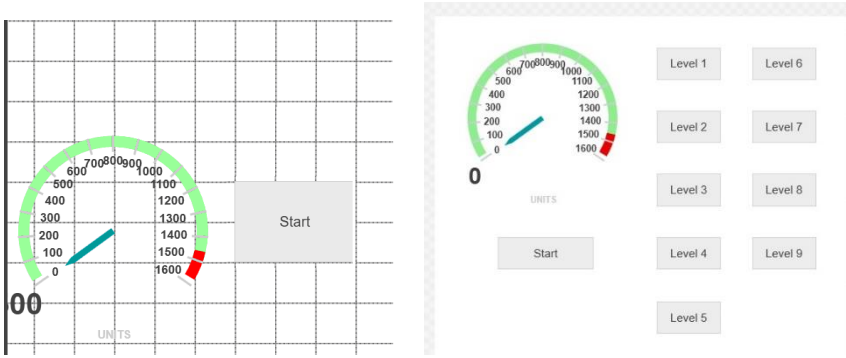
При виборі программного забезпечення знов було використано програмне забезпечення PLCNEXT ENGINEER [4], яке надає можливості створювати, конфігурувати та налаштовувати функціональні блоки та зв'язки між ними, спрощуючи процес програмування та інтеграції всіх компонентів системи, що дає змогу швидкої модернізації апаратної частини.

Крім того, PLCNEXT ENGINEER надає можливості одночасного налаштування як програмно-логічної частини, так і Web-серверу.

В той же час для програмування контролерів минулого покоління необхідно було два різних інструментарія.

Слід зазначити, що є можливість застосування програмного середовища CoDeSys, але його функціональність та надлишковість дуже прискиплива до ресурсів персонального комп’ютера, на яке встановлюється. Це є не дуже сприятливим для суднових умов, коли операційна система залишається незмінною на протязі всього життєвого циклу судна.

На рис. 6, *а* запропоновано фрагмент розробки інтерфейсу управління запуском АДГ і відображення кількості обертів колінчастого валу. Навідміну від інтерфейсу, який наведено в роботі [6] відсутня кнопка останову АДГ, так, як у разі використання під’єднання то штатного пульту дистанційного управління останов дизельгенератора здійснюється автоматично через 5 хв після зняття навантаження.



а) *б*)

Рис. 6. Інтерфейс проекту в програмному середовищі PLCNEXT ENGINEER:
а – з можливістю запуска та моніторигу обертів; *б* – з додатковою функцією керування навантаженням [5]

На рис. 6, б відображено докладний фрагмент інтерфейсу, який використовується для керування режимом роботи каналу управління. Ця віконна форма надає можливість здійснювати запуск АДГ натисканням кнопки Start. Окрім того, на цьому інтерфейсі відображаються показники обертів колінчастого валу АДГ. Кнопки Level 1,…, Level 9 відповідають за під'єднання електричного. Останов генератора здійснюється автоматично через 5 хвилин після зняття навантаження.

Додатково зону розташування АДГ було оздоблено веб-камерою, за допомогою якої можна здійснювати моніторинг обстановки навколо аварійного дизель-генератора. Нами використовувалось программне забезпечення DMSS App [0] так, як є версія для мобільного пристрою та версія для персонального комп'ютера.

На рис. 7 відображено зовнішній вигляд модернізованої системи віддаленого управління аварійним дизель-генератором, де: 1 – ПЕОМ; 2 – монітор; 3 – роутер; 4 – дротовий пульт дистанційного управління; 5 – пульт управління навантаженням генератора; 6 – система управління та моніторингу параметрів, яка базується на програмованому контролері AXC F 2152 Контролер PLC Next, 7 – веб-камера.

Рис. 7. Зовнішній вигляд системи моніторингу та управління

Експериментальне дослідження розробленої системи бездротового доступу до управління АДГ і моніторингу його параметрів довело спроможність застосування такого підходу. Тому нами пропонується впровадження застосування бездротових технологій для системи моніторингу параметрів суднового дизеля MAN-B&W типу ME.

Нами пропонується показано вдосконалена система дистанційного моніторигу параметрів суднового дизеля (рис. 8), яка дозволяє проводити модернізацію системи управління та моніторингу параметрів в короткі терміни.

Таким чином, проведенмодернізація АДГ довела технічну можливість віддаленого управління з одночасним відображенням на мобільних пристроях і персональних комп'ютерах необхідних параметрів.

Зпропонована структурна схема дозволяє використовувати модернізовану систему управління АДГ до четвертого рівня автоматизації.

Застосоване апаратне забезпечення надає можливості розширення функціоналу на перспективу в залежності від зміни задач, які необхідно буде вирішувати в майбутньому.

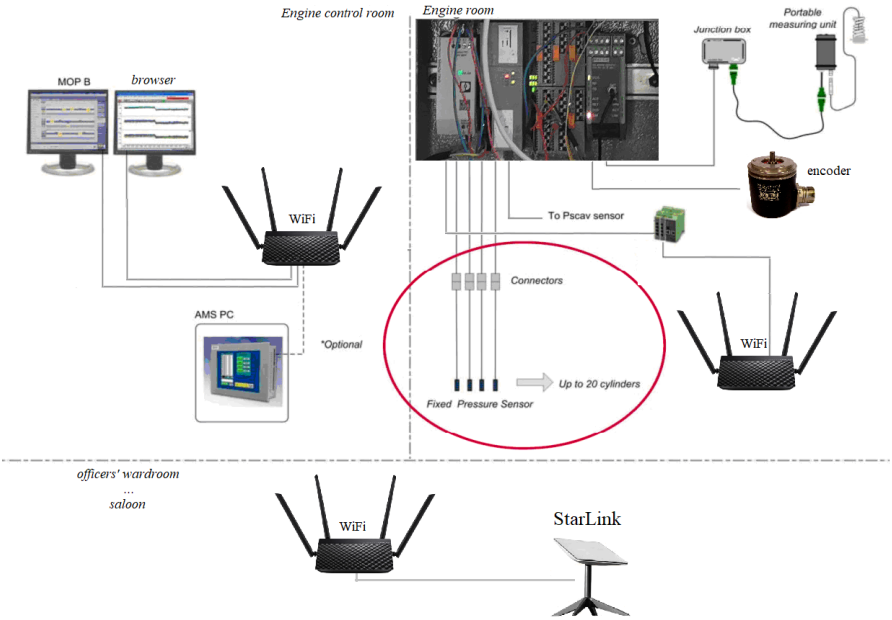


Рис. 8. Вдосконалена система дистанційного моніторингу параметрів суднового дизеля

Завдяки обладненню компанії Фенікс Контакт (Німеччина) забезпечується висока надійність системи бездротового управління та завадостійкість.

Запроваджене програмне забезпечення спрощує процес вдосконалення та модернізації системи моніторингу параметрів суднового дизеля.

Перелік використаних джерел

1. DMSS HD - Apps on Google Play [Internet]. Available from: URL: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mm.android.DMSSHD &hl=en_US (Date: 20/08/2023).

2. MAN B&W PMI Introduction. MAN ME-C ENGINE OPERATION COURSE. – Копенгаген: MAN Diesel & Turbo, 2015. 31 p.

3. Diploma Thesis by KONSTANTINA BERDEMPE Electronic Marine Diesel Engine operating data management An approach to components' failures forecasting, 2020 [Internet]. Available from: URL: https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/51558/%CE

%94%CE%99%CE%A0%CE%9B%CE%A9%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97%20%CE%9C%CE%A0%CE%95%CE%A1%CE%94%CE%95%CE%9C%CE%A0%CE%95.pdf?sequence=1. (Date: 02/12/2023).

4. Programming software - PLCNEXT ENGINEER [Internet]. Available from: URL: https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/programming-software-plcnext-engineer-1046008 (Date: 20/08/2023).

5. Vitalii Nikolskyi, Mykola Slobodianiuk, Maksym Levinskyi, Mark Nikolskyi Wireless Remote Control Systems Of Marine Diesel Engine, Helsinki, 12 p. (in print).

6. 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.

7. Миюсов М. В. Электронные системы управления главными судовыми двигателями: учебное пособие / М. В. Миюсов, В. И. Ланчуковский, Е. М. Оженко. – Одесса: ОНМА, 2013. – 98 с.

8. Робочий цикл корабельних дизелів та його індикаторні та ефективні показники: навчальний посібник / М.Г. Єрмошкін, Ю.В. Заблоцький, С.В. Сагін. – Одеса: НУ «ОМА», 2019. – 116 с.

9. Система моніторінгу завантаження контейнеровоза: звіт з НДР: ДР № 0117 U 000317 / кер. роботи В.В. Нікольський, виконавець Ю.О Накул. К.: УКРНТЕІ, 2018 – 79 с.

10. Сучасні суднові дизелі: особливості конструкції, експлуатації та автоматизованого управління / І. І. Черниш, С. А. Кар’янський, Є. М. Оженко. – Одеса : НУ «ОМА», 2019. – 217 с.

10.31653/smf47.2023.108-121

Сагін С.С.

Національний університет «Одеська морська академія»

ВДОСКОНАЛЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОВОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ ПІД ЧАС ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ МОРСЬКИХ СУДЕН

Постановка проблеми в загальному вигляді. Забезпечення повноцінної працездатності суднового пропульсивного комплексу та контроль безпеки судноплавства є найбільш актуальною проблемою, яка виникає під час експлуатації суден морського транспорту [1, 2]. Розглянути проблем, що виникають при експлуатації суднового пропульсивного комплексу, яка є однією з важливих складових елементів управління рухом судна для своєчасного попередження зіткнення суден в ситуації їх надмірного зближення. В ситуації небезпечного зближення пари чи групи суден їх взаємодія регламентується відповідно до вимог Міжнародних правил запобігання зіткнення суден у морі (МПЗЗС-72), в яких використовується принцип бінарної координації [3, 4].

Через велику кількість різноманітних ситуацій у взаємних розташуваннях суден під час їх розходження, виникають певні труднощі в коректності дій, що приймаються для забезпечення безпеки судноплавства [5, 6]. Тому питання розробки методів управління рухом судна у частині маневрування суден під час розходження, а також вдосконалення взаємодії навігаційного офіцера з судновим прорульсивним комплексом та можливість підвищити та мати можливість повністю використовувати резерви головного двигуна, які дадуть нам змогу підвищити енергетичну ефективність суднового пропульсивного комплексу в цілому. При розробці або модернізації систем управління пропульсивним комплексом при русі судна необхідно враховувати дію зовнішніх чинників невизначеного характеру, що впливають на техніко-експлуатаційні та на маневрові характеристики судна. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження є актуальним та перспективним науковим напрямом яке впливає на безпеку судноплавства [7, 8]. При цьому кожна ситуація, що пов’язана з розходженням морських суден, має окремо рішення та повинна обов’язково відповідати правилам МПЗЗС-72. Процес розходження

передбачає зміну ситуації небезпечного зближення на допустиму безпечну ситуацію за допомогою маневру розходження. Незважаючи на систематичне розглядання та аналізування цього питання, випадків зіткнення суден з кожним роком не зменшується, а навпаки тільки збільшується, що приводить до виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з неймовірними фінансовими витратами [9, 10], тимчасовим припиненням судноплавства в окремих районах [11, 12], забрудненням довкілля [13, 14] та втратами вантажу [15, 16]. Тому для процесу розходження важливою характеристикою є управління ситуацією зближення, при якому визначається потенційна можливість зміни її маневром розходження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання безпеки судноплавства та попередження зіткнення суден морського транспорту досліджувалися та аналізувалися у багатьох наукових працях [17, 18]. Одним із способів попередження зіткнень суден є метод гнучких стратегій розходження, які передбачають формування стратегій розходження кількох суден [19] .

Формалізація взаємодії суден під час виникненні загрози зіткнення можлива шляхом складання аналітичного алгоритму розходження для існуючої ситуації [20]. Проте підмножина різних ситуацій надмірного зближення суден вимагає детального розгляду ситуацій відповідно до регламенту МПЗЗС-72. Одним з методів попередження зіткнення суден у морі є зміщення на лінію паралельну шляху їх руху [21], втім за умов інтенсивного судноплавства цей метод не завжди є ефективним.

Розв'язання завдання забезпечення безпеки під час розходження двох суден, або групи суден також досягається шляхом використання аналітичних виразів для розрахунку межі двовимірних областей неприпустимих параметрів руху суден елементарної групи [22], відповідно до яких на межі областей безпечного руху суден досягається рівність дистанції найкоротшого зближення та гранично допустимої дистанції, яка гарантує відсутність зіткнення.

З метою формування області неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден та визначення оптимальних швидкостей розходження, розроблено процедуру, яка полягає в оптимізації швидкісних параметрів судна з урахуванням обставин існуючої ситуації. За її допомогою здійснюється визначення безпечної швидкості суден на різних курсах маневрування як у відкритих водах також і в обмежених умовах [23]. Дослідження перспективних автономних судових

систем для ухилення від зіткнення та її теоретичне обґрунтування з урахуванням факторів, що до повної автономної навігації, поки ще розглядається у тестових випадках.

Існує метод формування області допустимих комбінованих маневрів [24], в який небезпечну ситуацію розходження судна з двома іншими суднами вирішують шляхом зміни курсу та використання пасивного гальмування. За його допомогою в кожній точці небезпечної області маневрування визначають три параметри маневру розходження: час та курс ухилення для розходження з першим судном, а також швидкість, до якої знижується початкова швидкість під час гальмування судна.

Для надання можливості розробки індивідуального методу управління рухом судна та деталізації отриманої інформації, є необхідність врахування інерційності судна під час розрахунку параметрів його стратегії розходження зі зміною курсу [19]. В цьому випадку можливість виявити ситуацію небезпечного зближення базується на визначенні методу оцінки ризику зіткнення з використанням режиму істинного руху [25]. За цього вводяться лінія прогнозованого зіткнення та зона перешкод, ці значення пов'язані з істинним рухом та дають змогу забезпечити безпечне плавання у стиснутих водах, але при цьому необхідно постійно враховувати зміну курсу та швидкості суден.

Різноманіття методів, що сприяють підвищенню безпеки судноплавства під час розходження судна, не вирішують питання розробки методів управління рухом судна та оцінки навігаційних ризиків для навігаційного переходу судна в складних умовах плавання. Однієї з таких умов є ситуація надмірного зближення, яка поділяється на додаткові підмножини, що виникають під час обгону (відносно варіантів судно, що обганяє, та судно, що обганяється; а також судно, що обганяється, та судно, що обганяє), зближення суден на зустрічних курсах, зближення суден на курсах, що перетинаються.

Постановка завдання. Ціллю статті є аналіз взаємодії елементів суднового пропульсивного комплексу та її вдосконалення під час ситуацій надмірного зближення суден яка наддасть можливість розробити методи контролю та управління рухом морських суден, у частині маневрування суден для розходження за умовою хорошої видимості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Пропульсивна установка є гідромеханічною системою, що включає корпус судна і про-

пульсивну установку, в якій енергія робочого тіла перетворюється в упор, що впливає на рух корпусу судна. Елементи пропульсивного комплексу характеризуються під час експлуатації такими основними показниками:

1) головний двигун – потужністю, крутним моментом та частотою обертання;

2) передача – частотою обертання ведучого (від головного двигуна) та відомого (гребного) валу;

3) гребний гвинт – упором гвинта, що обертає та частотою обертання;

4) корпус судна – швидкістю судна, повним опором води і повітря руху судна.

Незалежно від будь якої ситуації, кожне судно повинно рухатися з безпечною швидкість (з урахуванням усіх рекомендованих обставин згідно с правилом 6, МПЗЗС-72) та враховувати усі сили і моменти своєї суднової пропульсивної установки.

З метою узгодження маневрів розходження двох суден та у МПЗЗС-72 передбачено логічну систему, яка враховує стан видимості. У разі хорошої видимості взаємні обов'язки пари суден поділені залежно від їх статусу (до яких відносяться судна з механічним двигуном, вітрильні судна, рибальські судна, судна, скути своєю осадкою, судна, скути в можливості маневрувати, судна що не можуть управлятися) та характеристик ситуації зближення. Під час зниження видимості МПЗЗС-72 не передбачає взаємних обов'язків суден – регламентуються дії лише судна, що оперує.

Судно при своєму русі виводить маси води зі стану спокою і сприймає реакцію в вигляді гідродинамічних сил, розподілених по зовнішній поверхні його обшивки. Оскільки в більшості випадків, судно симетрично щодо його діаметральної площині, то дія гідродинамічних сил реакції води може бути зведене до однієї рівнодіючої силі F, що лежить в діаметральної площині, і моменту M, діючим в тій же площині (рис. 1). Горизонтальна складова R сили F є силою опору середовища – води та повітря; вона врівноважується корисної тягою рушія P_e.

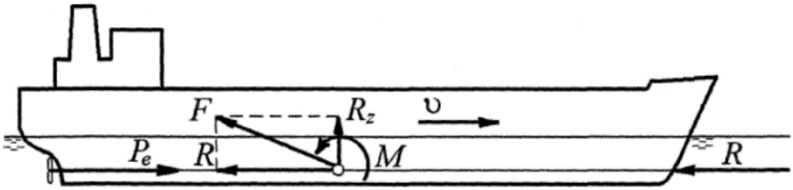


Рис. 1. Сили і моменти, які діють на судно під час прямолінійного руху

Розглянемо вимоги МПЗЗС-72 для хорошої видимості. Насамперед зазначимо, що в цьому випадку вимоги полягають у необхідності маневрування кожним із суден для запобігання зіткненню. Іноді вказується необхідна сторона ухилення судна під час маневру. Тому з погляду формалізації вимог МПЗЗС-72 для хорошої видимості доцільно розглянути для кожного судна характеристику необхідності маневрування Man_1 та Man_2, а також характеристику необхідної сторони ухилення судна Trn_1 та Trn_2.

Очевидно, що характеристики Man_1 та Man_2 можуть набувати лише двох значень, а саме: 1 – за необхідністю маневрування та 0 – в разі необхідності зберігати свої параметри руху. Характеристики Trn_1 та Trn_2 мають три значення, а саме 1 – дозволено ухилення вправо, 2 – дозволено ухилення вліво та 3 – дозволено ухилення в обидві сторони (вправо та вліво).

Характеристики Man_1, Man_2, Trn_1 та Trn_2, що відображають вимог МПЗЗС-72 для хорошої видимості, є виходом формальної системи МПЗЗС-72, яку позначимо F. Таким чином, вихід Y формальної системи МППЗЗ-72 можна представити у вигляді

$$Y = \{Man_1, Man_2, Trn_1, Trn_2\}.$$

Аналізуючи МПЗЗС-72, робимо висновок, що входом X системи F є ситуація небезпечного зближення суден S_d, яка визначається пеленгом α та дистанцією D між суднами, їх параметрами руху (швидкостями та курсами першого V_1, K_1 та другого V_2, K_2) та статусами r_1, r_2. Тому можна записати $Y=F(X)$, де система F є відображенням безлічі ситуацій небезпечного зближення суден у безліч характеристик вимог МПРЗЗС-72, тобто:

$$\{Man_1, Man_2, Trn_1, Trn_2\} = F(D, \alpha, V_1, V_2, K_1, K_2, r_1, r_2),$$

Безліч всіх можливих ситуацій S, що залежать від перерахованих параметрів, позначимо через Mn. Оскільки ситуація небезпечного зближення суден S_d можлива лише за її зближенні, то з множини Mn слід виділити підмножину Mn_1 ситуацій зближення – $Mn_1 \subset Mn$. Очевидно, підмножина Mn_1 містить підмножину Mn_2 ситуацій небезпечного зближення S_d – $Mn_2 \subset Mn_1$, для яких характерно, що прогнозована дистанція найкоротшого зближення менша $D_{\min}$ від граничнодопустимої дистанції зближення D_d.

Ситуації S_d, як елементи підмножини Mn_2, повинні задовольняти умову зближення U_1 та умови U_2 того, що зближення є небезпечним. Умова зближення U_1 залежить від зменшенні дистанції D між суднами, тобто $D \to 0$, а умові U_2 відповідає нерівність $D_{\min} < D_d$.

Отримане за допомогою виконання умов U_1 та U_2 підмножина ситуацій небезпечного зближення містить різні ситуації, що відповідають різним правилам МПЗЗС-72. Насамперед підмножина Mn_2 містить підмножину ситуацій обгону Mn_{ob}, у яких немає істотний статус суден. У цій ситуації судно може бути таким, що обганяється або таким, що обганяє. Тому підмножина ситуацій обгону Mn_{ob} є об'єднанням підмножини ситуацій Mn_{ob}^1, коли судно є таким, що обганяє, та підмножини ситуацій Mn_{ob}^2, коли судно є таким, що обганяється, тобто.

$$Mn_{ob} = Mn_{ob}^1 \bigcup Mn_{ob}^2.$$

Відповідно до МППСС-72, судном, яке обганяє у ситуації небезпечного зближення називається судно, що знаходиться у секторі видимості кормового вогню судна з яким зближується, тобто на 22,5° ($2\pi/16$ або 2 румба) позаду траверза.

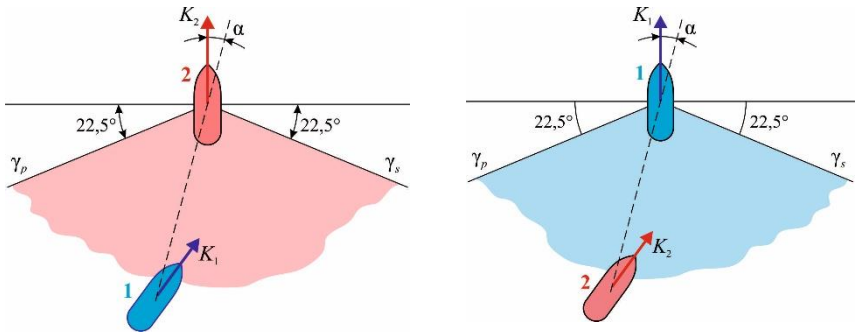
У ситуація обгону, особливо в ситуаціях обгону на короткій відстані один від одного, дуже важливо тримати свої двигуни в постійній готовності до маневрування зменшення швидкості або до негайного реверсування.

Своєчасне інформування вахти машинного відділення щодо наближення до таких ситуацій, надасть впевненість в управлінні судна при скоєнні обгону іншого судна.

Знайдемо умову U_3, яка визначає ситуацію обгону. Для цього необхідно знати курс судна, що обганяє K_1, курс судна, що обганяється K_2 та пеленг із судна, що обганяє на судна, що обганяється α.

В ситуації, яка наведена на рис. 2, *а*, судно 1, є таким, що обганяє. Така ситуація має місце, коли зворотний пеленг α+π укладено між напрямками γ_s і γ_p, що визначають межі видимості кормового вогню, причому

$$\gamma_s = K_2 + \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right), \quad \gamma_p = K_2 + \pi + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right).$$



а) *б*)

Рис. 2. Ситуації обгону:
а – 1 – судно, що обганяє, 2 – судно, що обганяється;
б – 1 – судно, що обганяється, 2 – судно, що обганяє

Аналітично ця ситуація виникає, коли одночасно виконуються умови

$$\sin(\alpha + \pi - \gamma_s) > 0 \text{ та } \sin(\gamma_p - \alpha - \pi) > 0.$$

Якщо в останні нерівності підставити вирази для γ_s і γ_p, то отримаємо умову U_3 для підмножини ситуацій обгону Mn_{ob}^1, якщо судно 1 обганяє судно 2

$$\sin\left(\alpha - K_2 + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right)\right) > 0, \text{ та } \sin\left(K_2 + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right) - \alpha\right) > 0.$$

На рис. 2, *б* показана ситуація, коли судно 1 є таким, що обганяється судном 2. У цьому випадку пеленг α знаходиться між напрямками γ_s і γ_p, та

$$\gamma_s = K_1 + \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right), \quad \gamma_p = K_1 + \pi + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right)$$

Умовою виникнення такої ситуації є справедливість нерівностей

$$\sin(\alpha - \gamma_s) > 0 \text{ та } \sin(\gamma_p - \alpha) > 0.$$

Таким чином, умова U_3 для підмножини ситуацій обгону Mn_{ob}^2, якщо судно є таким, що обганяється:

$$\sin\left(\alpha - K_1 - \left(\pi - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right)\right)\right) > 0 \text{ та } \sin\left(K_1 + \left(\pi + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right)\right) - \alpha\right) > 0.$$

Всі інші ситуації небезпечного зближення, крім ситуацій обгону, враховують статуси суден, що зближаються, r_1 і r_2, причому вони складають підмножину Mn_r. Вочевидь, що

$$Mn_r = Mn_2 / Mn_{ob}.$$

Для встановлення відносини пріоритету в МПЗЗС-72 всі судна поділяються на шість рівнів, упорядкованих послідовності пріоритету: судна з механічним двигуном, вітрильні судна, рибальські судна, судна, скути своєю осадкою, судна, скути в можливості маневрувати, судна що не можуть управлятися.

Якщо судна належать одному рівню, то призначення пріоритетів передбачено лише для рівнів: суден з механічним двигуном і вітрильних суден (правила 12, 14 та 15 МПЗЗС-72), причому тільки в цьому випадку є вимоги та рекомендації щодо вибору сторони ухилення під час розходження.

Тому підмножина ситуацій Mn_r складається з трьох підмножин: Mn_r^d – судна з різними статусами, Mn_r^1 – судна з механічним двигуном та Mn_r^2 – вітрильні судна. Умова U_4 належності ситуації небезпечного зближення підмножині Mn_r^d виражається співвідношенням $r_1 \neq r_2$, умова U_5 визначає підмножину Mn_r^1 ситуацій небезпечного зближення суден із механічним двигуном і характеризується співвідношенням $r_1 = r_2 = 1$. Підмножина Mn_r^2 небезпечного зближення двох вітрильних суден не розглядатимемо, вважаючи, що транспортне судно не є вітрильним.

Розглянемо підмножину Mn_r^1 ситуацій небезпечного зближення суден з механічним двигуном, які характеризуються правилами 14 і 15 МПЗЗС-72, тобто зближення суден на протилежних зустрічних і курсах, що перетинаються.

Очевидно, підмножина Mn_r^1 містить підмножини Mn_{op} ситуацій зближення суден на протилежних зустрічних курсах і Mn_{cr} ситуацій зближення суден на курсах, що перетинаються, тобто $Mn_{op} \subset Mn_r^1$ та $Mn_{cr} \subset Mn_r^1$.

Визначимо умову U_6 належності ситуації небезпечного зближення підмножини Mn_{op}, скориставшись схемою, що наведена на рис. 3. Зустрічними протилежними курсами суден, що зближуються, вважатимемо такі, які відрізняються не більше 5° від пеленгу, причому це справедливо для обох суден. Як випливає з рис. 3, для цього слід, щоб одночасно виконувались нерівності:

$$(\alpha_1 - K_1) \le 5° \text{ та } (\alpha_2 + \pi - K_2) \le 5°$$

де α_1, α_2 – пеленг з одного судна на інше.

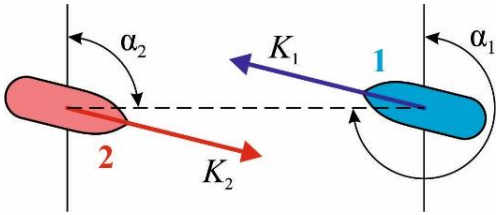


Рис. 3. Ситуація зближення суден на зустрічних курсах

Ця умова має такий математичний вираз:

$$\cos(\alpha_1 - K_1) \le \cos 5° \text{ та } \cos(\alpha_2 + \pi - K_2) \le \cos 5°$$

що і є умовою U_6.

Умова U_7 належності ситуації небезпечного зближення підмножині Mn_{cr}, представлена на рис. 4.

У ситуації зближення суден, що рухаються на курсах, яки перетинаються, їх курсові кути γ_1 і γ_2 мають протилежні знаки, тобто

$$\sin\gamma_1 \sin\gamma_2 < 0.$$

З врахуванням, що

$$\gamma_1 = \alpha_1 - K_1,\ \gamma_2 = K_2 - \alpha_2$$

умова U_7 характеризуватиметься такою нерівністю

$$\sin(\alpha_1 - K_1)\cdot\sin(K_2 - \alpha_2) < 0\,.$$

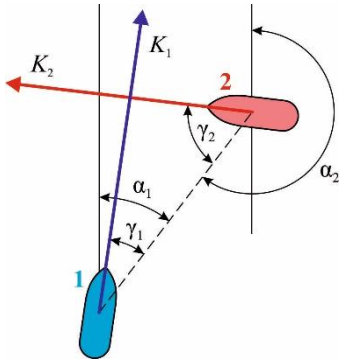


Рис. 4. Ситуація небезпечного зближення суден на курсах, що перетинаються

При цьому судно 2 знаходиться праворуч або ліворуч від напрямку руху судна 1, тому підмножина Mn_{cr} містить підмножину ситуацій Mn_{crs}, коли судно 2 знаходиться праворуч від судна 1 і підмножину Mn_{crp}, коли судно 2 рухається зліва від судна 1. Очевидно, якщо виконується нерівність $\sin(\alpha_1–K_1)>0$. то судно 2 знаходиться праворуч від судна 1. У протилежному випадку судно 2 знаходиться ліворуч від судна 1. Отже, умова U_8 належності ситуації небезпечного зближення S_d підмножин Mn_{crs} або Mn_{crp} визначається знаком виразу $\sin(\alpha_1–K_1)$. Причому, якщо $\sin(\alpha_1–K_1)>0$, то $S_d\in Mn_{crs}$, у разі коли $\sin(\alpha_1–K_1)<0$ має місце $S_d\in Mn_{crp}$.

У цих випадках не рідко трапляється ситуація, що судно, яке має поступитися дорогою іншому судно, не може виконати свої дії через несправність судових двигунів. У таких випадках судно, якому повинні були поступитися дорогою, переходить під регламент правила 17 МПЗЗС-72, і вживає всіх можливих дій для уникнення зіткнення. Саме в таких випадках, як зазвичай, задіється весь потенціал суднового пропульсивного комплексу та його можливість маневрувати в екстрених випадках.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Аналіз поданих даних підкреслює важливість підтримки суднової пропульсивного комплексу в належному вигляді. Забезпечення побудови судна з вірним вибором потужності головного двигуна,

повинно бути враховано з можливістю експлуатаційного відхилення потужності які неминучі в процесі експлуатації. Вочевидь що номінальний режим, який встановлюється заводом-виробником без строго обумовлених граничних значень режимних показників, не може бути використаний в якості порівняльного зразка або вихідного рівня для зіставлення ефективності, економічності і напруженості різних двигунів.

2. Розглянуті основні підмножини ситуацій небезпечного зближення, якими є ситуація обгону (відносно варіантів судно, що обганяє, та судно, що обганяється; а також судно, що обганяється, та судно, що обганяє), ситуація зближення суден на зустрічних курсах, ситуація зближення суден на курсах, що перетинаються, змушують до розробки методу з визначення послідовності дій, пов'язаних з маневруванням суден з метою попередження їх зіткнення. При цьому алгоритм цих дій повинен відповідати вимогам Міжнародних правил запобігання зіткнення суден у морі щодо маневрування суден під час розходження.

3. Досліджено моделювання ситуацій надмірного зближення суден та розглянута формалізація МПЗЗС-72 у частині маневрування суден для розходження за умов гарної видимості.

4. Розробленні аналітичні вирази для умов реалізації ситуації надмірного зближення для кожної з підмножин, які сприяють створенню методу управління рухом судна в різних ситуаціях небезпечного зближення з судами.

5. Запропонований метод управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження з урахуванням експлуатаційних можливостей суднового пропульсивного комплексу.

Запропоновані рішення сприяють створенню методу управління рухом суден під час виникнення різних ситуаціях їх небезпечного зближення.

Перелік використаних джерел

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

2. Бажак О.В. Удосконалення методу оцінки показників надійності обладнання засобів водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 148-159. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.17.

3. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунов В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.

4. Майданевич С.Б., Тимощук О.М. Суб'єкти та принципи міжнародного морського права // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 39-47. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.05.

5. Тимощук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т. А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.

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

7. Голіков В.А., Голіков В.В., Онищенко О.А. Використання технологій методології науки у дослідженнях морського та внутрішнього водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 5-14. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.01.

8. 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.

9. 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.

10. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of mari-

time transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33-42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.

11. 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.

12. 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 Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

13. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2019. – Vol. 66(1). – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.

14. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2018. – Vol. 65(2). – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.

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

16. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.

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

18. Тимощук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.

19. Тимощук О.М., Мельник О.В. Аналіз можливості використання маневру розходження зміною курсу // Водний транспорт. Збір-

ник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 96-102. doi.org/ 10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.

20. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // Transactions on Maritime Science. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01.

21. Бурмака А.И., Калюжний В.В. Имитационное моделирование процесса расхождения судов экстренным уклонением при чрезмерном сближении // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2019. – Вип. 29. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 37-46. DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.37-46.

22. Бурмака И.А., Янчецкий А.В. Оценка вероятности степени опасности сближения судов // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 30. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 27-33. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.27-33.

23. Ворохобин И.И. Зависимость вероятности безопасного прохождения судном стесненного района от закона распределения погрешности смещения // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 30. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 58-66. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.

24. Ворохобін І.І., Бурмака І.О., Кулаков М.О., Петриченко О.О. Спосіб департменізації електронної карти при зовнішньому управлінні розходження суден в зоні відповідальності СУРС // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 32. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 26-33. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.

25. Бурмака И.А., Ворохобин И.И., Федоров Д.Б. Учет динамики судов при автоматическом выборе маневра расхождения уклонением одного судна и пассивным торможением другого // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 31. –С. 80-88. DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.

10.31653/smf47.2023.122-130

Сагін С.В.[1], Суворов П.С.[2], Бондар С.А.[3]

[1] Національний університет «Одеська морська академія»,
[2] Дунайська комісія, м. Будапешт, Угорщина, головний інженер
[3] Морехідний фаховий коледж ім. О.І. Маринеска Національного університету «Одеська морська академія»

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙНИХ ПОДІЙ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДИЗЕЛІВ МОРСЬКИХ СУДЕН

Постановка проблеми в загальному вигляді. Одним з документів, що розроблено та прийнято Міжнародною морською організацією (International Maritime Organization – IMO), є Міжнародний кодекс з управління безпечною експлуатацією суден і запобіганням забруднення (International Safety Management Code – ISM Code), якій спрямовано на забезпечення безпеки на морі, запобігання нещасним випадкам або загибелі людей та уникнення заподіяння шкоди навколишньому природному середовищу, зокрема морському середовищу і майну. Один з розділів ISM Code «Технічне обслуговування та ремонт судна і обладнання» вимагає постійного контролю стану енергетичного обладнання машинних відділень суден та оцінки рівня його безпеки. Виконання цього завдання визначається як переважним під час експлуатації суднових пропульсивних комплексів та поширюється на всі без винятку судна морського та внутрішнього водного транспорту. Її важливість додатково підтверджується введенням з боку IMO єдиного методу формалізованої оцінки безпеки (Formal Safety Assessment – FSA), який застосовує методи оцінки ризику, при цьому величина ризику визначається добутком вірогідності події, що порушує функціонування механізму, на її наслідок [1-3].

Інструмент FSA засновано на завчасних діях та уявляє з себе структурований метод, що дозволяє визначити потенційно небезпечні ситуації заздалегідь, до виникнення аварій з тим, щоб після цього оцінити величину ризику, провести оцінку витрат, що пов’язані з використанням можливих варіантів управління ризиками та на підставі системного аналізу прийняти обґрунтовані рішення з зниження величини ризику [4-6].

Постановка завдання. Завдання дослідження була розробка методу, що дозволяє визначити вірогідність виникнення ризику елеме-

нтів суднового дизелю з підвищеним терміном експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пропульсивні комплекси морських суден поєднають між собою головний двигун, гребний гвинт та корпус судна, тому відмова або виникнення ризику в однієї з цих складових призводить до аварійного режиму експлуатації всього судна, що становить небезпеку як під час стоянки судна в порту, також під час виконання їм навігаційного переходу [7, 8].

Оцінка технічного стану будь яких енергетичних об'єктів, що входять до пропульсивного комплексу суден морського та внутрішнього водного транспорту є актуальним завданням в зв'язку з тим, що за її допомогою забезпечується прогнозування надійності роботи судна, головних двигунів та допоміжних установок [9-11]. Оцінка технічного стану суднових дизелів (головних та допоміжних) виконуються шляхом безпосереднього спостереження за їх роботою та контролю їх основних експлуатаційних показників, а також за допомогою аналізу статистичних даних з їх попередньої експлуатації [12-14]. При цьому визначаються показники безвідмовності за гарантований час експлуатації, довговічності в умовах підвищених теплових та динамічних навантажень, ремонтопридатності за умов експлуатації судна, збереження на протязі всієї експлуатації [15-17].

Під час експлуатації пропульсивних комплексів з напрацюванням, що наближається до нормативного терміну, тобто з малим остаточним ресурсом, особливе значення набуває якість технічної експлуатації. При цьому переважне значення набуває метод технічного обслуговування, який судновласник має намір застосувати на судне до моменту його списання (час до якого може досягати десяти років), що дозволить забезпечити на період експлуатації, що залишився, скорочення простоїв, безпеку роботи, а також дозволить спрогнозувати витрати на технічне обслуговування та ремонт [18, 19].

Критерії оцінки виникнення аварійних події ґрунтуються на суворо встановлених рівнях ризику. Якщо ризик знаходиться у прийнятній зоні, то немає потреби вживати якихось дії для зменшення ступеню ризику, а саме мінімізувати фактори ризику та їх наслідки (технічні або економі нічні). Ідентифікація ризиків виконується виходячи з аналізу небезпек, пов'язаних з потоком відмов механізмів в зазначений період експлуатації.

Виклад основного матеріалу. На базі обробки статистичних даних звітів департаменту технічної експлуатації однієї з судноплавних компаній було здійснено розрахунок параметрів потоку відмов за 15-

річний період експлуатації судна з циклом експлуатації кожні п'ять років. Як таке судно було обрано судно класу «річка-море» дедвейтом 6430 тонн з головним двигуном Wärtsilä 6R32BC.

Як основні елементи, відмови яких можуть привести до виникнення небезпечних або аварійних ситуацій були обрані наступні: форсунки, з'єднання та ущільнення, паливні насоси високого тиску, трубопроводи високого тиску, регулятор частоти обертання, розподільний вал, охолоджувач мастила, мотильові підшипники, охолоджувач повітря, системи підготовки палива, клапани системи розподілення газів, циліндрові кришки, поршні та поршневі кільця, циліндрові втулки, газотурбонагнетач, редуктор, рамові підшипники, упорний підшипник (далі в таблиці 1 та на рис. 1, 2 ці елементи позначені від 1 до 18) [20, 21].

Для кожного з вказаних елементів дизеля розраховувалось значення параметру потоку відмов

$$\omega_{\mathrm{i}}(t_i) = \frac{\sum n_i}{t_i} \cdot 100\%;$$

де $\omega_i(t_i)$ – параметр потоку відмов i-го елемента дизеля за час експлуатації в i-ому циклі;

Σn_i – кількість відмов та планових замін обраного елементу дизеля за час експлуатації в i-ому циклі;

t_i – тривалість експлуатації в i-ому циклі.

Величина загального параметра потоку відмов за весь експлуатаційний цикл $\omega_\Sigma(t_i)$, визначається за виразом

$$\omega_\Sigma(t_i) = \sum_1^i \left(\omega_i(t_i) \frac{\sqrt[i+1]{i}}{i^i} \right);$$

де i – цикл проведення вимірювань.

Тоді, для розглянутого періоду експлуатації та трьох циклів визначення $\omega_i(t_i)$ (що відповідають 1…5, 6…10, 11…15 рокам), отримаємо вираз

$$\omega_\Sigma(t_i) = \omega_1(t_i) + \omega_2(t_i)\frac{\sqrt[3]{2}}{2^2} + \omega_3(t_i)\frac{\sqrt[4]{3}}{3^3};$$

де $\omega_1(t_i)$, $\omega_2(t_i)$, $\omega_3(t_i)$ – параметр потоку відмов i-го елементу під час 1-го, 2-го та 3-го циклу експлуатації.

Результати розрахунків параметра потоку відмов наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Визначення параметру потоку відмов за різний експлуатаційний період роботи дизеля Wärtsilä 6R32BC в складі пропульсивного комплексу судна дедвейтом 6430 тонн

Елемент, що контролюється	Параметр потоку відмов, %, за різний експлуатаційний період			Параметр потоку відмов за весь період, %
	1…5 років	5…10 років	10…15 років	
1	0,074	0,083	0,096	0,105
2	0,058	0,072	0,079	0,089
3	0,037	0,043	0,052	0,068
4	0,026	0,031	0,036	0,041
5	0,021	0,024	0,028	0,031
6	0,015	0,016	0,019	0,021
7	0,013	0,014	0,017	0,018
8	0,030	0,033	0,039	0,041
9	0,010	0,010	0,012	0,014
10	0,007	0,008	0,008	0,010
11	0,008	0,009	0,011	0,011
12	0,014	0,016	0,018	0,021
13	0,013	0,015	0,017	0,019
14	0,009	0,009	0,012	0,014
15	0,004	0,004	0,004	0,005
16	0,007	0,007	0,008	0,009
17	0,002	0,002	0,002	0,003
18	0,018	0,019	0,021	0,025

На підставі даних, що наведені в таблиці 1, були побудовані номограми, які подані на рис. 1, а також були розраховані матриці ризику, за який приймалось розподілення вірогідності виникнення відмови елементів суднового дизелю [11, 13, 17]. При цьому градації вірогідності виникнення ризику R та градації витрат C на усунення наслідків відмов, що пов’язані з аварійними ситуаціями визначались відповідно до таблиці 2 в залежності від щільності вірогідності виникнення ризику

$$f = \frac{q(\delta t)}{N};$$

де $q(\delta t)$ – кількість відмов за проміжок часу δt в який елемент, що контролюється знаходився в експлуатації;

N – кількість всіх однотипних елементів, що входять до досліджуваної множини;

та вартості усунення наслідків відмов.

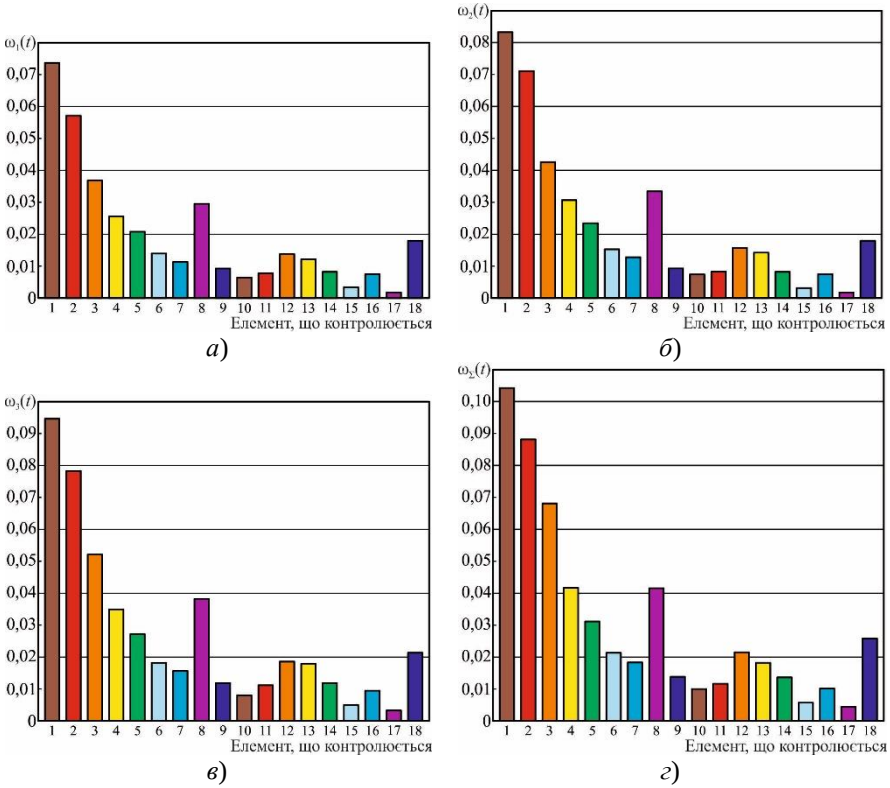


Рис. 1. Параметр потоку відмов $\omega_i(t)$ за різний експлуатаційний період роботи суднового дизеля Wärtsilä 6R32BC в складі пропульсивного комплексу судна дедвейтом 6430 тонн

В разі наявності масиву статистичних даних з виникнення відмов та розрахованих за цим масивом значень потоку відмов величина щільності вірогідності виникнення ризику може бути отримано за виразом

$$f = \omega(t) \cdot \delta t$$

в якому кожному часовому інтервалу δt відповідає конкретне значення потоку відмов $\omega(t)$. При цьому значення щільності вірогідності виникнення ризику визначається для різних експлуатаційних періодів роботи дизелі – 1…5 років, 5…10 років, 10…15 років

Матриці розподілення вірогідності виникнення ризику елементів суднового дизелю Wärtsilä 6R32BC за різний період експлуатації наведені на рис. 2.

Таблиця 2. Градації вірогідності виникнення ризику та витрат

Градація вірогідності виникнення ризику *R*	Щільність вірогідності виникнення ризику	Градації витрат *C*	Вартість усунення наслідків відмов, $USA
1	0,01…0,17	1	меньше 10000
2	0,17…0,33	2	10000…21000
3	0,33…0,5	3	21000…32000
4	0,5…0,67	4	32000…46000
5	0,67…0,83	5	46000…60000
6	0,83…1,0	6	більше 60000

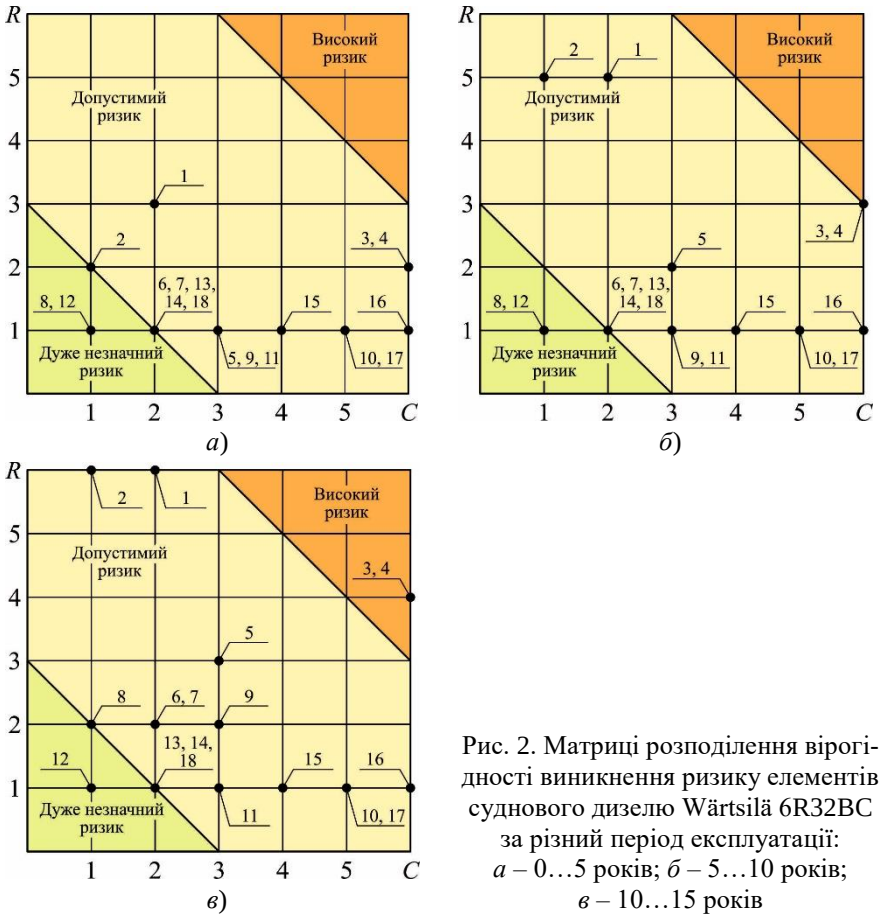


Рис. 2. Матриці розподілення вірогідності виникнення ризику елементів суднового дизелю Wärtsilä 6R32BC за різний період експлуатації: *а* – 0…5 років; *б* – 5…10 років; *в* – 10…15 років

Висновки і перспективи подальших досліджень. За результатами досліджень визначимо наступне.

1. Під час експлуатації суднових дизелів, як однієї зі складових суднового пропульсивного комплексу, спостерігається виникнення відмов в основних його елементах, які відносяться циліндрової групи, підшипників, систем подачі палива, постачання повітря та випуску газів. Інтенсивність цих відмов оцінюється потоком відмов, значення якого для суднового дизелю Wärtsilä 6R32BC за різний період експлуатації (0…5 років, 5…10 років, 10…15 років) знаходяться в межах 0,018…0,105, при цьому найбільша кількість відмов (та відповідно найбільший потік відмов) спостерігається для таких вузлів дизеля як форсунки, з’єднання та ущільнення, паливні насоси високого тиску.

2. Наслідки виникнення аварійних події найбільш доцільно визначати за допомогою матриць розподілення вірогідності ризикової події, які враховують градації щільності вірогідності виникнення ризику та градації витрат часу, що необхідні для усунення відмов в роботі відповідних елементів.

3. Саме розрахунок матриць розподілення вірогідності ризиків пропонується як метод визначення оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден.

Перелік використаних джерел

1. Голіков В.А., Голіков В.В., Онищенко О.А. Використання технологій методології науки у дослідженнях морського та внутрішнього водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 5-14. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.01.

2. 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.

3. 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.

4. Тимощук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середо-

вищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.

5 Столярик Т.О. Прогнозування механічних втрат в суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 142-156. doi: 10.31653/smf44.2022.142-156.

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. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

8. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines. Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31. – 2019. – Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.

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

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

11. Богом’я В.І., Бажак О.В. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорта на безвідмовність // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.д

12. Звєрьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

13. Тимощук О.М, Мельник О.В. Дослідження безпеки бункерування на водному транспорті // Водний транспорт. Збірник наукових

праць. – 2020. – Вип. 1(29). – С. 5-13. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.

14. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

15. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.

16. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса : ОНМУ. – С. 78-88.

17. 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.

18. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-142.

19. Sagin S.V., Semenov O.V. Motor Oil Viscosity Stratification in Friction Units of Marine Diesel Motors // American Journal of Applied Sciences. – 2016. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 200-208. DOI: 10.3844/ajassp.2016.200.208.

20. Дакі О.А., Бойко С.О. Математична модель функціональних систем суднових комплексів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 1(29). – С. 124-131. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.14.

21. 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.

10.31653/smf47.2023.131-147

Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г.

Національний університет «Одеська морська академія»

ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ ІНВАЗІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЇ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДЕН МОРСЬКОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Україна – велика морська держава. Безумовним законом нашої країни, як і інших держав-членів Міжнародної морської організації (IMO), є девіз цієї організації: за безпечне судноплавство та чистий океан. Екологічна безпека морського транспорту вимагає участі фахівців усіх напрямів людської діяльності, що стосуються судноплавної індустрії та захисту морського середовища – від суднових інженерів та судновласників, агентів та експедиторів до інженерів-екологів та вчених-біологів. Наша країна активно працює у всіх комітетах IMO, у тому числі бере активну участь у роботі Комітету захисту морського середовища. Одна з найсерйозніших проблем, які вирішує Комітет – перенесення небезпечних водних організмів та патогенів із судновим водним баластом. Швидко зростаючий рух суден між різними частинами Світу та їх швидко зростаючі швидкості впливають на довкілля, як і на добробут людини. Внаслідок змін в технології судноплавства в середині XIX століття вода стала використовуватися як баласт, а з середини 1950-х років повністю замінила твердий баласт на суднах, що перевозили важкі вантажі. Системи баластної води в даний час є невід'ємною частиною суднової конструкції та роблять свій внесок у стійкість і осідання судна, так само як і в конструктивну міцність корпусу. Баластна вода закачується в спеціально сконструйовані танки, розподілені по корпусу судна, коли судно перебуває без вантажу, і знову відкачується за борт після прибуття в порт навантаження. В залежності від конструкційних характеристик судна баластні танки розміщуються в донної (найбільша частина), носовій (в районі форпіку судна), кормовій (в районі ахтерпіку судна) частині судна, а також біля бортів судна. До системи баластної води також входять донні та бортові кінгстоні (криз яких забортна вода потрапляє на судно), фільтри забортної води (що запобігають потраплянню в систему забруднюючих речовин), насоси забортної води (що забезпечують закачування та викачування морської води), а також прилади

контролю та управління. Схема перевезення водного баласту морськими суднами зрозуміла з рис. 1.

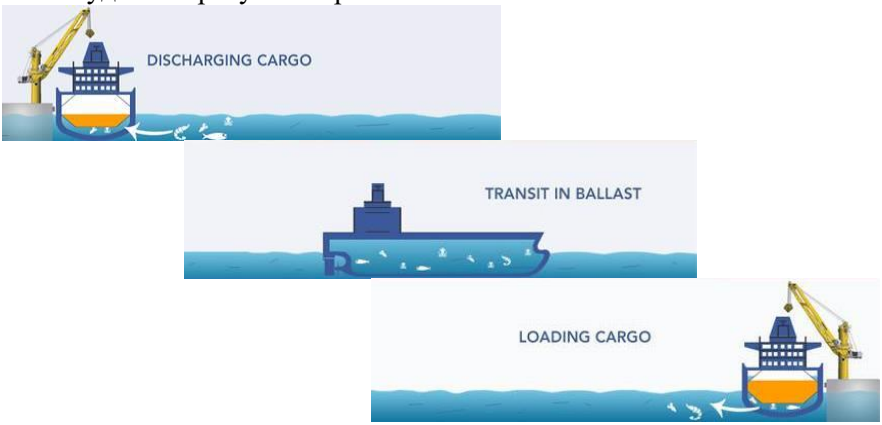


Рис. 1. Схема перевезення водного баласту морськими суднами

Разом з баластної водою в суднові танки потрапляють морські організми, ікра, личинки, рослини, а також збудники небезпечних хвороб. Під час скидання баласту в інших географічних районах морські організми та рослини, не зустрічаючи, найчастіше, природних ворогів, починають активно розмножуватися. Наслідки цього процесу в багатьох куточках Світу руйнівні. Сторонні для даної географічної зони біологічні види, що випускаються в морське середовище, призводять до порушення природної екологічної рівноваги, руйнування гідротехнічних споруд, прямим нанесення значних збитків морським господарствам, створюють загрозу здоров'ю і життю людей і, в кінцевому підсумку, ведуть до екологічної катастрофи.

Потрапляння в морську екосистему сторонніх для даного регіону експансіоністських морських видів вважається однією з чотирьох (поряд із забрудненням води, надмірною експлуатацією морських ресурсів і руйнуванням морського хабітату) найнебезпечніших загроз Світовому океану. Операції скидання баластних вод вважаються потенційно небезпечними не тільки IMO, але також і Всесвітньою організацією охорони здоров'я. Нанесений чужорідними морськими організмами збиток ліквідувати практично неможливо, принаймні, на сьогоднішній день науці невідомі досить ефективні та нешкідливі способи відновлення балансу морської екосистеми. Підтримка екологічного стану морських акваторій різноманітних регіонів Світу забезпечується суворим виконанням вимог відповідних конвенції, що

спрямовані на захист біологічного стану відповідних територіальних районів (рис.2).

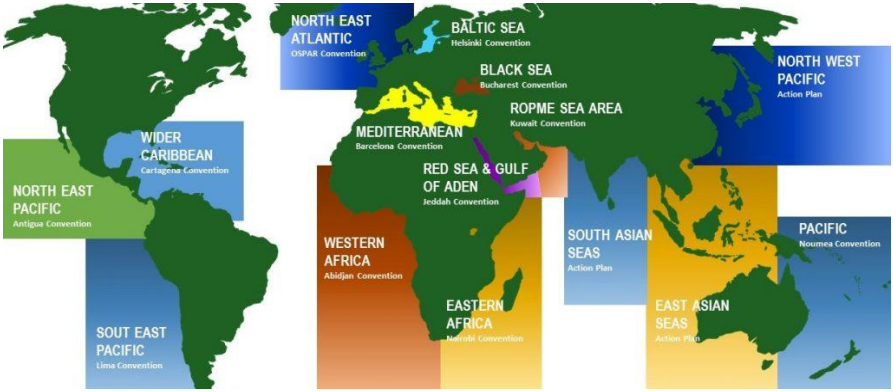


Рис. 2. Райони дії міжнародних конвенції, спрямованих на захист морського середовища від забруднення баластними водами

Таким чином, транспортування чужорідних морських організмів на морських суднах є не тільки великою біологічною проблемою та проблемою безпеки мореплавства, рибальства, рибництва, сільського господарства, але, і, в кінцевому підсумку, – великою економічною проблемою.

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення та аналіз методів очищення суднових баластних вод та зменшення таким чином інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з основних міжнародних документів, який регламентує скидання водяного баласту, є Міжнародна конвенція про контроль суднових баластних вод й осадів та управління ними (BWMC). Дана конвенція – найважливіша міжнародна міра з охорони довкілля, яка спрямована на припинення поширення потенційно інвазійних водних видів в баластній воді з суден, набула чинності 8 вересня 2017 року. Відповідно до конвенції BWMC потрібно, щоб судна були оснащені системами для очищення баластної води шляхом видалення, знешкодження або запобігання надходження або скидання морських організмів і патогенів в баластних водах і осадах. Конвенцією дозволяється для існуючих суден застосовувати як метод заміни баласту, так і метод знешкодження баласту; новим суднам – тільки метод знешкодження, заснований на повному знищення живих організмів в баластній воді [1].

Конвенція вимагає, щоб всі судна, які беруть участь в міжнародній торгівлі, замінювали водяний баласт або очищали ці води і осади відповідно до плану управління баластними водними ресурсами. Усі судна повинні мати журнал операцій з баластними водами, міжнародний сертифікат щодо управління баластними водами та свідоцтво про схвалення відповідними організаціями типового зразка установки для очищення водяного баласту.

На сьогоднішній день діють два стандарти, що відповідають двом варіантам – рис. 3.

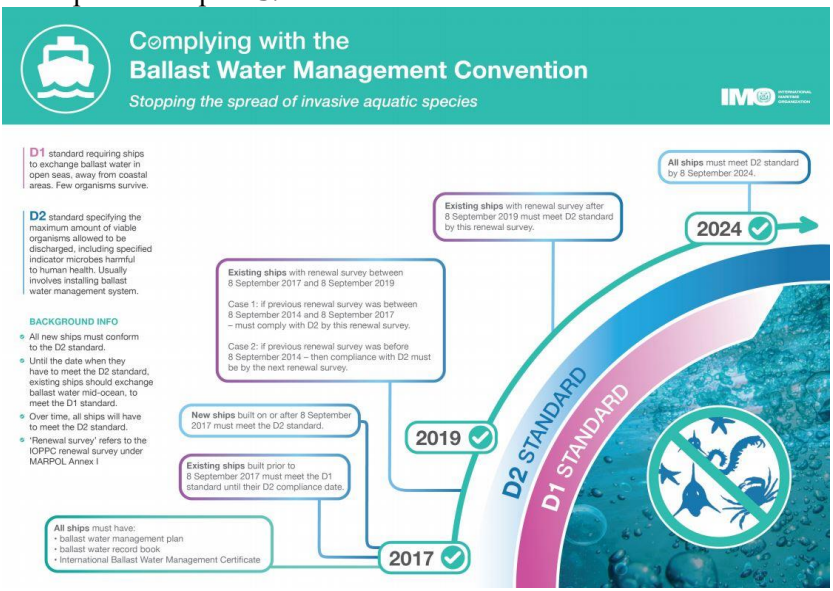


Рис. 3. Вимоги конвенції BWMC

Судна, що плавають під прапором країни, яка прийняла Конвенцію з управління судновими баластними водами, повинні мати на борту судна спеціальні системи очищення суднового баласту, схвалені IMO, за винятком суден, які використовують спосіб скидання баласту на відстані 200 миль від берега або на приймальні споруди [2, 3].

Конвенція містить два основні стандарти: D-1 – стандарт, що регулює заміну баластних вод, та стандарт D-2 – стандарт, що регулює якість баластних вод. Країни, які виконують зобов'язання цієї Конвенції, повинні керуватися стандартами D-1 і D-2 як під час експлуатації, так і при будівництві нових суден.

Стандарт D-1 вимагає від суден заміну баластної води у відкри-

тому морі, далеко від прибережних вод. В ідеалі це означає відстань не менше 200 морських миль від берега і в воді глибиною не менше 200 метрів. Таким чином, це зменшує шанси для мікроорганізмів на виживання, і тому менше можливостей до потрапляння потенційно небезпечних видів при скиданні баластної води. Судна, що виконують заміну баластних вод відповідно до стандарту D-1, повинні це забезпечувати з ефективністю заміни баластних вод, що становить щонайменше 95 відсотків за обсягом. Для суден, які виконують заміну баластних вод методом прокачування, прокачування триразового обсягу кожного танка водяного баласту вважається таким, що відповідає стандарту. Прокачування менше триразового обсягу може прийматися, якщо судно може продемонструвати, що виконана заміна становить щонайменше 95 % за обсягом.

Стандарт D-2 це показник ефективності, який визначає максимальну кількість життєздатних організмів, яке може знаходиться в воді, що зливається за борт, включаючи певні індикаторні мікроби, шкідливі для здоров'я людини. Відповідно до стандарту D-2, судна, які здійснюють управління баластними водами, повинні скидати менше 10 життєздатних організмів на один кубічний метр, мінімальний розмір яких дорівнює 50 мікрометрів або більше, та менше 10 життєздатних організмів на один мілілітр, мінімальний розмір яких менше 50 мікрометрів і дорівнює 10 мікрометрів або більше; при цьому скидання індикаторних бактерій не перевищує встановлених концентрацій щодо холерного вібріону, кишкової палички та кишкових ентерококів [1, 3].

З сьогоднішнього дня будуються судна, які повинні будуть відповідати стандарту D-2, в той час як вже експлуатуються судна, що повинні відповідати стандарту D-1. Залученими організаціями був узгоджений графік впровадження стандарту D-2, заснований на дату проведення повторного огляду на підтвердження Міжнародного свідоцтва про запобігання забрудненню нафтою (IOPPC), який повинен проводитися не рідше одного разу на п'ять років.

В кінцевому підсумку, в найближчому майбутньому всі судна повинні будуть відповідати стандарту D-2. Для більшості суден це означає установку спеціального бортового обладнання, яка забезпечує очищення баластних вод від інвазійних мікроорганізмів та подальше запобігання інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту [1, 4].

Виклад основного матеріалу дослідження. В 2000 році Глобальний екологічний фонд та Програма розвитку ООН ініціювали Глобальну програму з управління баластної водою (GloBallast) для усунення перешкод в ефективному впровадженні мір контролю та управління баластною водою та зменшення перенесення шкідливих організмів з судновою баластною водою та осадами, а також впровадження керівництва ІМО з баластної води.

Під час оцінці екологічних ризиків, що виникають внаслідок неконтрольованого скидання баластних вод, необхідно враховувати основні вимоги та рекомендації програми GloBallast, які імплементовані всіма провідними країнами. У різних регіонах Світового океану містяться характерні лише їм біологічні організми. Число їх видів (відповідно до аналізу баластних вод) для Тихого, Атлантичного та Індійського океанів, а також Середземноморського басейну наведено на рис. 4. Даний аналіз виконаний для різної кількості морських регіонів (морів та заток) та різної кількості морських суден (від 30 до 50) та далі модульований для 1000 суден. Оцінка ризику інвазійного забруднення баластними водами суден повинна проводитись на державному рівні, і кожна держава має визначити для себе найбільш прийнятний підхід щодо управління водяним баластом. Держава може застосовувати такий режим для всіх суден, що входять до його портів, одноманітно або спробувати оцінити загрозу, що виходить від кожного конкретного судна, застосовувати цей режим вибірково до тих суден, які є найнебезпечнішими. В рамках програми GloBallast вирішено, що оцінку ризику інвазійного забруднення баластними водами суден буде виконано, щоб допомогти країнам проекту (державам порту) вибрати відповідний їх можливостям та умовам варіант перевірки суден, що заходять до їхніх портів [3].

Ризик інвазійного забруднення з баластними водами морських суден також залежить від відстані до берегової лінії, на якій здійснюється експлуатація судна і, відповідно, його баластування. На рис. 5 наведені результати з визначення утворення відкладень біомаси на поверхнях баластних танків в разі використання методу заміни баласту. Аналіз виконано для сьомі найбільш розповсюджених в регіонах, де проводились дослідження, інвазійних елементів. Зрозуміло, що у випадку відсутності операції щодо знезараження організмів, які знаходяться в баластній воді, наведена кількість інвазійних елементів потрапляє до прибережних вод та акваторії та сприяє її стрибкоподібному забрудненню.

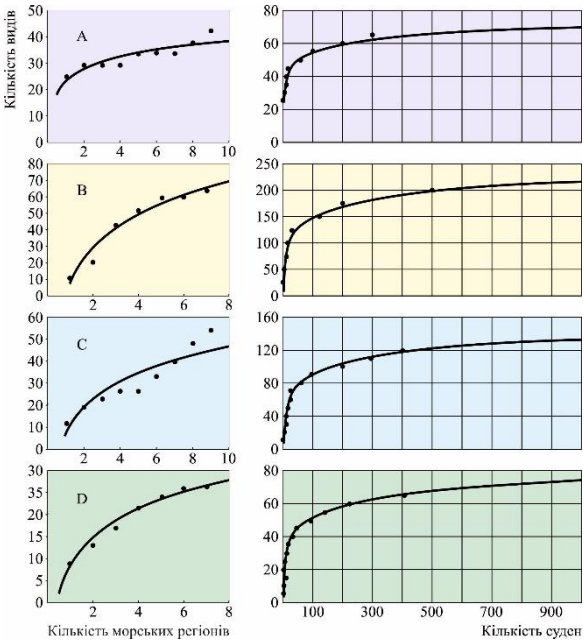


Рис. 4. Зміна числа видів біологічних організмом в залежності від кількості морських регіонів, в яких проводилися дослідження, та кількості оглянутих суден (A – Індійський океан; B – Тихий океан; C – Атлантичний океан; D – Середземноморський басейн); ліворуч – за результатами досліджень, праворуч – за результатами моделювання

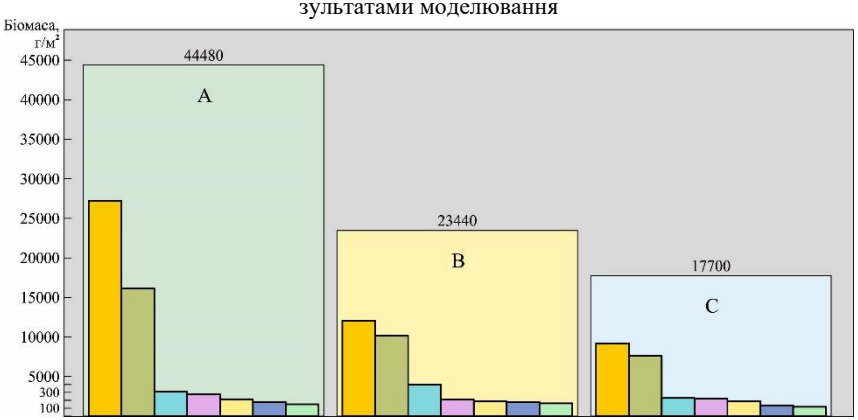


Рис. 5. Зміна біомаси на поверхні баластних танків (для семи видів найпоширеніших інвазійних елементів):
A – робота у прибережних акваторіях (у територіальних водах однієї чи кількох країн); B – робота в морських регіонах (внутрішніх морях та на відстані до 200 миль від берега); C – робота на океанських переходах

В зв'язку з тим, що баластування суден є в даний час невід'ємною частиною морських перевезень, основним шляхом припинення інвазійного забруднення морських акваторій небажаними мікроорганізмами є запобігання їх скиданню з суден в портах, що досягається обробкою баласту під час навігаційного переходу судна.

Під час вибору методу обробки баласту керуються наступними критеріями:

- • безпека для екіпажу і судна;
- • сумісність із загально-судновими системами та судном в цілому, виключення нанесення шкоди довкіллю;
- • економічність;
- • ефективність.

Можливі напрямки і методи обробки водяного баласту представлені на рис. 6.

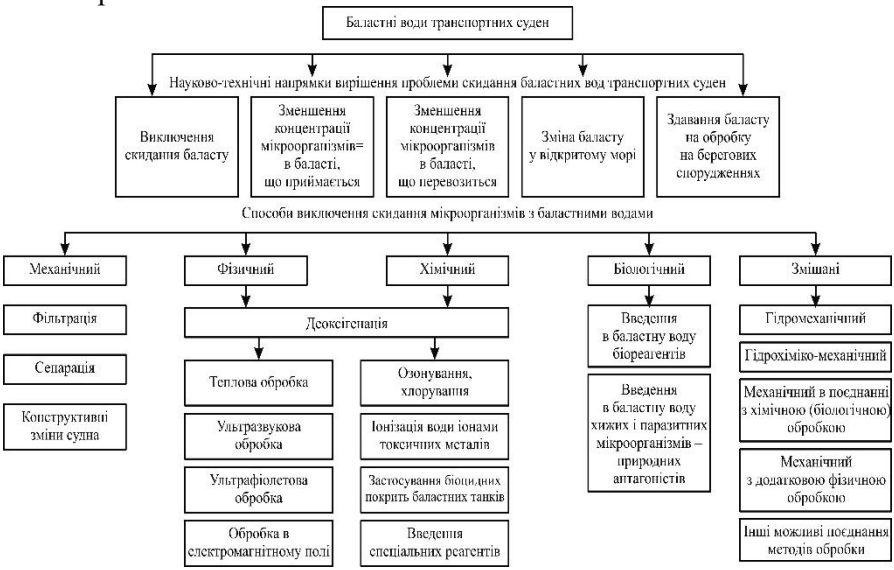


Рис. 6. Можливі методи та способи обробки водяного баласту транспортних суден

Більшість морських держав вже проводили дослідження щодо застосування різних методик обробки баластних вод у суднових умовах [8].

Аналіз результатів, отриманих щодо різних методик обробки баласту, показує, що з них немає досить ефективних і економічних. Так, наприклад, механічна обробка займає багато часу і не забезпе-

чує видалення бактерій та мікроводоростей. Застосування хімікатів, як найдоступніший спосіб, саме собою тягне за собою ряд проблем: очевидний ризик для здоров'я екіпажу, корозія трубопроводів і насосів, забруднення морського середовища при скиданні баласту. Фізична дія ультрафіолетовими променями, ультразвуком, нагрівання баластної води також небезпечна для здоров'я екіпажу, може посилити корозію, при скиданні в акваторії порту – викликати термальне забруднення. В даний час більшість розвинених країн продовжують шукати вирішення проблеми знезараження водяного баласту в суднових умовах з метою запобігання біологічним інвазіям [5].

Раніше основним способом захисту морського середовища від інвазійних забруднень була заміна баластних вод у нейтральних водах, перед заходом в порт, не менше 95 % обсягу старого баласту на новий. У результаті цей спосіб був визнаний IMO неефективним задля запобігання перенесенню інвазійних мікроорганізмів. IMO розцінює обмін водного баласту у відкритому морі як тимчасовий захід: остаточна мета полягає в тому, щоб створити безпечні та ефективні системи обробки баластної води саме під час її приймання на борт судна або транспортування в баластних танках, щоб запобігти біологічну загрозу інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту.

На даний момент найбільш актуальним способом обробки води є очищення баластної води на борту судна з використанням механічних, фізичних та хімічних методів. Згідно з прийнятою Конвенцією, всі судна повинні мати на борту спеціалізовані системи очищення суднового баласту, крім суден, які спочатку не були сконструйовані для прийняття рідкого баласту. Це обладнання має бути сертифіковане та схвалено IMO, класифікаційними товариствами та владою прапора. Тим не менш, виникає питання раціонального вибору судновласником відповідних систем обробки для суден, оскільки слід підібрати найбільш безпечну систему як для запобігання забрудненню моря, так і для безпеки судна і членів екіпажу.

Сучасні системи обробки суднового баласту є сукупністю різних технічних складових, що включають роботу кількох основних блоків: механічної фільтрації та дезінфекції (рис. 7).

Рис. 7. Типова схема обробки баластних вод

Механічна фільтрація являє собою попереднє очищення за допомогою різних фільтрів та мультигідроциклонів, яка не дозволяє потрапляти та осідати в баластових танках морським організмам та рослинам. Пропускна здатність таких фільтрів зазвичай не перевищує 50 мкм. Аналіз систем обробки баласту, схвалених IMO, свідчить про те, що в комплексі механічної фільтрації переважною технологією очищення є використання фільтрів за рахунок їх швидкої роботи, розмірів та простоти їх експлуатації та заміни.

Наступним етапом обробки баластових вод є сегмент дезінфекції, що включає обробку баласту, який служить для остаточного знищення мікробів та вірусів, а також суперечка рослин за допомогою різних способів: обробки ультрафіолетом, електролізу, озонування, хлорування та бромування. Така обробка поділяється на два основні методи: хімічний та фізичний. Найбільш розповсюджені методи обробки баластних вод наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Методи обробки баластних вод

Механічні	Фізичні	Хімічні
Фільтрація Використання мульті- гідроциклонів	Обробка ультрафіолетом Обробка ультразвуком Електроліз Озонування Нагрівання	Електрохлорування Обробка діоксидом хлору Обробка переоксидом водню Обробка гіпохлорітом натрію Обробка хлорною кислотою

Фірми різних країн сконцентрували свої зусилля на розробці зазначених основних методів і засобів обробки водяного баласту (таблиця 2).

Таблиця 2. Розвиток методів обробки водяного баласту

Метод обробки водяного баласту	Країни-учасники розробки
Сепарація	Німеччина, Канада, Норвегія, США
Фільтрація	Австралія, Великобританія, Німеччина, США, Сінгапур
Нагрівання	Австралія, Великобританія, Нова Зеландія, Польща, Японія
Озонування	Австралія, Норвегія, США, Сінгапур
Ультрафіолетове опромінення	Австралія, Великобританія, Німеччина, Канада, Норвегія, США, Сінгапур
Хлорування	Австралія, Німеччина, США

В даний час використання технологій обробки хлором і ультрафіолетовим опроміненням є найбільш поширеними серед виробників. Обробка хлором відбувається під час прийому баласту в систему проточним способом. Хлор на судні одержують внаслідок протікання процесу електролізу. Час згубної дії не перевищує чотирьох годин. При цьому даний спосіб хімічної обробки має такий істотний недолік, як поява корозії металу, що, у свою чергу, через високу концентрацію, може призвести до руйнування металевих танків баластної системи судна [5, 6].

Ультрафіолетове опромінення використовується в більшості випадків разом з механічним способом обробки – фільтрацією. Після того як забортна вода пройшла перший ступінь очищення фільтрами, судновий баласт піддається ультрафіолетовому опроміненню, внаслідок чого утворюються гідроксильні радикали, які остаточно вражають мікроорганізми, що залишилися після фільтрації. Вражаюча дія даного способу діє тільки протягом процесу обробки, не чинячи руйнівного впливу на конструкції баластної системи судна.

Аналіз існуючих системи обробки баласту, схвалених IMO, свідчить, що в комплексі механічної фільтрації переважаючою технологією очищення є використання фільтрів за рахунок їх швидкої роботи, розмірів та простоти їх експлуатації та заміни. Також слід зазначити, що такі способи дезінфекції, як використання фізичного методу обробки ультрафіолетовими хвилями та озонування, а також хімічного методу хлорування, є в даний час найбільш затребуваними. Відсоткове співвідношення цих трьох технологій серед існуючих методів наведено на рис. 8.

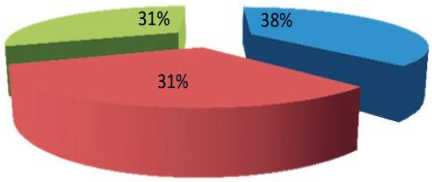


Рис. 8. Відсоткове розподілення найбільш розповсюджених методів обробки баласту: синій – ультрафіолетове опромінення; червоний – хлорування; зелений – озонування

Необхідно відзначити, що існуючі в даний час установки здійснюють згадані процеси очищення та знезараження в момент прийому забортної води як баласту або під час відкачування забортної води 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 баластування та дебаластування відводиться незначний час, фактор часу стає лімітуючим під час організації та здійснення всіх операцій із баластною водою [6].

Одна з технологій очищення та знезараження баластної води наведена на рис. 9. Головною відмінністю запропонованої технології є видалення мікроорганізмів з основного обсягу баластної води за допомогою коагуляції та седиментації та формування осаду цієї суспензії.

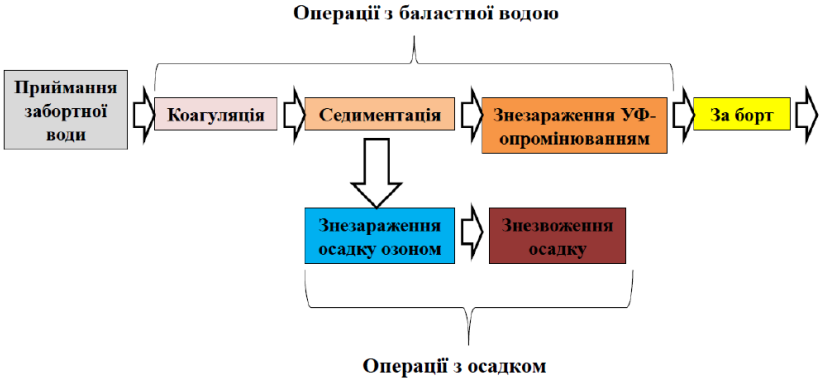


Рис. 9. Технологія очищення та знезараження баластної води

Поділ всього об’єму баластної води на два потоки (основний – це баластна вода 95…98 % від початкового об'єму та вищезгаданий осад 2…5 %) дозволяє усі подальші необхідні операції з цими потоками здійснювати окремо та незалежно один від одного. Видалення зваженої субстанції з баластної води седиментацією, інтенсифікованою коагуляцією забезпечує її очищення від мікроорганізмів. Очищений таким способом баласт додатково піддається знезараженню ультрафіолетовим опроміненням 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 опроміненням створює найкращі умови для проведення процесу знезараження. Можливість та достатність застосування ультрафіолетового опроміненням визначається двома наступними факторами. По-перше, виділення зваже-

них домішок знижує рівень бактеріологічної небезпеки баластної води рівня, який допускає ефективне застосування ультрафіолетового опроміненням. 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.

Пропонована технологія реалізується за допомогою системи, принципова схема якої наведена на рис. 10.

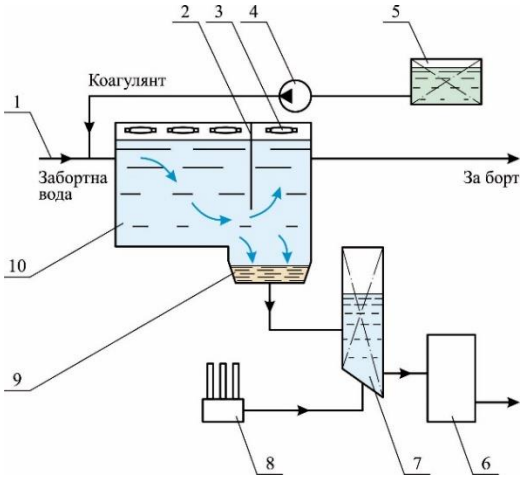


Рис. 10. Принципова схема установки для очищення та знезараження баластної води:
1 – приймальний трубопровід; 2 – перебирання; 3– ультрафіолетові лампи; 4 – насос-дозатор; 5 – ємність з реагентом; 6 – пристрій для зневоднення; 7 – контактна колона; 8 – генератор озону; 9 – збірник; 10 – суднова баластна ємність

Усі операції з очищення та знезараження баластної води здійснюються в статичних умовах, що підвищує їх ефективність.

Під час прийому баласту забортна вода за приймальним трубопроводом 1 надходить в суднову баластну ємність 10. У приймальний трубопровід 1 одночасно з цим з реагентної ємності 5 насосом-дозатором 4 подається коагулянт. Такий спосіб подачі коагулянту забезпечує найкраще його перемішування з баластною водою. Зважені частинки, що знаходяться в баластній воді, які самі можуть представляти мікроорганізми або бути їх носіями, починають коагулювати, утворюючи більші агрегати, які починають відстоюватися, утворюючи осад [7]. В процесі коагуляції суспензії та подальшої її седиментації живі організми в вигляді осаду суспензії концентруються в невеликій частині об'єму баластної води і накопичуються в збірнику 9. При цьому наявність збірника не вимагає перебудови корпусу судна, оскільки як такий збірник може бути більш глибока частина похилого днища. Більш ефективному відділенню суспензії від основного обсягу баластної води сприяє перебирання 2, яке кріпиться до кришки баластної ємності та не доходить до її днища. Таким чином, простий відстійник, яким одночасно є баластна ємність, перетворюється на каскадний. Зі збірника 9 осад направляється в контактну колону 7, куди одночасно подається озоноповітряна суміш від генератора озону 8. Застосування озону, що є одним з найсильніших окислювачів, забезпечує діючі вимоги до якості води, яка скидається за борт. У контактній колоні осад знезаражується, після чого надходить у пристрій для зневоднення 6. Зневоднення може бути здійснено в прес-фільтрі або пристрої відцентрового типу. Зневоднений осад прямує на спалювання в судновому інсинераторі. Додатковий знезаражуючий ефект основного об'єму баласту забезпечується ультрафіолетовими лампами 3, встановленими у верхній частині ємності 10.

Найбільш помітно переваги пропонованих технологічних рішень проявляються під час їх використання в суднових установках, тому що умови їх експлуатації характеризуються значними обмеженнями у просторі та у часі. Дана технологія передбачає здійснення частини операцій (коагуляції, седиментації) та знезараження ультрафіолетовими лампами у самих баластових ємностях, що дозволяє значно економити простір суднових приміщень. Розміщення пристроїв, що забезпечують знезараження та подальшу обробку осаду може бути виконано як в агрегатованому варіанті, також 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 позасуднових (плавучих або берегових) очисних спорудах. На берегових очисних спорудах можуть бути прийняті й інші компонувальні рішення, наприклад, із застосуванням мобільного комплексу, на якому розміщено обладнання для знезараження осаду.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Аналіз стану проблеми захисту водних об'єктів від мікроорганізмів, які можуть бути перенесені з баластною водою та сприяти інвазійному забрудненню морських прибережних акваторій, дає змогу резюмувати наступні висновки. Характер норм сучасного законодавства щодо стану та характеристик вод, які скидаються з морських суден за борт, вимагає відсутності мікроорганізмів в баластній воді, що знаходиться в баластних танках судна. Це 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 стану, що вимагається Міжнародною конвенцією з управління судновими баластними водами та осадами.

Особливостями розв’язання проблеми забезпечення необхідної якості очищення та знезараження баластної води є великі обсяги баласту, що приймається на борт судна, і необхідність швидкого заповнення баластних танків. Здійснення основних операцій у технології очищення та знезараження баласту має бути організовано під час його знаходженні в суднових баластних танках на протязі навігаційного переходу судна та транспортування баласту, тобто за умов наявності достатнього часу задля забезпечення ефективності здійснюваних процесів. Попередження інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту досягається шляхом керованого впливу на суднову систему баластної води та забезпечує екологічні [8, 9] та енергетичні [10, 11] показники роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту. Також при цьому підвищується рівень експлуатаційної надійності [12, 13] суднових систем та механізмів, за допомогою яких виконуються операції з проведення баластування та дебаластування морських суден, та знижується витрати енергії [14, 15] на введення в дію цих механізмів, що призводить до збільшення енергетичної ефективності суднового пропульсивного комплексу [16].

Перелік використаних джерел

1. Міжнародна конвенція про контроль суднових баластних вод й осадів та управління ними 2004 року / Ballast Water Management Convention(BWMC): Міжнародна морська організація; Конвенція, Правила, Форма, Міжнародний документ від 13.02.2004 з поправками. International Maritime Organization: веб-сайт. URL: http://www.imo.org/en/OurWork/ Environment/BallastWaterManagement/BWMConventionandGuidelines.aspx.

2. Kraus R. Ballast Water Management in Ports: Monitoring, Early Warning and Response Measures to Prevent Biodiversity Loss and Risks to Human Health // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 2144. https://doi.org/10.3390/jmse11112144.

3. Wang B., Lu H., Zhang H., Li W., Hong J., Cui M. Experimental Inactivation of Microalgae in Marine Ballast Water by Microbubbles Generated through Hydrodynamic Cavitation // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 241. https://doi.org/10.3390/jmse11020241.

4. Hasanspahi´c, N.; Pe´carevi´c, M.; Hrdalo, N.; ˇCampara, L. Analysis of Ballast Water Discharged in Port – A Case Study of the Port of Ploˇce (Croatia) // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1700. https://doi.org/10.3390/jmse10111700.

5. Liu Q., Lu Z., Liu Z., Lin P., Wang X. Ballast Water Dynamic Allocation Optimization for Revolving Floating Cranes Based on a Hybrid Algorithm of Fuzzy-Particle Swarm Optimization with Domain Knowledge // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1454. https://doi.org/10.3390/jmse10101454.

6. Hyun B., Cha H.-G., An Y.-K., Park Y.-S., Jang M.-C., Jang P.-G., Shin K. Potential Applications of a Novel Ballast Water Pretreatment Device: Grinding Device // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9. – 1213. https://doi. org/ 10.3390/jmse9111213.

7. Ivoševi´c Š., Kovaˇc N., Momˇcilovi´c N., Vukeli´c G. Evaluation of the Corrosion Depth of Double Bottom Longitudinal Girder on Aging Bulk // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1425. https://doi.org/10.3390/ jmse10101425.

8. 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 and Technology. – 2022.– Vol.69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

9. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pí˘stˇek V., Kuˇcera P. Ensuring the safety of maritime trans-

portation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.

10. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – 120. https://doi.org/10.3390/jmse11010120.

11. 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). – 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

12. Мельник О.М., Онищенко О.А., Парменова Д.Г. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.

13. 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.

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

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

16. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.

10.31653/smf47.2023.148-156

Сагін С.В., Матєйко О.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. В теперішній час кількість суден, що здійснюють перевезення зрідженого газу постійно зростає. Це пов'язано з енергетичною залежністю ряду країн (насамперед Європи, Канади, Китаю та Японії) та неможливістю постачання до них газового палива континентальними трубопроводами. Виробнича послідовність отримання вантажу (зрідженого газу) в порту завантаження – транспортування вантажу морськими чи океанським шляхами – вивантаження вантажу в порту доставки, завершується обов'язковою технологічною операцією з зачистки танків і вільних порожніх просторів. Як правило, вона виконується за схемою інертизація – дегазація – повторна інертизація – очищення. В зв'язку з тим, що після вивантаження судна-газовози здійснюють зворотні переходи в баласті, якість проведення операцій з зачистки танків після вивантаження набуває вкрай важливе значення, через те, що саме від її виконання залежить вибухобезпечність вантажних танків та, отже, безпека судна, суднового екіпажу та довкілля [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інертизація вантажних танків суден, що перевозять рідкі нафтові або зріджені газові вантажі, забезпечує зниження вмісту кисню в цих танках до рівню, що гарантую неможливість будь-якого займання безпосередньо вантажу, залишків пари вантажу, або суміші газів, що знаходиться в танку. Як інертний газ використовуються випускні газі суднових дизелів та суднових парових котлів (при цьому остаточний вміст кисню в випускних газах саме парових котлів значно менший, ніж в випускних газах дизелів), але обсягу цих газів не завжди вистачає для повного заповнення всіх вантажних танків. Тому найбільш поширеним джерелом інертних газів на суднах є спеціальні генератори інертних газів. Те, який газ можливо використовувати для інертизації вантажних танків визначається вимогами фрахтувальника щодо мінімального вмісту кисню в атмосфері танку, точки роси, сумісністю вантажу та інертного газу та іншими другорядними характеристиками [4, 5].

Перевезення вантажів, що вступають у реакцію з вуглекислим газом CO_2 або іншими компонентами інертного газу, який генерується судновою системою інертних газів, або якщо ці вантажі вимагають дуже низького вмісту кисню, є причиною використання для забезпечення інертизації азоту. Азот є хімічно неактивним (інертним) газом. У хімічні реакції з деякими елементами він може вступати тільки за високих тисків і температур у присутності каталізатора. Тому в нормальних умовах азот не вступає в реакцію з вантажами, що перевозяться суднами-газовозами. Азот можливо отримувати за допомогою спеціальної суднової установки, що відділяє його з повітря, або з берегових станцій постачання. Азот, одержуваний у промислових цілях, містить у своєму складі не більше 0,0005 % кисню, що є безумовною гарантією неможливості будь-якого займання в вантажних танках. За своєю якістю та складом інертні газі, що генеруються судновою системою, значно поступаються азоту. В зв’язку з тим, що в судових умовах інертні газі отримують спалюванням палива у спеціальній установці, то в їх складі завжди присутні механічні домішки, сажа, пари води, вуглекислий газ, а також продукти згоряння палива. Вміст кисню в інертних газах, що генеруються судновою системою в залежності від її характеристик знаходиться в діапазоні від 0,1 % до 5 % за обсягом. Цього рівню, безумовно, також вистачає для безпеки суден-газовозів, але запас надійності цієї безпеки, значно менший ніж під час інертизації вантажних танків азотом [6, 7].

Оптимізація процесу інертизації вантажних танків нафтових танкерів та суден-газовозів вивчалась багатьма дослідниками. При цьому були запропоновані рішення, що забезпечують зміну способу заповнення танків, збільшення продуктивності суднової системи інертних газів, зміни термодинамічних характеристик та хімічних складових інертних газів [8, 9]. При цьому питання визначення оптимальних способів інертизації вантажних танків шляхом їх заповнення азотом, залишаються вирішеними не в повній мірі.

Постановка завдання. Як завдання дослідження був аналіз суднових схем, що забезпечують процес інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Технологічні схеми, що забезпечують інертизацію вантажних танків, залежать від конструкційних особливостей суден-газовозів. До основних з них відносяться каскадна, напивкаскадна та паралельна [10].

Інертизація (продування) каскадом означає, що танки продуваються один за одним, атмосфера одного танка витісняється в інший танк і таким чином виконується заповнення всіх танків (рис. 1).

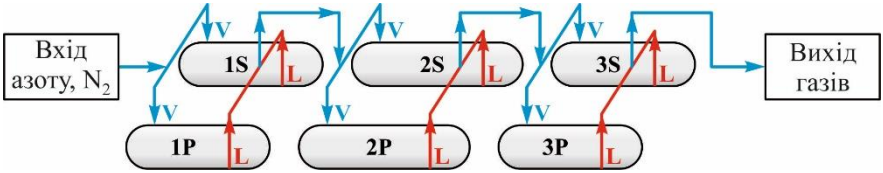


Рис. 1. Принципова схема, що забезпечує продування танків каскадом:
S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

Під час продування каскадом азот подається у верхню частину танка, а потім відводиться з нижньої частини цього танка у верхню частину другого танка і далі. Така процедура дозволяє значно заощадити загальну кількість азоту, необхідну для повного продування всіх вантажних танків.

Дуже часто вантажна система судна не дозволяє з'єднати усі танки послідовно. У такому випадку можна використовувати так званий напівкаскадний метод продування. Зазвичай, вантажна система газовоза розділена на дві окремі групи, що дозволяє проводити продування каскадом однієї групи танків послідовно, а другої групи в паралель (рис. 2).

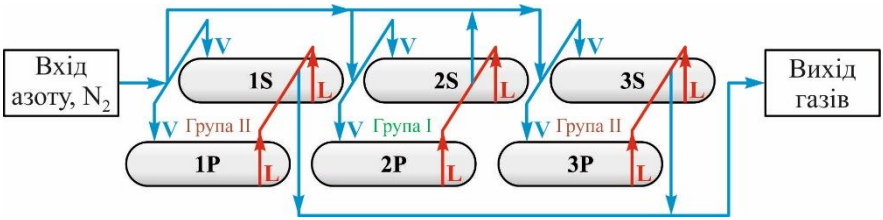


Рис. 2. Принципова схема, що забезпечує продування танків напівкаскадом:
S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

На схемі, зо надана на рис. 2, одна перша система містить танки 2 лівого та 2 правого борту (2S та 2P) в одній групі, друга система –а танки 1 лівого та 1 правого борту (1S та 1P), а також танки 3 лівого та 3 правого борту (3S та 3P). Групи включені у систему паралельно, але танки другої групи продуваються каскадом.

За тимчасовим показником така схема продування працює досить добре, оскільки можна значно збільшити швидкість азоту, що подається, але витрата азоту в цьому випадку також значно підвищується.

Якщо немає можливості з'єднати танки послідовно, тоді продування виконується паралельно, при цьому схема набуває вигляду, представленого на рис. 3.

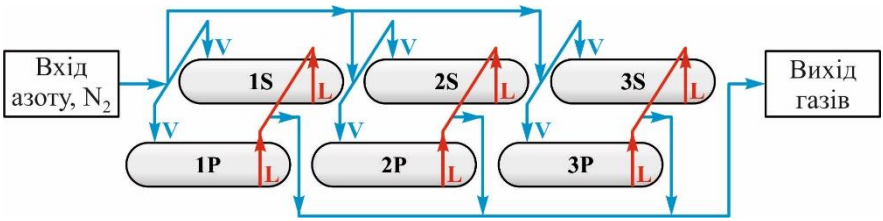


Рис. 3. Принципова схема, що забезпечує продування танків у паралель:
S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

У цьому випадку азот подається одночасно до всіх танків по загальній газовій магістралі, відведення атмосфери танку на вентиляційну колону або до берегової системи газовідведення здійснюється по загальної магістралі також одночасно з усіх танків. Основний недолік такого способу – значна витрата азоту на продування танків, однак, висока швидкість подачі азоту в танки дозволяє зменшити загальний час продування танків.

Азот також може використовуватися з метою розведення атмосфери вантажного танку. В цьому випадку подача азоту в танк проводиться з високою швидкістю, що сприяє рівномірному перемішуванню (розведенню) атмосфери танку з азотом (рис. 4).

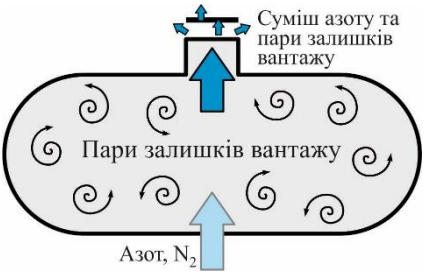


Рис. 4. Метод розведення атмосфери танка азотом

Під час зміні атмосфери танка методом розведення дотримуються наступних практичних рекомендацій:

- азот повинен надходити в танк із температурою +50°С…+70°С;
- важчий газ завжди повинен надходити в танк зверху, легкий газ слід подавати донизу танку;
- продування слід починати з максимальною подачею азоту для забезпечення кращого перемішування атмосфери танка [11, 12].

Основне завдання під час використання цього методу – забезпечити якомога повніше перемішування атмосфери танка з азотом. Це досягається досить легко подачею азоту в нижню частину танків із високою швидкістю. Відведення суміші здійснюється з верхньої частини танка по газовій магістралі.

Такий спосіб застосовується лише тоді, коли скорочення часу стоянки судна в порту домінує над витратами на азот [13].

Продування вантажних танків також можливо шляхом використання пари вантажу, що є досить легкою операцією. Більшість парів, вантажів, що перевозяться, значно важчі азоту (виключаючи аміак і етилен). Тому, виглядає очевидним, подавати важкі пари вантажу на низ танка. Для суден середньої вантажомісткості (до 15000 м^3) продування парами вантажу доцільніше проводити в паралель (рис. 5), тому що для продування судна такої місткості, використання каскадної схеми продування призведе до значних тимчасових втрат, тому що після продування систему необхідно буде налаштувати на паралельне навантаження.

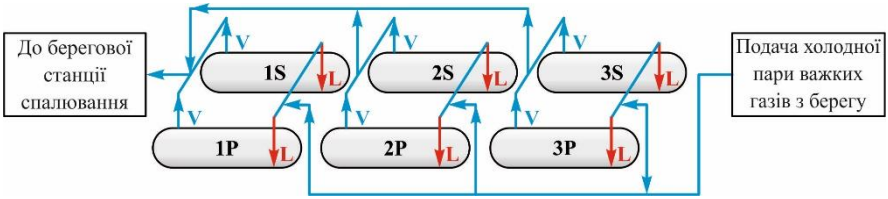


Рис. 5. Принципова схема, що забезпечує продування танків у паралель холодною парою важких вантажів:
S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

Продування в паралель також дозволяє, при значній інтенсивності подачі парів у танки, утримувати мінімальний тиск усередині тан-

ків, чим досягається найбільш повне використання ефекту витиснення [14].

Під час продування танків парами легких газів використовують схему, що наведена на рис. 6.

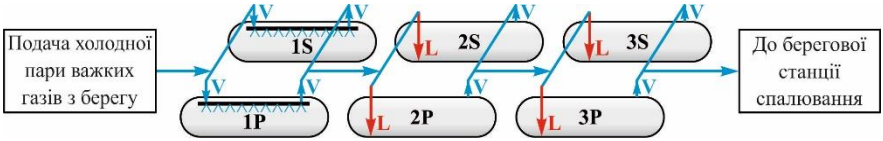


Рис. 6. Принципова схема, що забезпечує продування танків каскадом холодною парою легких вантажів:
S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

Найбільш поширені під час використання цього способу є етилен та аміак. Пари етилену мають приблизно таку ж густину, що й пари азоту. Тому продування танків парами етилену вимагає набагато більшої кількості вантажу, ніж продування парами зрідженого газу. Якщо подача етилену з берега здійснюється в вигляді пари, то використовується береговий компресор. У цьому випадку більшість парів, що відводяться з судна до берегового газовідведення, зріджується повторно. Так як в цьому випадку існує можливість підігріти пари етилену перед їх подачею на судно, то також густина парів може бути дещо нижчою, ніж густина холоднішого азоту у вантажних танках. У цьому випадку продування здійснюється каскадом за схемою «зверху вниз» [15, 16].

Цей метод можна оптимізувати, коли концентрація парів етилену у першому танку досягне 100 %. Після цього можна починати подачу етилену в зрідженому вигляді на верхній розпил танка. Інтенсивність подачі рідкого етилену повинна бути незначною, щоб забезпечити повне випаровування вантажу всередині танка та його поступове охолоджування. В цей же час система повинна бути перебудована таким чином, щоб холодні пари етилену подавалися за схемою «знизу вгору». Після досягнення 100 %-ної концентрації парів етилену в наступному танку, також починається подача рідкого вантажу на верхній розпил цього танка і проводиться його охолодження (рис. 5).

Оскільки продування танків парами здійснюється одночасно з їх охолодженням, така операція дозволяє значно заощадити час. Якщо берегової термінал може подавати в суднову систему тільки рідкий

вантаж, то для отримання гарячої пари можна використовувати палубний підігрівач [17].

Продування танків парами зрідженого газу зазвичай проводиться у суднових умовах з використанням вантажу з дек-танку. Цей вантаж називається охолодний агент (рис. 7).

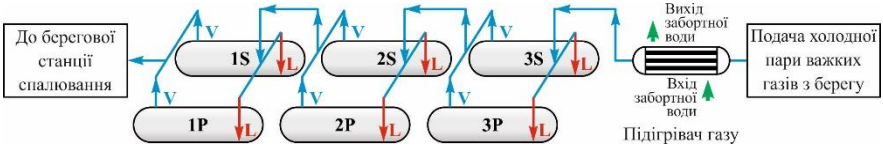


Рис. 7. Продування танків каскадом з використанням гарячої пари рідкого вантажу:

S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

У процесі використання охолоджуючого агента для продування та охолодження інших танків можуть бути використані або суднові компресора, або танк з вантажем може бути використаний як випарник. Для цього вантажним насосом рідкий вантаж подається на верхній розпил танка, а пари, що утворюються при цьому, перепускаються по каскадній системі в інші танки за схемою «знизу вгору».

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

Постійно зростаючий попит на газове паливо та обмеження деяких країн в отриманні подібного палива континентальними газопроводами сприяє транспортуванню зріджених газів морськими та океанськими шляхами суднами-газовозами. Навігаційні переходи цих суден (як з вантажем, а також в баласті) неможливі без інертизації вантажних танків, основним завданням якого є зменшення концентрації кисню в атмосфері танку до рівня, за яким неможливе займання пари газів, що в них знаходяться.

Інертизація вантажних танків може бути забезпечена шляхом використання інертних газів. При цьому можливе виробництво інертних газів в спеціальних генераторах, що встановлюються на суднах, а також використання азоту, який може бути отриманий або з берегових станцій, або згенерований на судні.

В залежності від конструкційних характеристик судна-газовоза інертизація його танків азотом виконується за наступними схемами: каскадною, напивкаскадною, паралельною. Також можлива технологія, зо забезпечує розведення атмосфери вантажного танку азотом.

До методів, що забезпечують інертизацію вантажних танків також відносяться використання холодної та гарячої пари легких або важких вантажів.

Перелік використаних джерел

1. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. –2018. – Vol. 65(2). – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.

2. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. – 2019. – Vol. 66(1). – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.

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 Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(10). – 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.

4. Manos A., Lyridis D., Prousalidis J., Sofras E. Investigating the Operation of an LNG Carrier as a Floating Power Generating Plant (FPGP) // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 1749. https://doi.org/10.3390/jmse11091749.

5. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

6. Mrzljak V/, Poljak I., Kosor M., Culin J. Bisection Method for the Heavy Fuel Oil Tank Filling Problem at a Liquefied Natural Gas Carrier // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 849. https://doi.org/10.3390/jmse11040849.

7. Lyridis D.V. Spot Charter Rate Forecast for Liquefied Natural Gas Carriers // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1270. https://doi.org/10.3390/jmse10091270.

8. Бражнік І. Д. Изменение рабочих характеристик системы инертизации танкера за счет принудительной подачи газов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. Наковий журнал. – 2019. – № 1(20). – Херсон: ХДМА. – С. 4-11.

9. 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 En-

gineering. – 2023. – Vol. 11(1). – 120. https://doi.org/10.3390/jmse11010120.

10. Peruško D., Karabai´c D., Bajsi´c I., Kutin J. Ageing of Liquified Natural Gas during Marine Transportation and Assessment of the Boil-Off Thermodynamic Properties // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 1980. https://doi.org/10.3390/jmse11101980.

11. 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 and Technology. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

12. 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). – 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

13. Mangan S., Lohrer A.M., Thrush S.F., Ellis J.I., Pilditch C.A. The Effects of Long-Term Nitrogen Enrichment on Estuarine Benthic-Pelagic Coupling // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1955. https://doi.org/10.3390/jmse10121955.

14. Li H.-C., Yu K.-W., Lien C.-H., Lin C., Yu C.-R., Vaidyanathan S. Improving Aquaculture Water Quality Using Dual-Input Fuzzy Logic Control for Ammonia Nitrogen Management // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 1109. https://doi.org/10.3390/jmse11061109.

15. Wu S., Zhou X., Lu J., Liang D., Li D. Experimental Study on CH_4 Hydrate Dissociation by the Injection of Hot Water, Brine, and Ionic Liquids // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 713. https://doi.org/10.3390/jmse11040713.

16. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 36-43. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43.

17. 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.

10.31653/smf47.2023.157-171

Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С.,Чимшир В.І., Разінкін Р.О.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СКРУБЕРНОГО ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Екологічна безпека судна є комплексними показниками та включає: безпечне управління баластними операціями, підтримання безпечного технічного стану корпусу судна, забезпечення вимог міжнародних конвенцій щодо захисту довкілля від забруднень. Особливо актуальним є управління екологічною безпекою під час знаходження суден морського транспорту в 12-ти мильній прибережній зоні, у спеціальних екологічних районах та акваторіях внутрішніх морів. Суднові енергетичні установки (СЕУ) включають до свого складу двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) / дизелі, парові та термомастильні котли, парові та газові турбіни. При цьому саме дизелі в даний час набули домінуючого поширення на всіх без винятку суднах морського та внутрішнього водного транспорту, незалежно від їх водотоннажності, типу та призначення [1-3].

Забезпечуючи судно необхідною енергією (яка використовується як для руху, так і для всіх суднових машин, механізмів, обладнання та приладів) дизелі викидають в атмосферу велику кількість випускних газів. Більшу частину випускних газів становлять нетоксичні компоненти (діоксид вуглецю CO_2, водяна пара H_2O, а також атомарний кисень O_2 та азот N_2). Однак разом з ним в атмосферу потрапляють шкідливі для довкілля та людини токсичні домішки. До них відносяться оксиди азоту NO_X, оксиди сірки SO_X, монооксид вуглецю CO, а також незгорілі вуглеводні C_nH_m. Мінімізація викидів NO_X, SO_X, CO, які потрапляють в атмосферу з випускними газами суднових дизелів, є актуальним завданням, на її розв’язання спрямовані численні дослідження та розробки [4-6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв’язання проблеми управління екологічною безпекою суден морського та внутрішнього водного транспорту розглядалося різними дослідниками.

Для зниження рівня емісії оксидів азоту пропонувалося викорис-

товувати рециркуляцію випускних газів [7, 8], додаткове очищення у спеціальних каталітичних реакторах [9, 10], а також застосовувати технології зволоження наддувного повітря та подачі води в циліндр дизеля [11, 12]. Однак при цьому знижується ефективна потужність дизеля та збільшується питома витрата палива [13, 14].

У дослідженнях [15, 16] було доведено, що зниження концентрації монооксиду вуглецю в випускних газах можливе за рахунок їх додаткової фільтрації та охолодження. При цьому було встановлено, що подібні технологічні рішення збільшують аеродинамічний опір випускної магістралі. Це становиться причиною зниження ефективних показників робочого циклу дизеля [17]. Одним із варіантів зниження викидів монооксиду вуглецю є коригування навігаційного переходу з урахуванням попутної течії та попутних повітряних потоків [18]. Цей спосіб знижує загальну витрату палива на милю плавання, проте його використання можливе лише в обмежених морських та океанських акваторіях, в яких напрямок морських та океанських течій співпадає з напрямком навігаційного переходу судна між портами [19].

Зниження емісії оксидів сірки забезпечується шляхом десульфуризації палива [20]. У суднових умовах це досягається шляхом ультразвукової чи гідродинамічної обробки палива. Однак при цьому суттєво покращується лише технічний стан циліндрової групи та газовипускної магістралі дизеля. Рівень концентрації оксидів сірки у випускних газах за такої обробки палива зменшується незначно. Основним методом зниження емісії оксидів сірки із випускними газами є використання палива із вмістом сірки до 0,1 % за масою. Відповідно до міжнародного стандарту ISO8217 “Fuel Standard for marine distillate fuels” ці сорти суднових палив відносяться до класу Marine Gas Oil та характеризуються найбільшою вартістю порівняно з паливами інших класів. Використання таких палив знижує економічну ефективність суден морського транспорту. Це є однією з причин використання скруберного очищення випускних газів, при якому можливе використання палива із вмістом сірки до 3,5 %.

Постановка завдання. Додаткове очищення випускних газів ДВЗ в скруберах суттєво поширює можливість використання морських сортів палива з підвищеним вмістом сірки, сприяє тим самим зменшенню експлуатаційних витрат на придбання палива. Одночасно з цим системи скруберного очищення вимагають додаткових витрат енергії на обслуговування обладнання, що входить до їх складу, а та-

кож є підставою збільшення опору в газовипускної магістралі дизелів та пов'язаного з цим зменшення ефективної потужності дизелів. В зв'язку з цим завданням дослідження було проведення аналізу екологічної, економічної та енергетичної ефективності процесу скруберного очищення випускних газів ДВЗ суден морського транспорту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основні екологічні показники суднових дизелів визначаються емісією оксидів азоту NO_X та оксидів сірки SO_X, які потрапляють у довкілля з випускними газами. Значення емісії NO_X та SO_X регламентуються вимогами Annex VI MARPOL [5, 8-10]. Максимально допустима концентрація NO_X у випускних газах визначається за спеціальними виразами залежно від року будівництва судна та характеристик дизеля. Викиди SO_X 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.

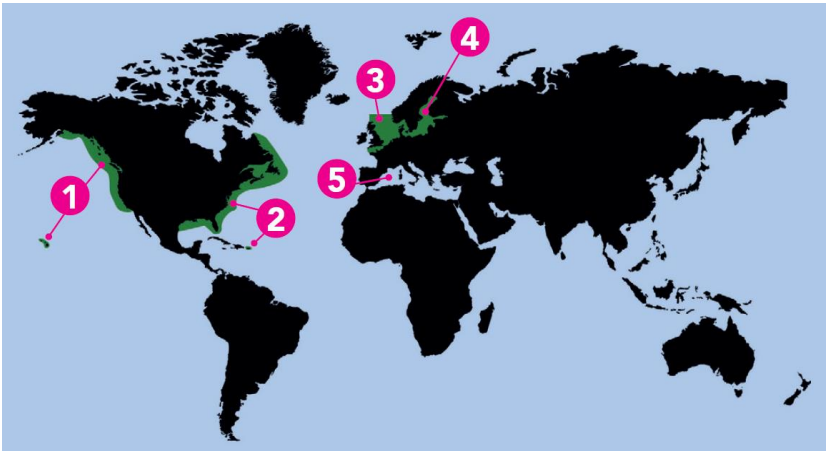


Рис. 1. Райони SECAs відповідно до вимог IMO:
1 – SECA Північної Америки, включаючи більшу частину США, узбережжя Канади та Гавайї; 2 – SECA Карибського басейну США, включаючи Пуерто-Ріко та Віргінські острови США; 3 – SECA Північного моря, включаючи Ла-Манш; 4 – Балтійське море SECA; 5 – усі порти ЄС

Використання палива з вмістом сери понад 0,5 % від маси можливо тільки за умови додаткового очищення випускних газів у спеціальних технічних пристроях (в якості яких зазвичай встановлюються скрубери) [36, 37]. У разі управління екологічною безпекою морських суден за допомогою додаткового очищення випускних газів контролюється співвідношення SO_2(ppm)/CO_2(%) після скрубера. Ця величина не повинна перевищувати значення 4,1 SO_2/CO_2 під час знаходженні судна в SECAs та значення 21,7 SO_2/CO_2 під час перебування судна за межами SECAs. Вимоги Annex VI MARPOL щодо контролю викидів оксидів сірки наведені в таблиці 1.

Дослідження виконувались на судне класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн. В енергетичну установку судна входили дизелі 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo та 6EY18ALW Yanmar. Основні характеристики дизелів наведені в таблиці 2.

Таблиця 1. Вимоги Додатка VI MARPOL щодо емісії оксидів сірки

Де та коли застосується	Вміст сірки в паливі, %	Співвідношення викидів SO_2(ppm)/CO_2(%)
За межами SECA або порту ЄС, починаючи з 1 січня 2020 року	0,5	21,7
В SECA або порту ЄС, починаючи з 1 січня 2020 року	0,1	4,3

Таблиця 2. Основні характеристики дизелів судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн

Параметр	5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo	6EY18ALW Yanmar
Функціональне призначення	головний	допоміжній
Діаметр циліндра, м	0,6	0,18
Хід поршня, м	2,4	0,28
Кількість циліндрів	5	6
Номінальна потужність, кВт	8050	800
Частота обертання вала, $хв^{-1}$	89	900
Питома витрата палива в діапазоні навантажень 45…100 %, кг/(кВт·год)	0,187…0.175	0,198…0,183
Кількість в складі СЕУ	1	3

Для додаткового очищення випускних газів від оксидів сірки на судні було встановлено скруберу систему очищення (рис. 2). Це доз-

воляло використовувати для суднових дизелів (як головного, також і допоміжних) паливо з вмістом сірки до 3,5 % за масою.

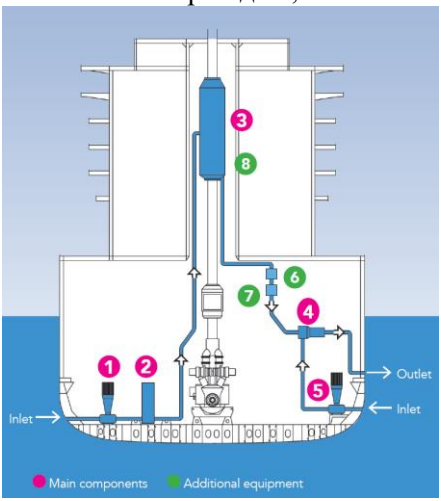


Рис. 2. Комплектація суднової системи очищення випускних газів:
1 – насос забортної (морської) води; 2 – фільтр забортної (морської) води; 3 – скрубер; 4 – змішувач; 5 – буферний насос; 6 – блок дегазації; 7 – блок фільтрації; 8 – охолоджувач випускних газів

Очищення випускних газів виконувалося за відкритим типом. Гази від головного двигуна та трьох допоміжних двигунів (на рис. 2 не показані) надходили до скруберу 3. Для очищення газів використовувалася морська вода, яка подавалася в скрубер 3 насосом морської води 1 через фільтр 2. Продуктивність насоса 1 (залежно від вмісту сірки у паливі, потужності головного двигуна, а також кількості працюючих допоміжних двигунів) змінювалась у діапазоні 200…550 кг/год. Температура газів у скрубері 3 підтримувалася в діапазоні 200…300°С. У разі перевищення цього значення, гази охолоджувалися за допомогою охолоджувача 8. Вода після скрубера 3 надходила до блоку дегазації 6 та до блоку фільтрації 7, в яких виконувалося відділення від води газів і твердих домішок. Далі вода зливалася за борт. Для утримання необхідного рівня кислотності (рівень якої підтримувався в діапазоні pH=6,8…7,0) до води, що зливалася за борт, в змішувачі 4 додавалася забортна вода. Подача забортної води до змішувача 4 здійснювалася буферним насосом 5. Продуктивність буферного насоса змінювалася в діапазоні 200…300 кг/год. Робота всіх елементів системи контролювалася автоматично. Також автома-

тично підтримувалося необхідне відношення SO_2/CO_2. Це забезпечувалося шляхом зміни продуктивності насосу забортної води 1.

Система забезпечує необхідний рівень очищення випускних газів у наступному діапазоні роботи суднової енергетичної установки:

• мінімальний експлуатаційний режим – робота одного допоміжного двигуна 6EY18ALW Yanmar на будь-якому навантаженні;

• максимальний експлуатаційний режим – робота головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo на навантаженні 85 % та двох допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar на навантаженні 85%.

Також система може експлуатуватися за умови 105 % навантаження головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo та загального навантаження допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar 150 %.

Система передбачає автоматичну реєстрацію місця знаходження судна, навантаження на головний двигун та допоміжні двигуни, параметри морської води в контурі очищення, а також поточне значення SO_2/CO_2. Реєстрація цих даних проводиться з інтервалом 3 хвилини. На всіх експлуатаційних режимах, а також у всіх районах плавання (всередині та поза SECAs) робота головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo та допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar відбувалася з використанням палива RMG380 [21-23]. Основні характеристики палива наведені у таблиці 3.

Таблиця 3 Основні характеристики палива RMG380

В’язкість за 50°С, сСт	329
Густина за 15°С,кг/м^3	986
Вміст сірки, %	2,7
Температура спалаху, °С	81
Теплотворна здатність, кДж/кг	39070

Програма автоматичного моніторингу роботи системи очищення випускних газів дозволяла контролювати її основні параметри. Проте, для аналізу ефективності системи очищення випускних газів розглядалося лише зміна відношення емісії оксидів сірки до оксидів вуглецю за часом – $\frac{SO_2}{CO_2} = f(t)$.

Результати цих досліджень наведені в таблиці 4. Значення відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$ фіксувалися системою моніторингу через кожні 3 хвилини. Для скорочення обсягу інформації дані значення в табли-

ці 4 наведені через 5 годин (під час знаходження судна поза SECA) і через 10 годин (під час знаходження в SECA).

Таблиця 4. Моніторинг відношення SO_2/CO_2 під час навігаційного переходу

Знаходження поза SECA		Знаходження в SECA			
Час, години	SO_2/CO_2	Час, години	SO_2/CO_2	Час, години	SO_2/CO_2
5	18,72	50	3,75	120	3,80
10	19,21	60	4,02	130	4,05
15	17,72	70	3,72	140	3,72
20	18,68	80	3,18	150	3,63
25	20,02	90	3,82	160	3,53
30	20,83	100	4,17	170	3,61
35	19,22	110	4,15	180	3,68
40	18,32				
45	18,82				

Для кращої візуалізації отримані значення представлені у вигляді рис. 3.

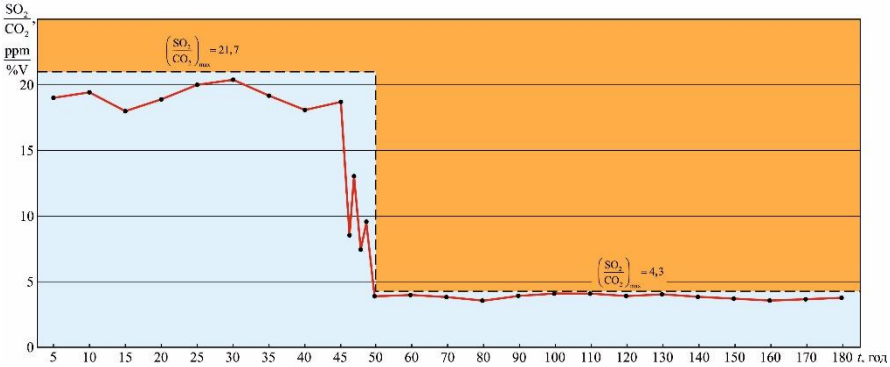


Рис. 3. Зміна відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$ під час скруберного очищення випускних газів дизелів судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн під час знаходження судна поза SECA (ліворуч) та в SECA (праворуч)

Ефективність методу системи скруберного очищення можна оцінити за виразом, що характеризує екологічну стійкість судна:

$$Eco^{+} = \frac{\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{max} - \left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{t}}{\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{max}} \cdot 100\%,$$

де $\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_{max}$ – максимальне для умов роботи судна (в SECA або поза SECA) значення відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$;

$\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)_t$ – відношення $\frac{SO_2}{CO_2}$ в момент часу *t*.

Чим більш величина Eco+, тим далі від максимально допустимого значення залежність – $\frac{SO_2}{CO_2} = f(t)$ рис. 3, тим вище екологічна стійкість судна та екологічна безпека навігаційного переходу.

Значення екологічної стійкості під час розглянутого навігаційного переходу за умови використання системи скруберного очищення випускних газів наведені у таблиці 5.

Таблиця 5. Екологічна стійкість судна під час навігаційного переходу

Знаходження поза SECA		Знаходження в SECA			
Час, години	Eco$^+$, %	Час, години	Eco$^+$, %	Час, години	Eco$^+$, %
5	15,92	50	12,79	120	11,63
10	12,96	60	6,51	130	5,81
15	22,46	70	13,49	140	13,49
20	16,17	80	26,05	150	15,58
25	8,39	90	11,17	160	17,91
30	4,18	100	3,02	170	16,05
35	12,90	110	3,49	180	14,42
40	18,46				
45	15,30				

Для кращої візуалізації за результатами таблиці 5 побудовані діаграми – рис. 4.

Використання методів управління екологічною безпекою завжди пов'язане з підвищенням витрат енергії та палива на їхнє забезпечення. У разі системи скруберного очищення додаткові витрати енергії пов'язані з використанням насосів морської води та буферних насосів (позиції 1 та 5 на рис. 2). Крім того, використання скруберного очищення на 1,0…1 5 % знижує потужність головного та допоміжних двигунів, що пов’язане з підвищенням аеродинамічного опору в газовипускної магістралі дизелів.

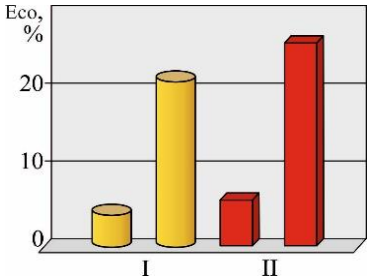


Рис. 4. Зміна екологічної стійкості судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн:
I – робота у SECA; II – робота поза SECA

Для розглянутої скруберної системи очищення випускних газів потужність, необхідна для забезпечення роботи двох насосів морської води

$$N_{\text{p}}^{\text{sw}} = 2 \cdot 40 = 80 \text{ кВт};$$

де 40 кВт – потужність одного насоса морської води;

потужність, необхідна для забезпечення роботи двох буферних насосів

$$N_{\text{p}}^{\text{bw}} = 2 \cdot 35 = 70 \text{ кВт};$$

де 35 кВт – потужність одного буферного насоса.

Втрата 1,0…1,5 % потужності головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo за умови його роботи на навантаженні 85 % від номінальної потужності

$$\Delta N_{\text{e}}^{\text{ME}} = 0{,}85 \cdot 8050 \cdot 0{,}01 = 68{,}4 \text{ кВт},$$

$$\Delta N_{\text{e}}^{\text{ME}} = 0{,}85 \cdot 8050 \cdot 0{,}015 = 102{,}6 \text{ кВт};$$

де 8050 кВт – номінальна потужність дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo.

Втрата 1,0…1,5 % потужності двох допоміжних двигунів 6EY18ALW Yanmar за умови їхньої роботи на навантаженні 85 % від номінального

$$\Delta N_{\text{e}}^{\text{AE}} = 0{,}85 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 0{,}01 = 13{,}6 \text{ кВт},$$

$$\Delta N_{\text{e}}^{\text{AE}} = 0{,}85 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 0{,}015 = 20{,}4 \text{ кВт}.$$

де 800 кВт – номінальна потужність дизеля 6EY18ALW Yanmar.

Загальні втрати потужності у разі використання скруберної системи очищення випускних газів

$$\Delta N^{\mathrm{sc}} = N_{\mathrm{p}}^{\mathrm{sw}} + N_{\mathrm{p}}^{\mathrm{bw}} + \Delta N_{\mathrm{e}}^{\mathrm{ME}} + \Delta N_{\mathrm{e}}^{\mathrm{AE}}.$$

Залежно від втрат потужності головним двигуном 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo та допоміжними двигунами 6EY18ALW Yanmar діапазон загальних втрат потужності складає

$$\Delta N^{\mathrm{sc}}=232\ldots273 \text{ кВт}.$$

Відносні втрати потужності при використанні скруберного очищення випускних газів (порівняно з потужністю головного двигуна) можуть бути визначені за виразом

$$\delta_{SC}^{N} = \frac{\Delta N^{sc}}{N_e^{ME}} \cdot 100\%.$$

З урахуванням значень ΔN^{sc} та $N_{\mathrm{e}}^{\mathrm{ME}}$ отримаємо

$$\delta_{\mathrm{SC}}^{N}=2{,}92\ldots3{,}42\ \%.$$

Компенсація втрат потужність головним та допоміжними двигунами, а також забезпечення роботи додаткових насосів системи скруберного очищення (двох морської води та двох бустерних) призводить до додаткових витрат палива.

Для головного двигуна 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo ці втрати визначаються як

$$\Delta b_{\mathrm{e}}^{\mathrm{ME}} = b_{\mathrm{e}}^{\mathrm{ME}} \cdot \Delta N_{\mathrm{e}}^{\mathrm{ME}};$$

де $\Delta b_{\mathrm{e}}^{\mathrm{ME}}$ =0,175 кг/(кВт·год) – питома ефективна витрата палива головним двигуном на навантаженні 85 % номінальної потужності.

Для допоміжного двигуна 6EY18ALW Yanmar

$$\Delta b_{\mathrm{e}}^{\mathrm{AE}} = b_{\mathrm{e}}^{\mathrm{AE}} \cdot \left(\Delta N_{\mathrm{e}}^{\mathrm{AE}} + N_{\mathrm{p}}^{\mathrm{sw}} + N_{\mathrm{p}}^{\mathrm{bw}}\right);$$

де $\Delta b_{\mathrm{e}}^{\mathrm{AE}}$ =0,186 кг/(кВт·год) – питома ефективна витрата палива допоміжними двигунами на навантаженні 85 % номінальної потужності.

Враховуючи, що головний та допоміжні двигуни працюють на одному сорті палива, загальна витрата палива визначиться як

$$\Delta b_{\mathrm{e}}^{\Sigma} = \Delta b_{\mathrm{e}}^{\mathrm{ME}} + \Delta b_{\mathrm{e}}^{\mathrm{AE}}$$

та складе

$$\Delta b_{\mathrm{e}}^{\Sigma} = 0{,}175\left(68{,}4...102{,}6\right) + 0{,}186\left(\left(13{,}6...20{,}4\right) + 80 + 70\right) = 42{,}4...49{,}6 \text{ кг/год.}$$

Загальна витрата палива на роботу головного та допоміжного двигунів при їх експлуатації на навантаженні 85 % від номінальної потужності складає

$$B_{\Sigma}=0{,}175\cdot 0{,}85\cdot 8050+2\cdot 0{,}85\cdot 800\cdot 0{,}186=1450 \text{ кг/год.}$$

Відносне збільшення витрати палива при використанні скруберного очищення визначається як

$$\delta_{\mathrm{SC}}^{B} = \frac{\Delta b_{\mathrm{e}}^{\Sigma}}{B_{\Sigma}} \cdot 100\%$$

та складає

$$\delta_{\mathrm{SC}}^{B} = 2{,}92\ldots 3{,}42\ \%.$$

Збіг у значеннях δ_{SC}^{N} та δ_{SC}^{B} підтверджує правильність розрахунків та припущень Діаграма, що відображає відносні втрати потужності та збільшення витрати палива під час використанні скруберного методу управління екологічною безпекою, наведено на рис. 5.

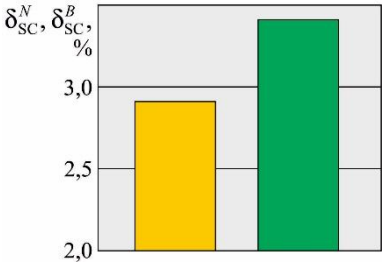


Рис. 5. Діапазон відносного збільшення втрат потужності та питомої витрати палива під час використання скруберного управління екологічною безпекою судна класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн

Під час проведення досліджень контролювалися та підтримувалися у необхідному діапазоні всі основні параметри роботи головного та допоміжних двигунів [24, 25], а також параметри в системах, які забезпечують їхнє функціонування [26-28].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Управління екологічною безпекою навігаційних переходів є одним із складових, які визначають роботу морського транспорту. Особливо актуальною є підтримка екологічної безпеки для районів Північної Європи, в яких створені спеціальні екологічні райони контролю викидів оксиди

сірки. Виконання міжнародних вимог щодо рівня емісії SO_X можливе шляхом додаткового очищення випускних газів. Ефективність використання методів управління екологічною безпекою може бути оцінена за екологічною стійкістю судна. Чим вище значення екологічної стійкості – тим на більшої відстані від максимально можливих значень емісії SO_X перебувають поточні значення емісії SO_X.

До недоліків методів керування екологічною безпекою відносяться втрати потужності дизеля, які пов'язані з додатковим аеродинамічним опором у газовипускній магістралі. Також вимагають додаткових витрат енергії додаткове обладнання, яке забезпечує функціонування систем очищення газів (насосів морської води та буферних насосів).

Економічна ефективність скруберного очищення випускних газів визначається можливістю використання в суднових дизелях палива, вміст сірки в якому досягає 3,5 %. Дані сорти палива (порівняно з паливом із вмістом сірки до 0,5 %) мають меншу вартість. Тому використання скруберного очищення випускних газів найбільше раціонально для морських суден з потужними енергетичними установками і, відповідно, підвищеною витратою палива.

На жаль, методи управління екологічною безпекою характеризуються додатковими ризиками та загрозами. Для системи скруберного очищення випускних газів – це робота з відкритого контуру, при якому вода зі скрубера зливаються за борт без додаткового очищення. Це зобов'язує виконувати постійний моніторинг та забезпечувати постійний контроль її кислотного числа.

Перелік використаних джерел

1. Madey, V. (2022). Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves, 2(1(64)),* 34-41. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959.

2. Gorb, S., Levinskyi, M., Budurov, M. (2021). Sensitivity Optimisation of a Main Marine Diesel Engine Electronic Speed Governor. *Scientific Horizons, 24(11),* 9-19. https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.

3. Sagin, S., Madey, V., Stoliaryk, T. (2021) Analysis of mechanical energy losses in marine diesels. *Technology Audit and Production Reserves, 5(2(61)),* 26-32.doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698.

4. Stoliaryk, T. (2022). Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics. *Technology Audit and Production Reserves, 5(1(67)),* 22–32. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868

5. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2021). Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal, 7-8,* 36-43. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43.

6. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O. (2023). Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 118,* 195-206. DOI: https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13.

7. Puškár, M., Tarbajovský, P., Lavˇcák, M., Šoltésová, M. (2022). Marine Ancillary Diesel Engine Emissions Reduction Using Advanced Fuels. *Journal of Marine Science and Engineering, 10,* 1895. https://doi.org/10.3390/jmse10121895.

8. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2018) The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines. *Naše more : International Journal of Maritime Science & Technology, 65(2),* 78-86. DOI 10.17818/NM/2018/2.3.

9. 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.

10. 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.

11. Rymar, T., Tatarchenko, H., Fomin, O., Píšťˇek, V., Kuˇcera, P., Beran, M., Burlutskyy, O. (2022). The Study of Manufacturing Thermal Insulation Materials Based on Inorganic Polymers under Microwave Exposure. *Polymers, 14,* 3202. https://doi.org/10.3390/polym14153202.

12. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. *Journal Marine Science and Engineering, 10(10),* 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.

13. Kuropyatnyk, O.A. (2020). Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines. *International Conference "Scientific*

research of the SCO countries: synergy and integration, 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689.

14. Sagin, S.V. (2019). Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines. *Materials of the International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration». Part 1,* 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.

15. Sagin, S., Karianskyi, S., Madey, V., Sagin, A., Stoliaryk, T., Tkachenko, I. (2023). Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines. *Journal of Maritime Science and Engineering, 11(1),* 120. https://doi.org/10.3390/jmse11010120.

16. Vorokhobin, I., Burmaka, I., Fusar, I., Burmaka, O. (2022). Simulation Modeling for Evaluation of Efficiency of Observed Ship Coordinates. *TransNav : The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 16(1),* 137-141. DOI: 10.12716/1001.16.01.15.

17. Sagin, S.V. (2020) 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», Part 4,* 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.

18. Ershov, M.A., Savelenko, V.D., Makhmudova, A.E., Rekhletskaya, E.S., Makhova, U.A., Kapustin, V.M., Mukhina, D.Y., Abdellatief, T.M.M. (2022). Technological Potential Analysis and Vacant Technology Forecasting in Properties and Composition of Low-Sulfur Marine Fuel Oil (VLSFO and ULSFO) Bunkered in Key World Ports. *Journal of Marine Science and Engineering, 10,* 1828. https://doi.org/10.3390/jmse10121828.

19. Ershov, M.A., Grigorieva, E.V., Abdellatief, T.M.M., Chernysheva, E.A., Makhin, D.Y., Kapustin, V.M. (2021). A New Approach for Producing Mid-Ethanol Fuels E30 Based on Low-Octane Hydrocarbon Surrogate Blends. *Fuel Processing Technology, 213,* 106688. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106688.

20. Huang, J., Fan, H., Xu, X., Liu, Z. (2022). Life Cycle Greenhouse Gas Emission Assessment for Using Alternative Marine Fuels: A Very Large Crude Carrier (VLCC) Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering, 10,* 1969. https://doi.org/10.3390/jmse10121969.

21. 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

22. Salova, T., Lekomtsev, P., Likhanov, V., Lopatin, O., Belov, E. (2023). Development of calculation methods and optimization of working processes of heat engines. *AIP Conference Proceedings, 2700,* 050015 https://doi.org/10.1063/5.0137793.

23. Ruiz Zardoya, A., Oregui Bengoetxea, I., Lopez Martinez, A., Loroño Lucena, I., Orosa, J.A. (2023). Methodological Design Optimization of a Marine LNG Internal Combustion Gas Engine to Burn Alternative Fuels. *Journal of Marine Science and Engineering, 11,* 1194. https://doi.org/10.3390/jmse11061194.

24. Sultanbekov, R., Denisov, K., Zhurkevich, A., Islamov, S. (2022). Reduction of Sulphur in Marine Residual Fuels by Deasphalting to Produce VLSFO. *Journal Marine Science and Engineering, 10,* 1765. https://doi.org/10.3390/jmse10111765.

25. Chountalas, T.D., Founti, M., Hountalas, D.T. (2023). Review of Biofuel Effect on Emissions of Various Types of Marine Propulsion and Auxiliary Engines. *Energies, 16,* 4647. https://doi.org/10.3390/en16124647.

26. Varbanets, R., Fomin, O., Píštěk, V., Klymenko, V., Minchev, D., Khrulev, A., Zalozh, V., Kučera, P. (2021). Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering, 9,* 321. https://doi.org/10.3390/jmse9030321 https://www.mdpi.com/2077-1312/9/3/321.

27. Gorb, S., Budurov, M. (2021). Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 6,* 18-26. DOI: https://doi.org/10.15866/ireme.v15i3.20865.

28. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Lohinov, O., Ocheretna, V. (2023). Integral Approach to Vulnerability Assessment of Ship's Critical Equipment and Systems. *Transactions on Maritime Science, 12(1).* doi: 10.7225/toms.v12.n01.002.

10.31653/smf47.2023.172-178

Сандлер А. К., Опришко М. О.

Національний університет «Одеська морська академія»

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЛОПАТЕВОГО АПАРАТУ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми в загальному вигляді. Стійка світова тенденція безперервного подорожчання видобутку й транспортування паливно-енергетичних ресурсів викликає інтенсивне зростання генеруючих потужностей з використанням альтернативних джерел енергії, що поновлюються. Безумовним лідером серед яких є вітроенергетика.

Аналіз розвитку вітроенергетичних установок (ВЕУ) дозволяє припустити, що до 2025 року частка вироблюваної вітрової енергії перевищить 15% від вироблюваної електроенергії, що становить половину від загального прогнозу використання альтернативних джерел.

Україна в 2020 р. мала порядку 100 МВт установленої потужності й перебувала на 30 місці у світі з виробництвом електроенергії за допомогою ВЕУ (менш 1%). Розвиток вітчизняних ВЕУ істотне відстає від світових тенденцій.

Існуюча в Україні "Комплексна програма будівництва вітрових електростанцій" передбачає проектування й технічну реалізацію нових ВЕУ. Але, у зв'язку з недостатнім фінансуванням, Україна суттєво відстає від закордонних країн у частині імплементації в енергетичну систему нових ВЕУ потужністю 1000 і більш кВт.

Проведений аналіз сучасного стану вітроенергетики дозволяє визначити її пріоритетні напрямки розвитку, а саме:

удосконалювання традиційної класичної схеми ВЕУ;

впровадження безмультипликаторної схеми ВЕУ.

У зв'язку з вищевикладеним, завдання раціональної побудови схеми перетворення вітрової енергії в електричну, а також підвищення потужності в одиниці з метою підвищення ефективності роботи ВЕУ з аеродинамічною мультиплікацією з використанням досягнень силової електроніки, створення нового встаткування, є актуальним науково-технічним завданням і має важливе наукове й практичне значення [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найважливіше значення для надійності, довговічності та ефективності ВЕУ мають значення величин граничних швидкостей вітру в зоні. Вони визначають прийняті розрахункові нормативи при проектуванні елементів установки на міцність, параметри автоматичних систем управління, аеродинамічні характеристики лопатей. Суттєвою характеристикою є вертикальний профіль вітрового потоку, тобто градієнт його швидкості по висоті в приземному шарі. Вплив поверхні на швидкість і напрям вітру зменшується в міру збільшення висоти. В наслідок чого швидкість вітрового потоку зростає, а поривчастість і прискорення зменшуються. Градієнт швидкостей має сезонний розподіл, який залежить від вертикального перепаду температур.

Відомі узагальнюючі формули для визначення швидкості вітру за вертикальною координатою. З них найбільш проста залежність для висоти від 5 м і вище має такий вигляд

$$v = v_{\text{ЛА}} \left(\frac{h}{h_{\text{ЛА}}} \right)^k ,$$

де $v_{\text{ЛА}}$ – швидкість вітру на висоті розташування осі лопатевого апарату;

$h_{\text{ЛА}}$ – висота розташування осі лопатевого апарату;

v – швидкість, обумовлена для висоти h;

k – степеневий показник.

Проблема полягає у виборі значень показника k, значення якого коливається у діапазоні 0,143 … 0,26. Але відомо, що при вимірах на різних висотах значення k досягають 0,34.

Ріст одиничної потужності ВЕУ й, як наслідок, ріст висоти осі лопатевого апарата вимагають певної точності у визначені завданні показника k, тому що некоректне значення k може привести до значної погрішності у визначенні середньорічної продуктивності ВЕУ.

Так, для V_o=6,0 м/с на висоті h_0 = 10 м при перерахуванні на висоту 50 м і використанні значень k = 0,12 або k = 0,167 у підсумку одержимо значення виробітку, що відрізняються на ~25% [4].

Таким чином доведено що, лопаті, які перебувають у різних шарах вітрового потоку та на різній відстані від поверхні, будуть випробувати різний силовий вплив. В наслідок чого, у роторної системі ВЕУ будуть відбуватися певні дисбалансі явища, які негативним чином вплинуть на роботоспроможність та довговічність установки.

Постановка завдання. Мета дослідження – вдосконалення лопатевого апарату вітрогенераторної установки, яка забезпечить регулювання вітрового навантаження на кожну лопать в залежності від її положення відносно вітрового шару, та у якому одночасно збережені надійність та простота схемотехнічних рішень апаратів відомих типів.

Викладення матеріалу дослідження. Відомий лопатевий апарат вітрогенераторної установки, що складається з маточини, в якої змонтовано нерухомі лопаті [5].

Суттєвим недоліком такого апарату є неможливість адекватно відстежувати та реагувати на зміну вітрового навантаження та нерівномірність навантаження на кореневу частину лопатей що знаходяться у різних шарах вітрового потоку. Як наслідок складність регулювання процесу генерації електроенергії та підвищене зношування механічної системи вітрогенераторної установки.

Найбільш близьким за технічною сутністю та результатом, що досягається, до винаходу, що пропонується є лопатевий апарат вітрогенераторної установки, що складається з маточини, в якої змонтовано механізм зміну кута атаки лопаті, і лопатей [6].

Основними недоліками застосування тільки механізму зміну кута атаки лопаті є:

- однаковий та одночасний вплив на кут атаки всіх лопатей, що унеможливлює врахування вітрового навантаження у кожного вітровому шарі;
- неможливість індивідуального корегування кута атаки кожної лопаті, бо це веде до ускладнювання механізму та зміни дискового співвідношення маточини та лопатей.

Поставлена задача вдосконалення лопатевого апарат вирішується тим, що лопатевий апарат ВЕУ, що складається з маточини, в якої змонтовано механізм зміну кута атаки лопаті, і лопатей, та який відрізняється тим, що кожна лопать має закрилок, який приводиться до дії п`єзоелектричним приводом, та азимутальний датчик вітру, що зв'язані з центральним процесором установки.

Суть запропонованого технічного рішення пояснюється кресленням (рис.1), де приведено структурну схему запропонованого піропатрону. У маточині 1 міститься механізм зміну кута атаки лопаті 2, до якого прикріплені лопаті 3. На кожної лопаті на рухомому з`єднані змонтовано закрилок 4, який має аеродинамічний профіль. Кожен закрилок має п`єзоелектричний привід 5, який змінює його просторове розташування відносно профілю лопаті. Кожна лопать також

обладнана азимутальним датчиком вітру 6, який має волоконно-оптичне виконання [7-12]. Сигнали від азимутального датчику вітру кожної лопаті надходять до центральний процесор установки 7, де опрацьовуються та перетворюються на керуючий сигнал для п`єзоелектричний привід закрилку.

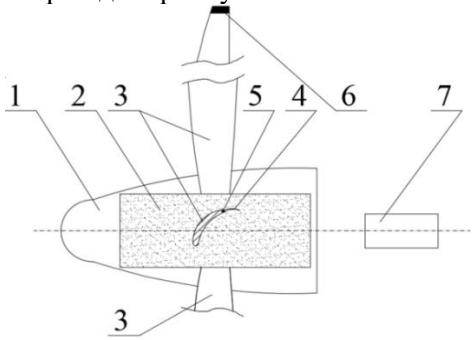


Рис. 1. Лопатевий апарат вітрогенераторної установки: 1 – маточина; 2 – механізм зміну кута атаки лопаті; 3 – лопать; 4 – закрилок; 5 – п`єзоелектричний привід закрилку; 6 – азимутальний датчик вітру; 7 – центральний процесор установки

У динамічному режимі робота закрилків полягає в тому, що при їхньому випуску збільшується кривизна профілю і площа поверхні лопаті, отже, збільшується й несуча здатність лопаті. Несуча здатність лопаті, що збільшилась, дозволяє сприймати вітрове зусилля в слабких вітрових шарах. Таким чином, використання закрилків дозволяє вибрати для кожної лопаті сумарну оптимальну величну профілю. Це дозволить вирівняти навантаження на кожну лопать, залежно від вітрового навантаження в кожному вітровому шарі й уникнути деструктивних деформацій у маточині та механізмі зміни кута атаки.

У статичному режимі п`єзоелектричні приводи максимально притискають закрилки до поверхні лопаті, яку механізм зміни кута атаки переводить у флюгерне положення.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Запропоноване схемотехнічне рішення лопатевого апарату ВЕУ завдяки застосуванню керованих закрилків лопатей забезпечить технічний ефект, який полягає у:

- можливості роботи при змінній частоті обертання ротора з максимальним к.к.д. без перетворювача частоти електричної енергії;

- застосуванні синхронного індукторного генератора з частотою обертання ротора 20 $с^{-1}$, замість традиційно застосовуваних асинхронних генераторів з частотою обертання 16 ... 25 $с^{-1}$;
- суттєвому зменшенні навантаження на кореневу частину всіх лопатей і маточину від крутного моменту, який дорівнює тиску аеродинамічних сил у кожному вітровому шарі;
- стабільності параметрів генеруючої електроенергії в умовах поривчастого вітрового потоку завдяки більш високому моменту інерції ротора і плавному регулюванню частоти обертів основного ротора;
- генеруванні електроенергії у робочому діапазоні швидкостей вітру 3,5 … 65 м/с;
- можливості сталої паралельної роботи як з промисловою мережею, так і з дизель-генераторною електростанцією.

Перелік використаних джерел

1. Немудрий І. Ю. Підвищення ефективності електромеханічної системи вітроелектричних установок з аеродинамічною мультиплікацією: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Державний ВНЗ "Національний гірничий університет". – Дніпропетровськ, 2015. – 22 с.

2. Тенденции развития ветроэнергетики и безмультипликаторные ветровые установки / Н. С. Голубенко, С. М. Довгалюк, А. М. Фельдман, В. А. Цыганов // Материалы IV международной конференции "Нетрадиционная энергетика XXI века". – Гурзуф, 2003. – С. 68-74.

3. Любас Д. Ветроэнергетика Украины: потенциал и перспективы развития. URL: electrician.com.ua/posts/1280.

4. Голубенко Н. С., Довгалюк С. И, Фельдман А. М., Худик В. Б. О зависимости скорости ветра от высоты с учетом рельефа местности. URL: https://electroavtosam.com.ua/forums/ download/file.php?id=1450.

5. Власов В. К. Ветроэнергетические установки. – К.: Инфра-Инженерия, 2012. – 316 с.

6. Основи вітроенергетики / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Нойбергер, Д. Ципленков. – Дніпро: Національний гірничий університет, 2015. – 335 с.

7. Заічко С. І., Сандлер А. К., Цюпко Ю. М. Схемотехнічне рішення азимутального датчику вітру // Судовождение. – 2015. – Вып. 26. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 93-98.

8. Сандлер А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05-06 листопада 2019 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2019. – С. 27-33. dx.doi.org/10.31653/2706-7874.

9. Сандлер А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.

10.Сандлер А. К., Логишев И. В., Сандлер А. А. Инвариантный волоконный акселерометр // Енергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – Одеса: ОНМА. – 2011. – С. 277-279.

11.Опришко М. О., Карпілов О. Ю., Сандлер А. К. Застосування новітніх матеріалів для створення елементів комбінованих електроенергетичних установок з вітрорушієм// XII міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 21.11.2022 - 23.11.2022 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2022. – С.169-173. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2022.11.1-203.

12.Сандлер А. К., Опришко М. О. Волоконно-оптичний датчик моніторингу стану гідротехнічних споруд// Технології, інструменти та стратегії реалізації наукових досліджень: матеріали V Міжнародної наукової конференції, м. Київ, 24 лютого, 2023 р. / Міжнародний центр наукових досліджень. – Вінниця: Європейська наукова платформа, 2023. – С. 166-171. DOI: 10.36074/mcnd-24.02.2023.

10.31653/smf47.2023.178-190

Сагін А.С.

Національний університет «Одеська морська академія»

КОРЕГУВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ ПАЛИВА ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ ПАЛИВ З РІЗНИМ ВМІСТОМ СІРКИ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Морський транспорт є ключовою складовою транспортної логістики, забезпечуючи вантажні потоки між країнами на різних континентах. Перевезення готової продукції, сировини, зерна, нафти та газу між Південною та Північною Америкою, Азією, Африкою та Європою неможливе без використання різних за вантажопідйомністю та призначенням морських суден. Сучасні морські судна обладнані двигунами внутрішнього згоряння, які є найпоширенішими тепловими двигунами та головним елементом енергетичних установок суден [1, 2].

Експлуатація двигунів внутрішнього згоряння суден морського та внутрішнього водного транспорту вимагає не лише забезпечення необхідної потужності та виконання вимог виробників, але й дотримання екологічних стандартів їх роботи. Основними екологічними показниками роботи суднових дизелів є концентрація оксидів сірки SO_X та оксидів азоту NO_X у випускних газах. їх значення визначаються відповідно до вимог Додатку VI Міжнародної конвенції MARPOL. Граничні значення викидів NO_X (які відповідають рівням Tier I, II або III) залежать від року побудови дизеля та його номінальної частоти обертання. Граничні значення викидів SO_X визначаються лише вмістом сірки в паливі [3-5].

З 01.02.2020 р. на суднах морського та внутрішнього водного транспорту заборонено використання морських видів палива з вмістом сірки понад 0,5 % за масою. Також визначено спеціальні екологічні зони з обмеженням викидів оксидів сірки (Sulfur Emission Control Areas – SECAs). У цих зонах дозволяється використання палива з вмістом сірки не більше 0,1 % за масою. Під час роботи суден у цих зонах або під час їх перетинання, суднові дизелі переводяться на експлуатацію саме на такі види палива. Цей перехід здійснюється поступово з урахуванням об'єму палива у витратної цистрерніму баку, вмісту сірки в паливі та експлуатаційної потужності дизеля [6-8].

Одна з головних труднощів, що виникає під час переведення дизелів на роботу з використанням палива з низьким вмістом сірки, полягає в наступному. Зменшення вмісту сірки в паливі призводить до зниження його густини, в'язкості, температури самозаймання та збільшення теплотворної здатності палива (через пропорційне збільшення вмісту водню та вуглецю в паливі) [9, 10]. За однакових умовах процесу впорскування, палива, які мають меншу температуру самозаймання та більшу теплотворну здатність, характеризуються вищою температурою в кінці згоряння T_z. Це обумовлюється зменшенням кута затримки самозаймання, збільшенням кута початку горіння та більшою ефективністю процесу згоряння у районі верхньої мертвої точки [11, 12]. За умови раннього самозаймання палива, підвищується кількість палива, яке згоряє до верхньої мертвої точки. Це призводить до збільшення швидкості згоряння палива та ступеня підвищення тиску під час згоряння:

$$\lambda = p_z / p_c ,$$

де p_z, p_c – максимальний тиск згоряння та тиск наприкінці стиснення, МПа.

Це явище найбільш негативно впливає на двотактні дизелі, які характеризуються збільшеною масою деталей механізму кривошипно-шатунного. У зв'язку з цим різко збільшуються ударні навантаження на крейцкопфні та мотильові підшипники. Визначення T_z шляхом вимірювань неможливе через динаміку зміни температури в циліндрі дизеля, тому для оцінки її значень використовують розрахункові моделі [13, 14]. Результати моделювання для дизелів фірми MAN-Diesel&Turbo з однаковим діаметром циліндра D, але різним ходом поршня S, наведені в таблиці 1.

Підвищення температури в кінці згоряння під час зміні палива призводить до кумулятивних ефектів, збільшуючи термічні навантаження на газові системи дизеля та збільшуючи емісію оксидів азоту. Виконання вимог Annex VI міжнародної конвенції MARPOL та перехід на низькосірчисте паливо в суднових дизелях підвищує ризики аварій, таких як збільшення динамічних навантажень, температурної напруги та емісії оксидів азоту [15-17].

Пропоновані різні методи розв’язання цих проблем, такі як використання стиснутого повітря для зниження динамічних навантажень, додатковий вприскування води для зменшення температурної напруги, використання різних технічних засобів для зменшення емісії ок-

сидів азоту. Проте ці методи знижують потужність дизеля та швидкість судна та вимагають значних фінансових та технічних витрат [18-20].

Таблиця 1. Результати моделювання

Дизель та його характеристики	Характеристики палива		Температура наприкінці згоряння, K
	вміст сірки, %	теплотворна здатність, кДж/кг	
K80ME	0,48…0,50	41580	1869
D=0,8 м,	0,4…0,45	41864	1878
S=2,3 м	0,05…0,09	42180	1896
L80ME	0,48…0,50	41596	1825
D=0,8 м,	0,4…0,45	41899	1839
S=2,592 м	0,05…0,09	42241	1858
S80ME	0,48…0,50	41695	1815
D=0,8 м,	0,4…0,45	41888	1836
S=3,056 м	0,05…0,09	42240	1851
G80ME	0,48…0,50	41595	1758
D=0,8 м,	0,4…0,45	41918	1762
S=3,72 м	0,05…0,09	42260	1788

В зв’язку з викладеним, метою дослідження було розробка методу керування ризиками аварійних ситуацій під час використання низькосірчистого палива в суднових дизелях, забезпечуючи відповідні енергетичні та екологічні показники роботи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктом дослідження є процес експлуатації суднових дизелів з використанням палива, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %. Дослідження проводилося на спеціалізованому морському судні для перевезення контейнерів. Як головний двигун на судні був встановлений судновий дизель 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo з наступними основними характеристиками:

діаметр циліндра – 0,8 м;

хід поршня – 2,3 м;

частота обертання вала – 104 об/хв;

кількість циліндрів – 8;

номінальна потужність – 35600 кВт.

Контроль параметрів роботи дизеля здійснювався за допомогою системи діагностики Doctor, що дозволяє визначати значення з точністю ±0,5 %. Викиди оксидів азоту з випускними газами визначалися за допомогою газоаналізатора від фірми Testo, при цьому похибка

вимірювань не перевищувала 0,5 %. Експлуатація дизеля поза зонами SECA виконувалася на паливі RMG380 з вмістом сери 0,48 %, а також на паливі RME180; в SECA – на паливі DMA з вмістом сери 0,055%. Основні характеристики палив, що використовувались під час експлуатації дизеля, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Основні характеристики суднових палив

Характеристика	RMG380	RME180	DMA
Вміст вуглецю, %	82,7	83,3	83,8
Вміст водню, %	10,6	10,7	11,1
Вміст сірки, %	0,48	0,42	0,055
Густина за 15 °С, кг/м^3	989	961	855
В’язкість за 50 °С, мм^2/с	380	380	12
Температура спалаху, °С	83	76	66
Температура самозаймання, °С	201	195	106
Теплотворна здатність, кДж/кг	41160	42010	42340

Досліджувалась робота дизеля 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo на різних видів палива, оцінюючи тиск згоряння p_z, температуру випускних газів t_g, концентрацію оксидів азоту NO_X та ступінь підвищення тиску під час згоряння λ. Результати дослідження надані на рис. 1.

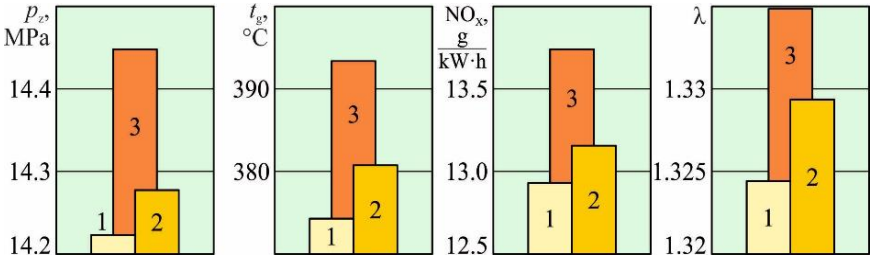


Рис. 1. Зміна показників роботи суднового дизеля 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo під час експлуатації на різних видах палива: 1 – RMG380; 2 – RME180; 3 – DMA

Проведені дослідження підтверджують тезис, що перехід суднових дизелів на паливо з меншим вмістом сірки призводить до збільшення навантажень і погіршення екологічних показників. Для управління цим вибрано регулювання фаз подачі палива зі зміною кута випередження впорскування палива [21, 22]. Оптимальні значення визначаються на стенді під час випробувань для номінального режиму роботи та основного палива. Технологія досліджень включала

переналаштування системи подачі палива для дизеля в SECA, зміну кутів випередження для окремих циліндрів. Контроль проводився для різних параметрів роботи.

Для циліндрів №№ 1 та 8 значення кутів випередження подачі палива (на яких відбувалася експлуатація дизеля при використанні палива RMG380) залишилося незмінним і становило -4° кута обертання колінчастого валу (crankshaft rotation angle – CRA).

Для циліндрів №№ 2, 3, 4, 5, 6, 7 встановлювались нові кути випередження подачі палива: -3, -2, -1, -1, -2, -3° CRA відповідно. Встановлення однакових кутів випередження подачі палива в двох циліндрах (в першому і восьмому, другому і сьомому, третьому і шостому, четвертому і п'ятому) збільшувало масив отриманих результатів, підвищувало точність вимірювань і давало можливість виконати коригуючі дії в разі їх розходження.

Під час дослідження для кожного з циліндрів контролювались максимальний тиск горіння p_z, тиск в кінці стиску p_c, середній індикаторний тиск p_i та температура випускних газів t_g. Для кожного з наведених параметрів розраховувалося середнє значення. Результати експериментів наведені в таблиці 3.

Для кращої візуалізації значень (давлення згоряння, тиску стискування, індикаторного тиску та температури випускних газів) побудовано номограми змін роботи дизеля за різних умовах налаштування паливної апаратури (рис. 2).

Важливо відзначити, що під час проведення експериментів значення контрольованих параметрів не перевищували встановлені, а концентрація NO_X у випускних газах залишалась нижчою від максимально допустимого рівня для дизелів Tier II за Annex VI MARPOL, що становить 14,4 г/(кВт·год) [7, 17, 23].

Наведені результати вказують на можливість управління ризиком аварій, пов'язаних з використанням палив із зниженим вмістом сірки, змінюючи кути випередження подачі палива [24-26].

Запас екологічної, температурної та динамічної стійкості суднових дизелів під їхнього переведення на паливо з пониженим вмістом сірки визначається наступними параметрами:

запас екологічної стійкості

$$\Delta NO_X = \frac{NO_X^{Tier} - NO_X^{i}}{NO_X^{Tier}} \cdot 100\%;$$

Таблиця 3. Результати експерименту

Параметр	Номер циліндра								Середнє значення
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Тиск згоряння, p_z, МПа	14,45	14,38	14,23	14,05	14,03	14,21	14,36	14,47	14,27
Відхилення від середнього значення, Δp_z, %	1,23	0,75	0,29	1,58	1,73	0,44	0,61	1,36	—
Тиск стиснення, p_c, МПа	10,82	10,78	10,77	10,78	10,76	10,82	10,8	10,82	10,79
Відхилення від середнього значення, Δp_c, %	0,29	0,07	0,17	0,08	0,26	0,29	0,11	0,29	—
Середній індикаторний тиск, p_i, МПа	1,995	1,987	2,012	2,02	1,996	1,985	2,014	2,018	2,00
Відхилення від середнього значення, Δp_i, %	0,42	0,82	0,43	0,82	0,37	0,93	0,53	0,72	—
Температура випускних газів, t_g, °C	394	388	382	378	375	385	390	394	386
Відхилення від середнього значення, Δt_g, °C	8	2	4	8	11	1	4	8	—
Ступінь підвищення тиску під час згоряння, λ	1,335	1,334	1,321	1,303	1,304	1,313	1,329	1,337	—
Емісія оксидів азоту з випускними газами, NO_X, г/(кВт·год)	13,75	13,62	13,21	12,82	12,85	13,12	13,51	13,88	—

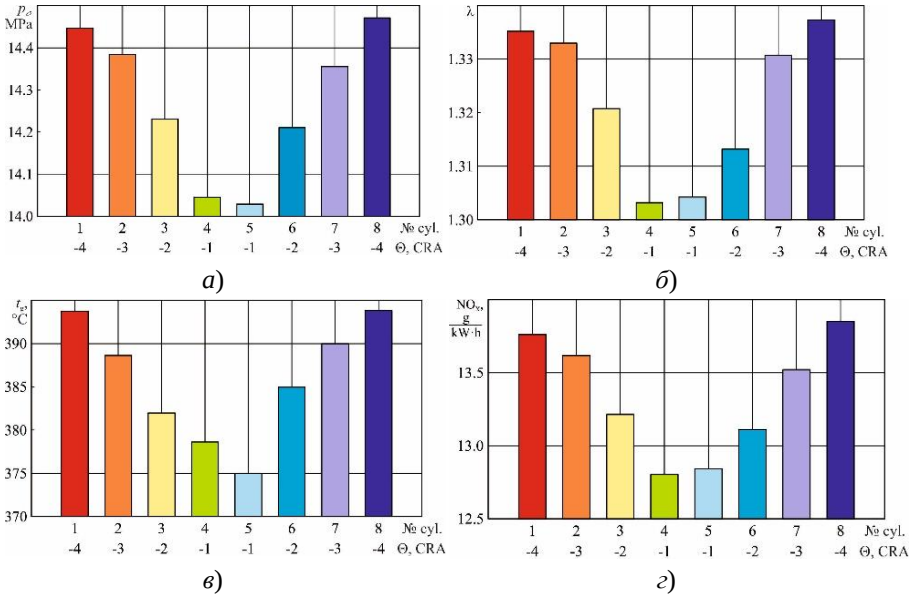


Рис. 2. Зміна показників роботи суднового двигуна 8K80MC-8.2-TII за різних кутів випередження подачі палива θ:
а – тиск при горінні; *б* – температура випускних газів; *в* – ступінь підвищення тиску під час згоряння; *г* – концентрація оксидів азоту в випускних газах

запас теплової стійкості

$$\Delta t_g = \frac{t_g^{max} - t_g^{i}}{t_g^{max}} \cdot 100\%;$$

запас динамічної стійкості

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^{max} - \lambda^{i}}{\lambda^{max}} \cdot 100\%;$$

де NO_X^{Tier} – максимальне значення викидів оксидів азоту відповідно до Додатку VI MARPOL;

t_g^{max}, λ^{max} – максимальні значення температури випускних газів та ступеня підвищення тиску під час згоряння, одержані на протязі експерименту;

NO_X^{i}, t_g^{i}, λ^{i} – відповідно, значення концентрації оксидів в випускних газах, температури випускних газів і ступеня підвищення тиску

під час згоряння в різних циліндрах дизеля, отримані під час експерименту [27, 28].

Отримані таким чином значення представлені в таблиці 4.

Таблиця 4. Визначення запасу стійкості дизеля

Показник	Кут повороту колінчатого валу / Crankshaft rotation angle							
	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	-4
Екологічна стійкість, %	4,51	5,42	8,26	10,97	10,76	8,89	6,18	3,61
Температурна стійкість, %	0,14	0,257	1,20	2,54	2,50	1,79	0,58	0
Динамічна стійкість, %	0	1,52	3,05	4,06	4,82	2,28	1,028	0

Для кращої візуалізації отримані результати подано у вигляді номограм на рис. 3

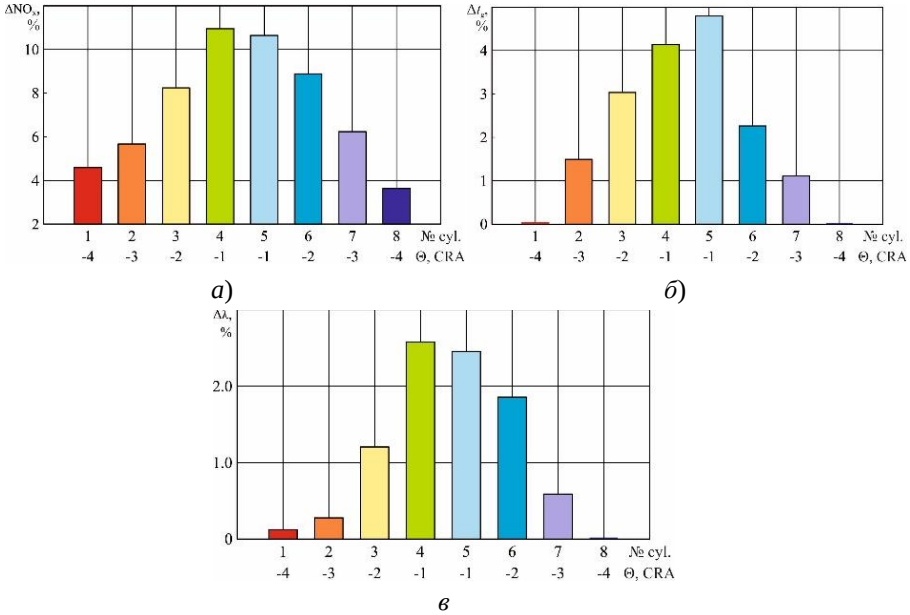


Рис. 3. Екологічна (*а*), теплова (*б*), динамічна (*в*) стійкість роботи суднового дизеля 8K80MC-8.2-TII за різних кутів випередження подачі палива θ

Проведення всіх експериментів було погоджено з технічним відділом судноплавної компанії, яка здійснює менеджмент судна та його енергетичної установки [29, 30].

Під час проведення експериментів контролювались та підтримувалися в рекомендованих діапазонах усі параметри роботи суднового дизеля 8K80MC-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo.

Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Перехід суден на паливо з низьким вмістом сірки, що не обхідно під час його експлуатації екологічних зонах SECAs, підвищує інтенсивність згоряння, навантаження на дизель та негативно впливає на екологічні показники, збільшуючи ризик аварій.

2. Використання перерегулювання паливної апаратури дизеля, зокрема зміни кутів подачі палива, може бути методом управління ризиками під час використання палива з низьким вмістом сірки.

3. Експерименти, що були виконані на дизелі 8K80MC-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo під час його переведення з палива RMG380 на паливо DMA підтвердили, що при цьому відбувається зниження тиску згорання, температури випускних газів, а також підвищується екологічна стійкість дизеля, що виявляється в зменшенні викидів оксидів азоту.

4. Практичне значення результатів проведених досліджень полягає у можливості їх використання як у двох, так і чотиритактних дизелях, які мають електронну систему управління упорскуванням палива.

Використання розробленого методу особливо актуально при знаходженні суден у особливих екологічних районах, кількість і межі яких постійно збільшуються та розширюються.

Перелік використаних джерел

1. Голіков В.А., Онищенко О.А. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 37. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 13-27.

2. 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.

3. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science and

Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.

4. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.

5. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72 - 80.

6. Мельник О.М., Онищенко О.А., Парменова Д.Г. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.

7. 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. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

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

9. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.

10. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.

11. Ратайчук О.В., Сагін С.В. Підвищення ефективності процесу наддува суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. - техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 15-19. DOI : 10.31653/smf341.2020.15-19.

12. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні

установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-142.

13. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса : ОНМУ. – С. 78-88.

14. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2011. – № 26. – Одесса : ОНМА. – С.116-125.

15. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч. - техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 79 - 89.

16. 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 Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

17. 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 and Technology. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

18. 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.

19. 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.

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

21. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : нау-

ково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

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

23. 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.

24. 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.

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

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

27. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.

28. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 93-110. doi: 10.31653/smf44.2022. 93-110.

29. 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.

30. Sagin S., Sagin A. 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. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.

10.31653/smf47.2023.191-196

Сандлер А. К.[1], Шестопалов К.О.[1], Єрін В. О.[2]

[1]Національний університет «Одеська морська академія»
[2]Технологічний університет Нінбо, КНР

ГЛИБОКА УТИЛІЗАЦІЯ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ СУДНОВИХ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми в загальному вигляді. У цей час у судновій енергетиці склалася напружена ситуація, обумовлена, рівною мірою, як дефіцитом та зростаючою дорожнечею вуглеводневого палива, так і незадовільної енергоэфективністю встаткування. Відповідно до цього проблема раціонального використання енергетичних ресурсів стає важливим стратегічним напрямком промислової політики України.

Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є розробка технологій глибокої утилізації теплоти вторинних об'єктів суднових енергетичних установок. Впровадження таких технологій дозволяє суттєво (на 10 … 15 %) підвищити ефективність використання теплового потенціалу палива й забезпечити його економію, а також поліпшити екологічну обстановку у світовому океані за рахунок зниження викидів у навколишнє середовище шкідливих речовин.

Розробка й впровадження теплоутилізаційних технологій сполучені з необхідністю рішення низки досить складних науково-технічних завдань. Утилізаційні технології, як правило, впроваджуються в процесі модернізації або реконструкції існуючих суднових енергетичних установок. При цьому вибір утилізаційної схеми суттєво залежить від стабільності річної потреби судна в певному виді низкопотенційного теплоносія, отриманого в процесі утилізації. У цьому випадку домінуючим критерієм ефективності є коефіцієнт використання палива, на основі якого обирається теплоутилізаційна схема [1].

У багатьох суднових компресорних установках (СКУ) можливість заощадження енергії шляхом її рекуперації значна, але найчастіше не використовується. У більшості випадків у ціні стисненого повітря витрати на енергію становлять практично 80%. У потужних СКУ можна рекуперувати до 94% енергії, що поставляється компресором. Це означає, що всі заходи щодо заощадження енергії характеризуються швидкою економічною віддачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для пошуку раціональних шляхів вдосконалення систем глибокої утилізації тепла проаналізовані існуючі системи відводу тепла СКУ.

Найбільш поширеною є система, яка містить повітряно-водяний охолоджувач, теплоносій з якого спрямовується на підігрів води для вторинних споживачів [2].

Недоліки пристрою, які обумовлені використанням повітряно-водяного охолоджувача:

– велика вартість охолоджувача;
– необхідність наявності охолоджувача на кожний компресор окремо;
– вихід із водних трубок сполучений з потраплянням води до робочих порожнин компресора та виходу його з ладу;
– складність ремонтно-відновлювальних робіт з підтримки охолоджувача у роботоспроможному стані.

Більшою мірою вільна від зазначених недоліків система, на основі зовнішнього охолоджувача з двох півциліндричних основ, які охоплюють зовні трубопровід з теплоносієм, та на усієї площі внутрішньої поверхні яких змонтовані первинні частини елементу Пельтьє з телуріду вісмуту, а на зовнішньої поверхні додаткові радіатори охолодження та вторинні частини елементу Пельтьє з германіду кремнію [3].

Недоліки системи, які обумовлені використанням виключно елементів Пельтьє полягають у такому:

– необхідність достатньо великих розмірів модуля для ефективного перетворення теплової енергії у електричну;
– необхідність великого теплоперепаду між теплоносієм та елементом Пельтьє;
– велика вартість охолоджувача на основі зазначеного модуля.

Постановка завдання. Мета дослідження – вдосконалення системи глибокої утилізації вторинних енергоресурсів СКУ, у якої виключено застосування води, як теплоносія, зменшена вартість та габарити теплоутилізуючих елементів та одночасно збережено простота та надійність відомих систем.

Викладення матеріалу дослідження. Поставлена задача вирішується тим, що система утилізації низькопотенційного тепла компресорних установок, яка складається з двох півциліндричних основ, що з’єднуються між собою еластичними фіксаторами, та на усієї площі внутрішньої поверхні яких змонтовані первинні частини

елементу Пельтьє з телуріду вісмуту, а на зовнішньої поверхні додаткові радіатори охолодження та вторинні частини елементу Пельтьє з германіду кремнію, які сполучені з первинними частинами металевими стрижнями та комутаційними пристроями для зв`язку з електромережою. Відмінність системи полягає у тому, що півциліндричні основи охоплюють "холодну" частину робочого циліндру двигуна Стірлінга, сполученого з електрогенератором, а "гаряча" частина циліндра двигуна міститься у внутрішній порожнині ресивера, до якого надходить стисле повітря для охолодження.

Суть системи пояснюється кресленням (рис.1), де зображено ресивер 9, у внутрішній порожнині якого міститься "гаряча" частина циліндру двигуна Стірлінга 8.

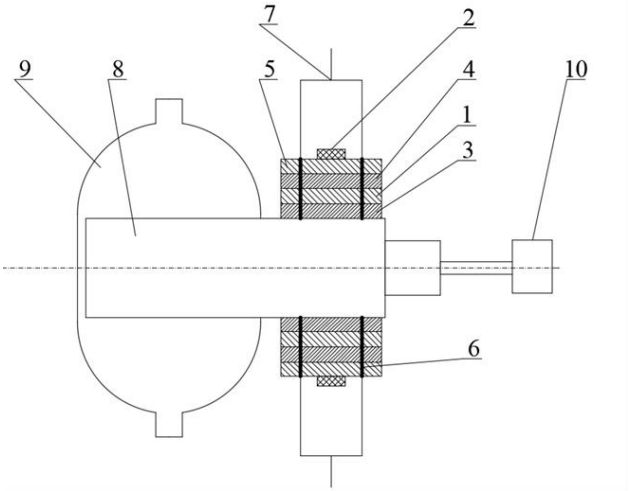


Рис.1. Система утилізації низькопотенційного тепла суднових компресорних установок: 1 – півциліндрична основа; 2 – еластичний фіксатор; 3 – первина частина елементу Пельтьє з телуріду вісмуту; 4 – додатковий радіатор охолодження; 5 – вторинна частина елементу Пельтьє з германіду кремнію; 6 – металевий стрижень; 7 – комутаційний пристрій; 8 – циліндр двигуна Стірлінга; 9 – ресивер; 10 – електрогенератор

"Холодну" частину циліндру двигуна Стірлінга охоплюють дві півциліндричні основи 1, що розташовуються на трубопроводах з теплоносіями й з’єднуються між собою еластичними фіксаторами 2.

На усієї площі внутрішньої поверхні основ змонтовані первинні частини елементу Пельтьє з телуріду вісмуту 3, а на зовнішньої поверхні додаткові радіатори охолодження 4 та вторинні частини еле-

менту Пельтьє з германіду кремнію 5. Первинні та вторинні частини сполучені металевими стрижнями 6. Контакти від усіх блоків елементів надходять до комутаційних пристроїв 7.

Коли стисле повітря з підвищеною температурою потрапляє до ресиверу відбувається нагрів робочого тіла у циліндрі двигуна Стірлінга та розпочинається робочий цикл. У ході робочих циклів, що повторюються, вал двигуна приводить до обертання ротор електрогенератора 10 та починається процес генерації електроенергії. Коли відбувається повне розширення робочого тіла у циліндрі, він пересувається у крайнє робоче положення, а робоче тіло заповнює увесь простір циліндра. На цьому етапі, для охолодження робочого тіла, застосовуються термоелементи у "холодній" частині циліндру [4, 5].

Коли в елементах Пельтьє 3 та 5 виникає градієнт температур, змонтованих на півциліндричних основах 1, то електрони у первинних елементах здобувають більш високі енергії й швидкості, чим на вторинних й концентрація електронів провідності росте з температурою. Частини сполучаються металевими стрижнями 6. Додатковий градієнт температури між частинами створюється за допомогою додаткових радіаторів охолодження 4. Еластичні фіксатори 2 використовуються для монтажу основ та термокомпенсації поширення матеріалу циліндру. Комутаційний пристрій 7 застосовується для електричного сполучення всіх елементів Пельтьє та зовнішніх електричних пристроїв.

У результаті виникає потік електронів від первинних до вторинних елементів й на вторинних накопичується негативний заряд, а на первинних залишається нескомпенсований позитивний заряд. Процес накопичення заряду триває до тих пір, доки різниці потенціалів, що виникла, не викличе потік електронів у зворотному напрямку, рівний первинному, завдяки чому встановиться рівновага. Після чого наступає сталий режим перетворення теплової енергії у електричну.

Таким чином здійснюється додаткова утилізація низькопотенційного тепла СКУ [6, 7].

Коли стисле повітря з підвищеною температурою потрапляє до ресиверу відбувається нагрів робочого тіла у циліндрі двигуна Стірлінга та розпочинається робочий цикл. У ході робочих циклів, що повторюються, вал двигуна приводить до обертання ротор електрогенератора та починається процес генерації електроенергії. Коли відбувається повне розширення робочого тіла у циліндрі, він пересу-

вається у крайнє робоче положення, а робоче тіло заповнює увесь простір циліндра. На цьому етапі для охолодження робочого тіла застосовуються термоелементи у "холодній" частині циліндру.

Коли в елементах Пельтьє виникає градієнт температур, змонтованих на півциліндричних основах 1, то електрони у первинних елементах здобувають більш високі енергії й швидкості, чим на вторинних й концентрація електронів провідності росте з температурою. Частини сполучаються металевими стрижнями 6. Додатковий градієнт температури між частинами створюється за допомогою додаткових радіаторів охолодження. Еластичні фіксатори 2 використовуються для монтажу основ та термокомпенсації поширення матеріалу трубопроводу з теплоносієм. Комутаційний пристрій застосовується для електричного сполучення всіх елементів Пельтьє та зовнішніх електричних пристроїв.

У результаті виникає потік електронів від первинних до вторинних елементів й на вторинних накопичується негативний заряд, а на первинних залишається нескомпенсований позитивний заряд. Процес накопичення заряду триває до тих пір, доки різниці потенціалів, що виникла, не викличе потік електронів у зворотному напрямку, рівний первинному, завдяки чому встановиться рівновага. Після чого наступає сталий режим перетворення теплової енергії у електричну.

Таким чином здійснюється додаткова утилізація низькопотенційного тепла компресорної установки.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Запропоноване схемотехнічне рішення системи утилізації вторинного тепла СКУ завдяки застосуванню сполучення двигуна з зовнішнім підводом тепла (двигуна Стірлінга) та термоелектричних елементів у напівциліндричних основах забезпечить технічний ефект, який полягає у:

– більш ефективному перетворення теплової енергії стислого повітря у електричну;
– більшої компактності системи;
– підвищенні якості функціювання за рахунок створення розгалужених систем з однотипних модулів.

Перелік використаних джерел

1. Ефимов А. В., Гончаренко А. Л., Гончаренко Л. В. Система глубокой утилизации теплоты газов, уходящих из котельных агрегатов. –Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 13(987). – С. 73-80.

2. Тигарев П. А. Справочник по судовым компрессорам. – Л.: Судострние, 1981. – 320 с.

3. Сандлер А. К., Цюпко Ю. М. Модуль для утилізації низькопотенційного тепла суднових енергетичних установок // Судовые энергетические установки. – 2015. – Вып. 35. – Одесса: ОНМА. – С. 163-169.

4. Organ A. J. (1992). Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine. Cambridge University Press. ISBN 0-521-41363-X.

5. Koichi Hirata (1998). Design and manufacturing of a prototype engine. National Maritime Research Institute. URL: https://www.nmri.go.jp/archives/ eng/khirata/stirling/docpaper/sekkeie.html.

6. Анатычук Л. И. Термоэлектричество: в 2 т./ Институт термоэлектричества. – Киев, Черновцы, 2003. – Т.2: Термоэлектрические преобразователи энергии. – 376 с.

7. Данчук Д. П., Доломанжи Г. Д., Сандлер А. К. Волоконна оптика в задачах технічного діагностування суднових компресорних машин// XII міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 21.11.2022 - 23.11.2022 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ"ОМА". – 2022. – С.160-164. DOI: 10.31653/2706-7874.SEEEA-2022.11.1-203.

10.31653/smf47.2023.197-205

Столярик Т.О.

Національний університет «Одеська морська академія»

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ПІД ЧАС РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАВДАНЬ З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Системний аналіз та системний підхід до розв'язання наукових завдань дозволяють оцінити всі чинники, що сприяють досягненню поставленої мети, та визначити оптимальні способи її досягнення [1, 2]. Визначення «система» належить до філософської категорії наукового пізнання, а комплекс допоміжних завдань, які потрібно розв'язати у будь-якому дисертаційному дослідженні, переводить це поняття у категорію складних систем. Під час розв'язання науково-прикладних завдань розглядаються складні системи, що складаються з великої кількості окремих елементів, які зокрема знаходяться між собою у взаємозв'язку та взаємодії [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження, що виконуються в Національному університеті «Одеська морська академія» зі галузі знань «Транспорт», базуються на фундаментальних розробках доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України В.А. Голікова, якій розробив та запропонував власну методологію наукових досліджень. Згідно з цієї методологією науково-прикладні дослідження повинні розвиватися на основі традиційного філософського методу сходження від «загального» через «часткове» до «особистого». Стратегією цієї методології є теза «…щоб уникнути односторонності в дослідженні об'єкту, необхідно врахувати всі суттєві сторони та зв'язки предмета …» [2].

До актуальності досліджень та постійної наукової затребуваності з проведення випробувань щодо забезпечення режимів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння відноситься наступне:

- системи мащення суднових дизелів (якими перш за все визначають циліндрові та циркуляційні) є основними системами, що забезпечують їх функціонування та надійність [5, 6];
- постійна (що характерно для допоміжних двигунів) або короткочасна (що характерно для головних двигунів) зміна навантаження та експлуатаційних режимів дизелів призводить до зміни наван-

таження на всі його конструктивні елементи, що знаходяться в поступальному або обертальному русі та до мащення яких подається моторне мастило [7, 8];

- погіршення умов мащення, або повна відсутність мастильного матеріалу між контактними поверхнями сприяє стрибкоподібному підвищенню механічних втрат та зростанню температурних навантажень, що може призвести до виникнення аварійних ситуацій та раптової зупинці дизелі, а іноді також до зупинці судна [9, 10];
- підтримання необхідних режимів мащення суднових дизелів та стабілізація експлуатаційних характеристик моторних мастил, що забезпечують процес мащення основних контактних елементів дизеля (а саме поршневих кілець та втулки циліндра, а також вкладишів підшипників та колінчатого валу) гарантують надійну роботу дизелів на всіх експлуатаційних режимах [11, 12].
- Запити практики щодо забезпечення режимів мащення дизелів суден річкового та морського транспорту пов’язані з необхідністю:
- підтримання енергетичних показників дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту відповідно до вимог інструкції з технічної експлуатації та гарантованих значень фірм-виробників;
- зниження енергетичних втрат під час отримання корисної роботи;
- виконання вимог класифікаційних товариств щодо технічного стану суднових двигунів внутрішнього згоряння.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення послідовності проведення наукових досліджень, що пов’язані з розв’язанням науково-прикладного завдання з підвищення ефективності експлуатації систем мащення суднових дизелів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Обов’язковою вимогою під час проведення наукових досліджень, пов’язаних з розв’язанням прикладних науково-технічних завдань, є необхідність урахування максимально можливої кількості причин та чинників, які спричиняють вплив на їхній результат. Одночасно з цим необхідно, щоб під час проведення випробувань на об’єкті дослідження виконувались такі вимоги:

1) неодноразовий збіг результатів експерименту;

2) можливість впливу на результати експерименту з боку оператора / дослідника.

Під час розробці способів керованого впливу на будь-якої процес система управління визначається як сукупність пов’язаних між собою елементів – об’єктів дослідження, цілій та завдань дослідження,

організаційних структур, методів та алгоритмів управління. Система управління характеризується цілісністю, впорядкованістю, здатністю до управління та іншими властивостями елементів та підсистем, які відображають особливості об'єкту управління та методів управління. З метою аналізу та дослідження систем управління широкого поширення набули методи системного аналізу та теорії прийняття рішень.

Системний аналіз в теперішній час широко застосовується в теорії та практики наукових досліджень.

Під час системного аналізу та управління в умовах повної визначеності виникає завдання формування та обробки оцінок варіантів різноманітних моделей на підставі методів оптимізації. Ці методи дозволяють скласти опис моделі функціонування різних об'єктів та систем на підставі великої кількості узагальнених експериментальних даних та теоретичних розробок, а також обрати оптимальні механізми управління цими об'єктами [13].

Що до окремої галузі знань «транспорт» та напрямку «морський та внутрішній водний транспорт» методи системного аналізу доводиться використовувати в умовах невизначеності. В цьому випадку суттєво значення приймає розробка методів керованого впливу та прийняття рішень в умовах повної або часткової відсутності інформації. Під час проведення прикладних наукових досліджень та виконання інженерних розробок від правильності прийняття рішень залежить дуже багато характеристик, показників та параметрів – надійна роботи енергетичних об'єктів та обладнання, здатність систем керованого впливу виконувати своєчасні управляючі дії, безпека та живучість транспортних засобів. Тому усвідомлене розв'язання завдань з управління енергетичними об'єктами неможливо без певного «узагальненого підходу» до накопичених фактів, що вимагає застосування адекватних методів. До таких методів відносяться методи прийняття рішень, тобто методи, що використовуються під час відсутності повної інформації о перебігу досліджуваного процесу, для якого необхідно прийняти рішення на підставі обробки експертних оцінок, аналітичних методів або експериментальних даних. При цьому переважними стають саме масиви експериментальних даних, які отримані під час експлуатації енергетичних об'єктів за умов різних внутрішніх та зовнішніх навантажень та збурень, а сукупність масивів експериментальних даних може бути підставою для розробки систем керованого впливу на об'єкти з умовою забезпечення оптимізації та раціоналізації управляючих дії.

Базисом методів аналізу та дослідження систем управління є принцип ідеалізації як процес створення ідеальних об'єктів шляхом зміни властивостей реальних об'єктів дослідження. Ідеалізовані властивості систем управління та створення керованого впливу на досліджувані процеси та об'єкти формалізуються в вигляді комплексу системно-аналітичних технологій , до складу яких входять філософські, математичні, фізичні, хімічні та інші технології, адекватні моделі та методи системного аналізу та прийняття рішень [14].

Важливими елементами наукового дослідження є підходи, що засновані на декомпозиції та агрегатуванні. Щодо науково-прикладних завдань як декомпозицію розуміють аналітичний, числовий або експериментальний метод дослідження на підставі поділення складного цілого (системи, підсистеми та ін.) на більш прости складові, використовуючи для цього певні критерії; як агрегатування – метод на підставі поєднання декількох завдань в єдине завдання.

Стосовно наукових досліджень, що спрямовані на розв'язання завдань з підвищення ефективності експлуатації систем мащення суднових дизелів, декомпозицію процесу мащення виконують за:

- класифікаційними ознаками, до яких відносять типи систем мащення суднових дизелів, а саме – циркуляційні та циліндрові;
- реологічними ознаками, до яких відносять режимі мащення, а саме – гідродинамічний та граничний;
- функціональними ознаками, за які приймають енергетичні та екологічні показники роботи дизелів, а також експлуатаційні показники моторних мастил.
- Агрегатування процесу мащення виконується за:
- енергетичними та екологічними показниками роботи дизелів суден морського транспорту;
- експлуатаційними показниками моторного мастила, що використовуються в системах циркуляційного та циліндрового мащення дизелів суден морського транспорту.

В системному аналізі широко застосовуються тріадні моделі, що включають до свого складу постановку завдань або цілій, засобів та результатів. Як древо цілій в цьому випадку розуміють структуровану та побудовану за принципом ієрархії та ранжирування за рівнями сукупність цілій системи, програми та плану дослідження в якої визначені головне завдання («вершина древа»), підпорядковані їй допоміжні завдання («гілки дерева»). Древо засобів визначається як ієрархічну сукупність засобів, погоджено розподілених за рівнями ієрархічної або іншої структури системи управління досліджуваними

процесами. При цьому можливо завдати оператор управління або сукупність операторів управління, які дозволяють забезпечити досягнення необхідних цілій. Древо результатів визначається з масиву отриманих під час дослідження значень досліджуваних показників, при цьому за допомогою методів математичної статистики та з урахуванням попередніх граничних умов, з цієї множини виключаються значення, відхилення яких перебільшують завдані межі, але при цьому не є критичними для забезпечення функціонування об'єкту дослідження [15].

Системно-аналітичні технології можливо сформулювати як основні методологічні прийоми, які цілеподібно використовувати під час розв'язання завдань системного аналізу. Використання методів системного аналізу під час прийняття рішень в умовах невизначеності вимагає розробки методів та формулювання алгоритмів / схем обробки варіантних експертних оцінок відповідно до різноманітних критеріїв.

Як древо цілій визначаються головне завдання наукового дослідження, допоміжні завдання наукового дослідження та наукове положення.

Як древо засобів приймаються експериментальні дослідження, що виконуються в наукових лабораторіях, а також на морських суднах різного призначення та дедвейту.

Як древо результатів погоджуються наукові результати, що отримують під час розв'язання допоміжних завдань наукового дослідження та результат розв'язання головного завдання наукового дослідження [16].

Системний аналіз передбачає розділення завдання / проблеми на допоміжні завдання / підпроблеми з їх наступним розглядом, вивченням та розв'язанням. Системний аналіз включає до свого складу декілька основних принципів.

1) *Структурний принцип*. Цей принцип передбачає розгляд основного та допоміжних завдань з позиції повного збереження якісних характеристик всій системи в цілому. При цьому необхідно забезпечувати повноту аналізу завдання / проблеми, щоб уникнути втрати якісних або кількісних властивостей під час розділення (декомпозиції) або поєднання (агрегатування) частин цілого.

2) *Взаємозв'язок та узгодженість допоміжних завдань* / підпроблем необхідна для обліку всіх властивостей цілого, що було поділено на окремі частки. Зазвичай властивості часток ви-

значаються відповідними характеристиками або параметрами, властивості зв'язків визначають умови для досягнення цілій або виконання обмежень. Взаємні зв'язки сприяють утворенню відповідних принципів обліку під час управління:

- принцип узгодження взаємодій;
- принцип розділення взаємодій;
- принцип прогнозування взаємодій.

3) *Принцип цілепокладання та обмеження*. Цілепокладання відносно головного завдання / головної проблеми та допоміжних завдань / підпроблем є важливим принципом, що обумовлює необхідність завдання цілі під час виконання системного аналізу. Задані цілі, а також множини цілій в випадку розгляду допоміжних завдань / підпроблем дозволяють усвідомити сутність розв'язання головного завдання / головної проблеми, обмеження та спрямованість в прийнятті рішень. Цілі та обмеження – головні категорії принципу цілепокладання та обмеження [17].

Розв'язність головного завдання / головної проблеми, а також допоміжних завдань / підпроблем – важливий принцип системного аналізу, якій передбачає необхідність розгляду питання щодо існування розв'язання до початку розв'язання завдання / проблеми. Дуже важливо розв'язати проблему існування рішення в випадку використання принципів та методів системного аналізу. Природно, що в випадку декомпозиції та агрегатування проблема аналізу розв'язності приймає специфічні форми, для яких повинні бути застосовані відповідні методи.

4) *Принцип допустимості, раціональності та оптимальності*. Цей принцип дозволяє аналізувати проблеми, виходячи з досягнення все більш складних цілій та завдань. Однак, при цьому на першому етапі важливо сформулювати умови допустимості для того або іншого розділення проблеми на підпроблеми.

Досягнення оптимальності на завжди є можливим на практиці, тому в такій ситуації слід мати на увазі, що конструктивним (з погляду оптимальності) часто буває забезпечення раціональності, чи іншими словами прийнятності рішень. Раціональне (прийнятне) рішення, що володіє забезпечує властивості під час зміни зовнішніх чи внутрішніх умов, буває переважним оптимальному, яке не забезпечує ці властивості.

5) *Принцип орієнтації на якісний результат*. Цей принцип дозволяє визначити якісні властивості проблеми або підпроблеми та спрямувати процеси аналізу або синтезу в потрібний напрямок.

6) *Принцип ідентифікації узгодженості цілій – засобів – результатів*. Ідентифікація необхідна для забезпечення коректності схеми прийняття рішень. В іншому випадку можуть розглядатися неузгоджені елементи, коли цілі не відповідають засобам, або засоби неузгоджені з цілями. В деяких випадках можливі наступні ситуації:

- відповідність цілій засобам, які потрібно ідентифікувати;
- відповідність засобів неоголошеним цілям, які необхідно ідентифікувати для забезпечення коректності схеми прийняття рішень з обліком ідентифікованих цілій;
- ситуації неузгодженості, які піддаються ідентифікації або формуванню варіантів цілій та засобів.

7) *Принцип стабільності та мінливості*. Властивість активних систем – висока стабільність, яка досягається не жорсткими, а гнучкими нелінійними оборотними зв'язками. Завдяки цим зв'язкам, або керованого впливу, активні системи набувають стабільність в процесі простійних змін, оскільки зберігають себе як ціле шляхом адаптації до зовнішніх умов через зміну складових елементів та взаємодій.

Висновки. Розв'язання науково-прикладних завдань з підвищення ефективності експлуатації систем мащення суднових дизелів неможливо без використання системного підходу, за допомогою якого вдається визначити всі фактори, що впливають на перебіг досліджуваних процесів, всі методи, що дозволяють досягти мети дослідження, всі результати, які характеризують перебіг та зміну параметрів в об'єкті дослідження.

Використання системного підходу / аналізу особливо актуально для досліджень, що виконуються за науковим напрямком «Транспорт», під час розгляду, вивчення та управління багатокомпонентними енергетичними об'єктами, стійкість, надійність та безвідмовність яких забезпечується лише за умовою визначення та врахування всіх факторів, що впливають не їх енергетичні, економічні та екологічні показники роботи.

Перелік використаних джерел

1. Голіков В.А., Онищенко О.А. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції,

методи, технології // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 37. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 13-27.

2. Голіков В.А., Козьміних М.А., Онищенко О.А. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник. – Одеса : Одес. нац. мор. академія, 2014. – 164 с.

3. Грищук Ю.С. Основи наукових досліджень. – Харьків : Нац. техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут», 2008. – 232 с.

4. Голіков В.А., Голіков В.В., Онищенко О.А. Використання технологій методології науки у дослідженнях морського та внутрішнього водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 5-14. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.01.

5. 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.

6. 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.

7. Богом'я В.І., Бажак О.В. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорта на безвідмовність // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.д

8. Звєрьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

9. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

10. Сагин С. В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.

11. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристен-

ных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса : ОНМУ. – С. 78-88.

12. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

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

14. Столярик Т.О. Прогнозування механічних втрат в суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 142-156. doi: 10.31653/smf44.2022.142-156.

15. Столярик Т.О. Вдосконалення процесів мащення дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 57-69. DOI : 10.31653/smf45.2022. 57-69.

15. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки : сборник научных статей. – 2010. – Вып. 26. – Одесса : ОНМА. – С. 116-125.

16. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. Зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 -100.

17. Столярик Т.О. Прогнозування якісних характеристик роботи си-стем 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.

10.31653/smf47.2023.206-216

Огурцов Д.В., Козьміних М.А., Хлієва О.Я.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІННИКА У СУДНОВІЙ ХОЛОДИЛЬНІЙ МАШИНІ ПРОВІЗІЙНИХ КАМЕР ПРИ ЇЇ ПЕРЕВЕДЕННІ З ХОЛОДОАГЕНТУ R404A НА R407F

Постановка проблеми в загальному вигляді. Суднові парокомпресійні холодильні машини споживають суттєву кількість електроенергії, що виробляється на судні. Підвищення їх енергетичної ефективності є пріоритетним напрямком. Ще однією проблемою, яка постає сьогодні перед виробниками суднової холодильної техніки – це переведення її на холодоагенти з низьким потенціалом глобального потеплення. Зрозуміло, що питання переводу суднових холодильних машин на альтернативні холодоагенти та впровадження технічних рішень з підвищення їх енергетичної ефективності потрібно вирішувати одночасно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переохолодження рідкого холодоагенту після конденсатора є перевіреним і надійним способом підвищення холодопродуктивності та ефективності парокомпресійних холодильних машин та систем кондиціювання повітря. С точки зору другого закону термодинаміки, переохолодження рідини знижує втрати на дроселювання, що виникають під час ізоентальпійного розширення.

На рис. 1 схематично зображений холодильний цикл парокомпресійної холодильної машини без переохолодження та з переохолодженням. Показано, що за рахунок переохолодження зовнішнім споживачем теплоти (тобто, не в регенератному теплообміннику (РТО) на лінії всмоктування) можна досягти більшої питомої холодопродуктивності q_0 без збільшення роботи стиснення у компресорі w.

Переохолодження сконденсованої (насиченої) рідини в холодильному циклі використовується для забезпечення однієї (або відразу кількох) наступних завдань [1]:

- Підвищення ефективності холодильного циклу.

- Переохолодження рідини є єдиним методом подолання втрати тиску в рідинній лінії, що гарантує наявність рідини в розширювальному пристрої випарника [2]. Якщо переохолодження недостатньо, у

рідинній лінії відбувається скипання холодоагенту та знижується ефективність роботи усієї системи.

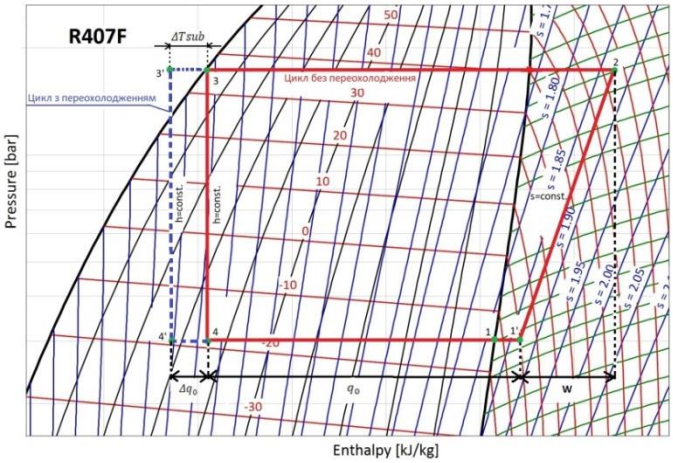


Рис. 1. Схематичне зображення циклу з переохолодженням холодоагенту після конденсації, та без переохолодження в P-h діаграмі, тут q_0 – питома холодопродуктивність, Дж/кг; w – питома адіабатна робота стиснення пара в компресорі, Дж/кг

Технології переохолодження холодоагенту наступні [3-6]:

- переохолодження за рахунок теплообміну з теплоносієм, що відводить теплоту конденсації;
- переохолодження парами холодоагенту після випарника з використанням теплообмінника на лінії всмоктування (РТО);
- використання теплообмінника із «зовнішнім» теплоносієм;
- переохолодження за рахунок підводу механічної роботи у цикл.

Розглянемо послідовно усі відзначені підходи стосовно їх застосування у суднових холодильних машинах торгівельних суден.

Традиційно в суднових холодильних машинах використовують кожухотрубні конденсатори з водяним охолодженням. Відомо [1], що ступінь переохолодження конденсату, що забезпечується поверхнею конденсації кожухотрубного конденсатора, невелика, зазвичай менше 1 К. Якщо потрібно більше переохолодження, його можна отримати, зануривши трубки в нижній частині пучка в конденсат. Якщо конденсатор багатоходовий, то у перший прохід слід включити трубки переохолодження, щоб отримати доступ до найбільш холодної води. Тепло при цьому передається від конденсату до води го-

ловним чином за рахунок природної конвекції, тому ефективність переохолодження не буде високою. Для інтенсифікації процесу теплопередачі можна застосовувати конденсатори спеціальної конструкції, але вони дорожчі і в них відбувається втрати тиску рідини, що переохолоджується, що може нівелювати очікуваний ефект [1].

РТО знайшов широке застосування у парокомпресійних холодильних машинах. Ефективність термодинамічного циклу деяких галогенвуглеводневих холодоагентів можна підвищити, перегріваючи газ, що всмоктується, за рахунок переохолодження рідини після конденсатору [2]. За деякими оцінками [1], величина COP зазвичай збільшуються на 0.9 % на кожен 1 K переохолодження. Однак цей ефект залежатиме як від холодоагенту, так і від параметрів циклу. Крім того, підвищення ефективності необхідно обов'язково оцінювати з урахуванням впливу падіння тиску на стороні всмоктування в компресор (гідравлічні втрати по парі), що призводить до роботи компресора при нижчому тиску всмоктування і до збільшення споживаної ним потужності. Тобто робота циклу *w* (рис. 1) вже буде відрізнятись від роботи циклу без перереохолодження. Теплообмінники рідина-пар (РТО) найбільш вигідні за низьких температур всмоктування [2]. Збільшення ефективності циклу для систем, що працюють у діапазоні кондиціювання повітря (до температури випаровування приблизно –1 °C), зазвичай не виправдовує їх використання [2]. Але так як РТО є доволі простим та не коштовний варіантом, його завжди слід розглядати для підвищення ефективності суднової холодильної машини.

Використання теплообмінника із «зовнішнім» теплоносієм доцільно для холодильних машин великої потужності з урахуванням наявності такого теплоносія з температурою меншою, ніж температура теплоносія, що охолоджує конденсатор середовища. Це може бути вода з артезіанської свердловини, або вода після градирні. Зрозуміло, що для суднової холодильної техніки застосування такого підходу ускладнено.

Переохолодження з підводом роботи у цикл може бути недоцільним, тому його впровадження потрібно аналізувати у кожному конкретному випадку. Існує декілька технічних рішень для його використання [2, 3]. Але це рішення завдяки додатковим капіталовкладенням на даному етапі дослідження розглядати не будемо.

Постановка завдання. Метою дослідження є розгляд деяких технічних рішень з підвищення енергетичної ефективності суднової

холодильної машини провізійних камер, які базуються на забезпеченні раціонального переохолодження рідкого холодоагенту.

Для вирішення поставленої мети було сформульовано наступні задачі:

- термодинамічний аналіз доцільності застосування РТО на лінії всмоктування при переведенні холодильної машини провізійної камери з холодоагенту R404A на R407F;

- розгляд та вибір можливого технічного рішення з використанням РТО у циклі холодильної машини провізійної камери на R407F, яке забезпечить більш високе значення холодильного коефіцієнту, ніж РТО на лінії всмоктування;

- термодинамічний аналіз доцільності впровадження обраного технічного рішення підвищення енергоефективності суднової холодильної машини провізійних камер.

Виклад основного матеріалу дослідження. Спрощена базова схема холодильної установки провізійних камер зображена на рис. 2. Її особливістю є три випарника з різним рівнем температур, які працюють на один компресорно-конденсаторний агрегат (у судновому виконанні використовують два однакових компресорно-конденсаторних агрегати, які працюють переважно поперемінно).

Характеристика приміщень, що охолоджуються холодильною системою, яка прийнята для аналізу, наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Характеристика приміщень, що охолоджуються судновою холодильною системою, прийнятою для аналізу

№	Відділення	Об’єм	Температура зберігання
1	Відділення для м’яса	20 м^3	-18 °С
2	Відділення для риби	15 м^3	-18 °С
3	Відділення для овочів/фруктів	30 м^3	+4 °С
4	Відділення для «сухої» продукції	35 м^3	+12 °С
Сума		110 м^3	

Відповідно до табл. 1 для побудови циклу було прийняте:

- температура кипіння холодоагенту в випарнику камери з температурою +12 °С прийнята t_{03}= +2 °С;

- температура кипіння холодоагенту в випарнику камери з температурою +4 °С прийнята t_{02}= -6 °С;

- температура кипіння холодоагенту в випарнику камери з температурою -18 °С прийнята t_{01}= -26 °С;

- температура конденсації $t_к$= 38 °С.
- об’ємна продуктивність компресора V_h = 0.0020 м^3/с.

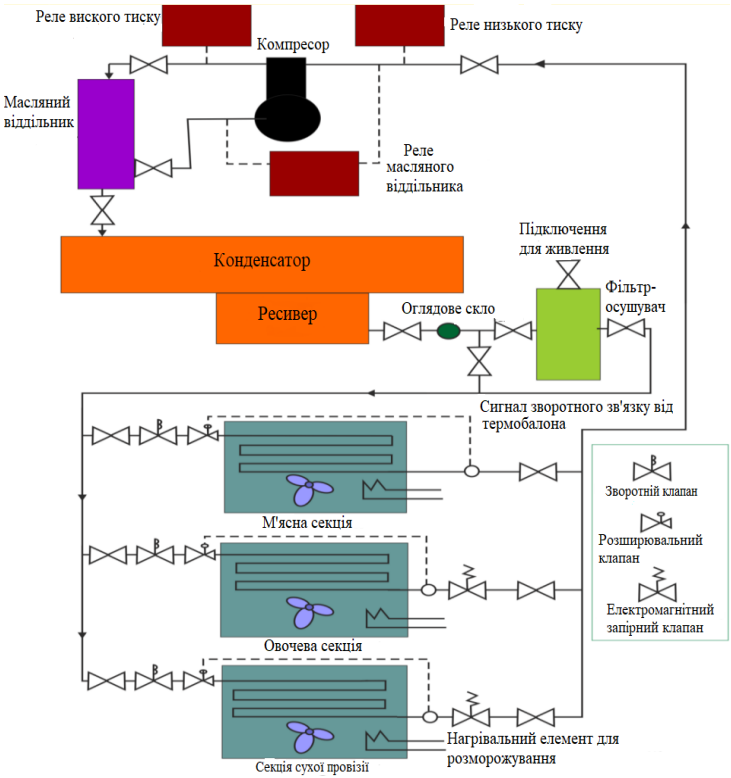


Рис. 2. Базова схема холодильної системи провізійних камер (три рівня температур кипіння) з основними елементами [7]

В якості холодоагенту у прийнятої для аналізу холодильній машині використовується R404A, який має GWP=3940 [10]. У зв’язку з сучасними тенденціями переводу суднового холодильного обладнання на холодоагенти з GWP менш ніж 2000 [8, 9], було розглянуто можливість використання холодоагенту R407F, який має GWP=1670 [10], та рекомендований саме для суднового застосування [8, 9].

Для подальшої побудови термодинамічного циклу та розрахунку його енергетичних характеристик було визначено в яких масових співвідношеннях розділяються потоки рідкого холодоагенту після конденсатора для подальшого дроселювання до тиску у відповідному випарнику. З урахуванням об’ємів камер та температур в них

співвідношення між потоками холодоагенту прийнято: 22 % (для випарника камери з t_{03}= +2°C): 26 % (t_{02}= -6°C): 53 % (t_{01}= -26°C).

Зазвичай в схемі холодильної машини провізійних камер передбачено РТО на лінії всмоктування. Але, як було сказано віще, його ефективність залежить від багатьох факторів. Проаналізуємо холодильний коефіцієнт COP суднової холодильної машини провізійних камер при різних ступенях переохолодження рідини в РТО. Використовувалася стандартна методика [10] розрахунку параметрів термодинамічного циклу та енергетичних характеристик холодильної машини, з урахуванням ізоентропного ККД компресора, та його коефіцієнта подачі. Параметри стану холодоагенту в вузлових точках циклу визначалися за допомогою бази даних RefProp 10.0 [11]. Схематичне зображення циклу з РТО наведено на рис. 3.а.

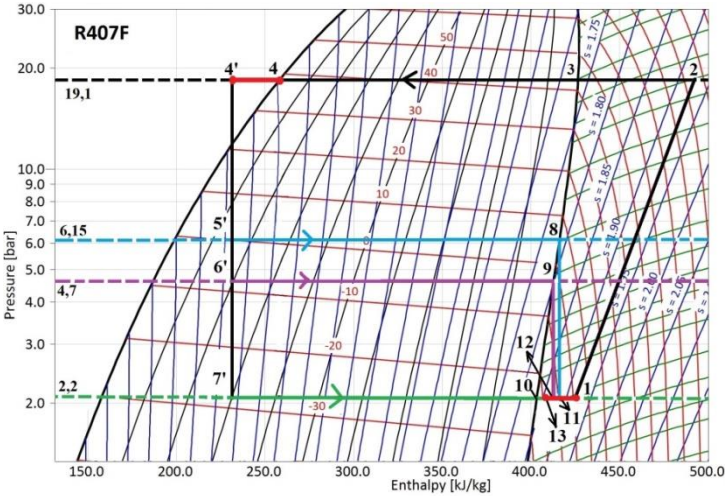
За результатами аналізу для циклу, що зображений на рис. 3.а, було отримане незначне збільшення холодильного коефіцієнту з 1.776 до 1.802 при переохолодженні рідини в РТО на 9 К. При цьому перевірка температури кінця стиснення в компресорі показала недопустиме її збільшення зі 102 до 127 °C. Тому був зроблений висновок о недоцільності застосування стандартного РТО на ліній всмоктування.

З урахуванням особливостей термодинамічного циклу холодильної машини провізійних камер (три рівня тисків в випарниках) було прийняте рішення розглянути можливість застосування для переохолодження рідини парів з випарників середне- та високотемпературного рівня – рис. 3.б. Міркування авторів при виборі такого технічного рішення були наступними:

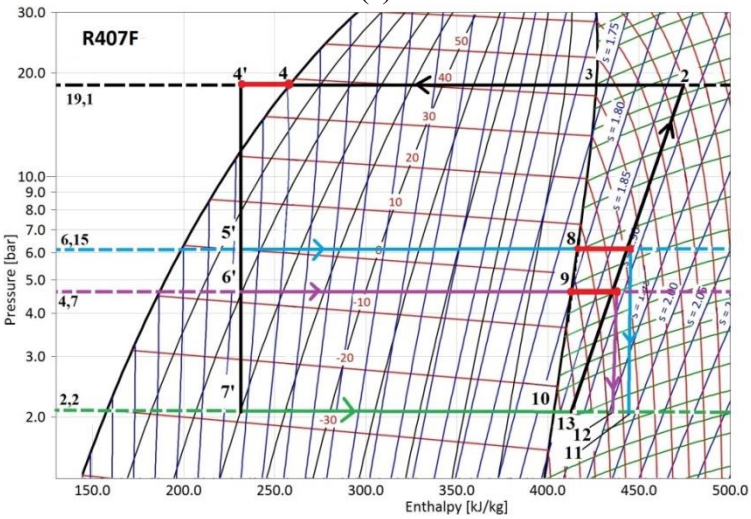
- на отримання холоду на рівні низькотемпературного випарника витрачається більше енергії, ніж на середне- та високотемпературному рівні, тому «виведення» з РТО потоку пара з низькотемпературного випарника призведе до підвищення загального COP;

- втрати тиску парів з середне- та високотемпературного випарників не обмежуються, тому що після їх нагріву за рахунок переохолодження рідини їх тиск буде знижений до тиску всмоктування у компресор;

- очікується, що при реалізації описаного підходу, температура пара на вході в компресор буде нижче, а густина вище (т.13 на рис. 3.б), ніж при використанні РТО на лінії всмоктування (т. 1 на рис. 3.а), як наслідок, температура кінця стиснення також буде нижче.



(а)



(б)

Рис. 3. Схематичне зображення холодильного циклу машини провізійних камер з РТО на лінії всмоктування (а), та «трипотоковий» РТО (б); потоки, які обмінюються теплотою у теплообмінниках, зображені красним кольором

Результати розрахунку холодильного коефіцієнту COP та температури холодоагенту на виході з компресору від ступеня переохолодження рідкого холодоагенту в РТО на лінії всмоктування, або у

«трипотоковий» РТО, запропонованому вище, або у теплообміннику з зовнішнім приймачем теплоти (РТО відсутнє, цей варіант наведений для порівняння) наведені на рис. 4.а та 4.б, відповідно.

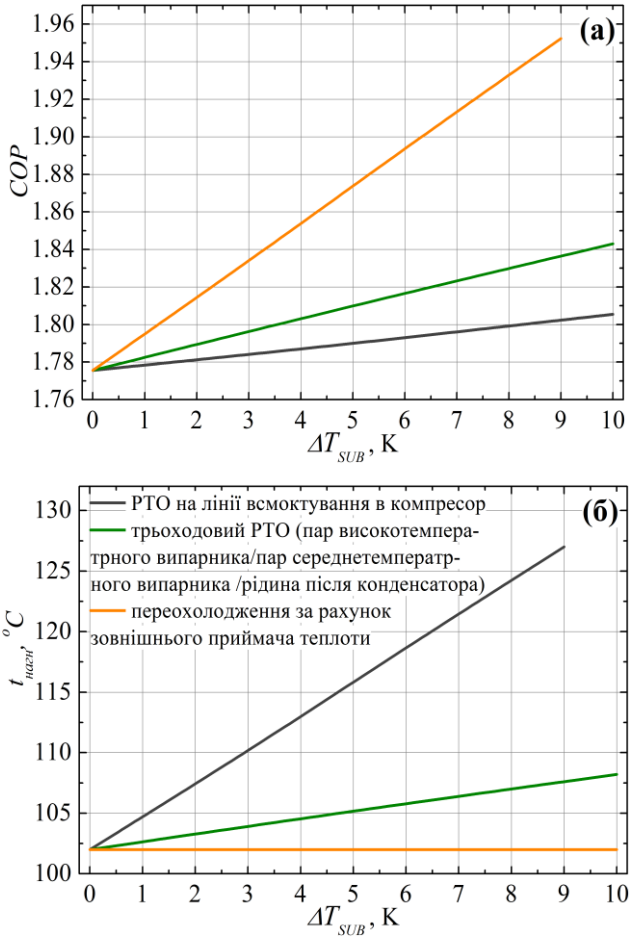


Рис. 4. Залежність холодильного коефіцієнту COP (а) та температури холодоагенту на виході з компресору (б) від ступеня переохолодження рідкого холодоагенту в РТО

Як показано на рис. 4, запропонований підхід з використанням замість РТО на лінії всмоктування «трипотокового» РТО, призводить к більшому покращенню COP. Хоча досягти такого рівня підвищення COP, як при застосуванні охолодження за рахунок зовнішніх прий-

мачів теплоти неможливе (рис. 4.а), але, з точки зору витрат на впровадження запропонованого технічного рішення, отриманий ефект можна вважати достойним уваги. Цінним результатом є те, що при застосуванні «трипотокового» РТО температура кінця нагнітання підвищується несуттєво, що є важливим з точки зору технічних можливостей впровадження запропонованого технічного рішення.

В якості теплообмінника можна використовувати модифікований аналог кожухо-змійовикового теплообміннику (Shell-and-Finned-Coil Heat Exchanger), які часто застосовуються як РТО у холодильних машинах [10] – рис. 5. Відмінністю запропонованого технічного рішення буде наявність двох змійовиків (замість одного як на рис. 5), відповідно двох входів/виходів для парової фази, причому рідка фаза буде рухатися у міжтрубному просторі з невеликою швидкістю, тому втрати тиску будуть незначні. Втрати тиску у змійовиках, як було вже відзначено, в даному теплообміннику можна не нормувати.

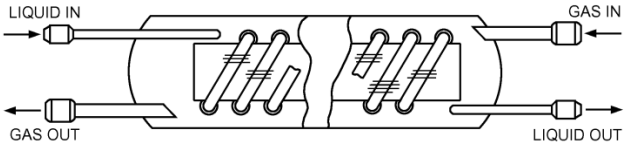


Рис. 5. Схематичне зображення кожухо-змійовикового РТО з оребреним змійовиком [10]

Висновки і перспективи подальших досліджень. В роботі проаналізовано доцільність застосування РТО у схемі холодильної машини провізійної камери при її переведенні на використання холодоагенту R407F. За результатами виконаного аналізу зроблено наступні висновки:

- використання РТО на лінії всмоктування у компресор є найбільш простим та дешевим способом забезпечити переохолодження рідкого холодоагенту після конденсатору;

- використання РТО на лінії всмоктування у компресор для розглянутої схеми холодильної машини (з трьома рівнями температур у випарниках) призводить к незначному збільшенню холодильного коефіцієнту COP від 1,776 до 1,802 при переохолодженні рідини на 9 К; незначне збільшення COP пояснюється збільшенням роботи стиснення пара в компресорі (температура пара на вході в компресор збільшується, густина зменшується за рахунок його перегріву); до-

датковим небажаним ефектом є збільшення температури парів на нагнітанні компресора з 102 до 127 °С, що є недопустимим;

- запропонований варіант заміни традиційного РТО на лінії всмоктування на «трипотоковий» теплообмінник (пар після високотемпературного випарника/ пар після середньотемпературного випарника/рідина після конденсатора); показане більше покращення СОР у порівнянні з попереднім варіантом, від 1,776 до 1,843 при переохолодженні рідини на 10 К; показане, що температура парів на нагнітанні компресора збільшується несуттєво, від зі 102 до 108 °С (при переохолодженні 10 К);

- аналогічний аналіз доцільно виконувати при вирішенні питання переведення суднового холодильного обладнання на холодоагенти з низьким потенціалом глобального потеплення, а також доцільно розглядати інші технічні рішення забезпечення переохолодження рідкого холодоагенту для збільшення загального СОР системи.

Перелік використаних джерел

1. ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment (SI). American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. Inc.: Atlanta, GA, USA, 2016.

2. ASHRAE Handbook – Refrigeration. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. Inc.: Atlanta, GA, USA, 2018.

3. Qureshi B.A., Zubair S.M. Mechanical sub-cooling vapor compression systems: Current status and future directions. *International journal of refrigeration*. 2013. Vol. 36(8). P. 2097-2110. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.07.026

4. Katipamula S. A review of energy savings technology: refrigerant subcooling. *Energy engineering*. 1997. Vol. 94(3). P.53-76. https://doi.org/10.1080/01998595.1997.10530376

5. Pottker G., Hrnjak P. Effect of the condenser subcooling on the performance of vapor compression systems. *International Journal of Refrigeration*. 2015. Vol. 50. P.156-164. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.11.003

6. Zubair S.M. Design and rating of an integrated mechanical-subcooling vapor-compression refrigeration system. *Energy Conversion and Management.* 2000. Vol. 41(11). P. 1201-1222. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00169-7

7. Batra S.N. Marine Refrigeration Series: Part 1. Guide to Components and Operation of Refrigeration Plant. Marine Insight. 2015. www.marineinsight.com

8. 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. https://doi.org/10.6027/TN2019-527

9. Khliyeva O., Sorokin R., Stukalenko O. A direct contribution of marine refrigeration to anthropogenic greenhouse gases emission - a short review. *Ship power plants (Судові енергетичні установки).* 2022. Vol. 44. P. 36-44. https://doi.org/10.31653/smf44.2022. 36-44

10. ASHRAE Handbook – Fundamentals. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. Inc.: Atlanta, GA, USA, 2017.

11. 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.

10.31653/smf47.2023.217-230

Шумілова К.В., Шумілов Д.І.

Національний університет «Одеська морська академія»

БАГАТОАСПЕКТНИЙ ВПЛИВ СУДНОПЛАВСТВА І ДІЯЛЬНОСТІ ЛЮДИНИ В РАКУРСІ ПАРАДИГМИ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ СВІТОВОГО ОКЕАНУ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Протягом останніх десятиліть людина все більш активно освоює світовий океан та прибережні регіони, завдаючи серйозної шкоди морському середовищу. За спостереженнями вчених, океан дедалі більше стрімко змінюється, а екологічний стан погіршується швидше, ніж очікувалося.

В умовах зміни клімату судноплавство і діяльність людини впливають дуже багатоаспектно, особливо на ті морські райони світового океану, що розташовані поблизу великих населених пунктів. Морській екосистемі загрожує безліч факторів, таких як забруднення, пов’язані з наземними об'єктами і суднами, екологічна нераціональна та згубна рибопромислова діяльність, незаконний та неповідомлений рибний промисел, руйнування довкілля у наслідок військових дій, збільшення рівня шуму в океані, інтродукція інвазивних видів, зіткнення китів і морських суден та видобуток корисних копалин, у тому числі нафти та газу.

Негативний вплив цих факторів посилюється у наслідок закислення та потепління Світового океану, зміни течій, уповільнення перемішування вод та падіння рівня кисню в океані. Поєднання цих факторів призводить до значно серйозніших наслідків. Відновлення морських екосистем і видів, що мешкають у них, можливо при умовах обмеженості збитків, які викликані якимось одним фактором.

Кумулятивний ефект нерідко завдає більше шкоди, ніж проста сукупність факторів, що його викликали. Погіршення стану океану згубно впливає на людей, їх кошти до існування та економіку в цілому, при цьому найчастіше страждає найбідніше населення, життя якого залежить від океанічних ресурсів.

Натепер морський сектор стикається зі складним викликом декарбонізації. Рішення щодо заходів з декарбонізації приймаються Міжнародною морською організацією (IMO).

Запит практики: необхідність пошуку методів вдосконалення системи управління ресурсами світового океану, яка пов’язана з по-

гіршенням морської екології, негативним впливом судноплавства, військовими діями, необхідністю прискорення процесів декарбонізації та переходом на екологічніші судна.

Об’єктом дослідження являється система управління ресурсами світового океану.

Предметом дослідження є методи та підходи збереження екології світового океану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз даних звіту «Review of Maritime Transport 2023» показує, що викиди парникових газів промисловістю зросли на 20% за останнє десятиліття і становлять 3% від загального обсягу в світі. Тому, бездіяльність в питаннях екологічної безпеки світового океану може призвести до того, що до 2050 року викиди можуть досягти 130% [1]. Зауважимо, що терміновість декарбонізації судноплавства обумовлена старінням світового флоту. На початок 2023 року середній вік судна становив 22,2 роки, більше половини суден – старше 15 років та є занадто старими для модернізації. В джерелі [2] рішення Генеральної Асамблеї Організації Об'єднаних Націй, прийняте в резолюції 69/292, що стосується збереження та сталого використання морської біологічної різноманітності, відкриває змогу удосконалення системи управління океаном. Вирішення проблеми забруднення прибережних та морських екосистем висвітлено на порталах [3-4], де вказується про розробку МАГАТЕ (Міжнародне агентство з атомної енергії) низки наукових інструментів та методів, які допомагають особам, які приймають рішення, забезпечувати захист морського середовища. У веденні цього агентства знаходяться лабораторії навколишнього середовища в Монако та Зайберсдорфі (Австрія), в яких за допомогою ядерних та ізотопних методів вивчаються процеси забруднення та визначаються джерела забруднення. Але немає комплексного екосистемного підходу до вирішення проблеми забруднення морського середовища на світовому рівні.

Розпорядження Кабінету міністрів Украйни від 11 жовтня 2021 р. N 1240-р. «Про схвалення Морської природоохоронної стратегії України» визначає зростання екологічних загроз для Азовського та Чорного морів, яке значно посилюється негативним впливом зміни клімату, евтрофікації та її наслідків (масове «цвітіння» води), забруднення токсичними речовинами, а також тими, що надходить у наслідок судноплавства [5]. В документі вказано про незбалансованість господарської діяльності в регіоні Азово-Чорноморського басейну,

яка потребує системного вирішення, оскільки країни ЄС вже відпрацювали чіткий механізм з розв'язання проблем збереження морської екосистеми. Сьогодні його реалізовано в Рамковій директиві про морську стратегію. Тому, для України важливим кроком буде пошук спільних методів вирішення проблем морської природоохоронної політики для підготовки ефективного плану дій щодо збереження морської екосистеми. Стаття [6] розглядає необхідність врахування впливу евтрофікації на світову екосистему, яка набуває все більшої важливості у світі. Вона обумовлена не тільки шкідливим збільшенням концентрації поживних речовин, а й природними умовами, різноманітною діяльністю людини, процесами судноплавства, викидами CO2 в атмосферу, високими температурами та прибережними водами.

В дослідженні [7] розглянуто серйозну екологічну небезпеку у прибережних підземних водах, яка погіршує гідрогеологію прибережних зон. В роботі запропоновано підхід, який враховує взаємодію між людьми, а не між видами або популяціями, оскільки структура морських екосистем виникає в результаті взаємодії між людьми та з навколишнім середовищем. Такий підхід є альтернативою класичним підходам і описує складні екосистеми простими способами. Це дає змогу оцінювати вплив зміни довкілля на структуру та функцію екосистеми. Компоненти підходу ґрунтуються на ознаках, і застосовуються для опису та моделювання морських екосистем, які ілюструються безліччю прикладів життя в океані. Але розглянуті проблеми забруднень навколишнього середовища враховують лише методи запобігання проникненню та не враховують можливість комплексного підходу саме на міжнародному рівні для захисту морської екосистеми у світі [8].

Виклад основного матеріалу дослідження.

Метою дослідження став аналіз методів системи управління ресурсами світового океану для вирішення проблем забруднення прибережних та морських екосистем, пов’язаних з багатоаспектним впливом судноплавства і діяльності людини.

Гіпотеза дослідження полягає в можливості створення системи управління океанічними ресурсами за рахунок об'єднання різних підходів до управління у єдиний комплексний план дій збереження екосистеми. Це дозволить розробити спільні методи та підходи щодо запобігання забрудненню навколишнього середовища, для боротьби з численними факторами, що загрожують екології світового океану.

Головне завдання полягає у визначенні актуальних методів і підходів для можливості удосконалення системи управління ресурсами світового океану, які застосовуватимуться до всіх видів діяльності людини, що впливають на судноплавство та морську екосистему.

Складність завдання збереження екології світового океану полягає в тому, що морське середовище вважається «суспільною власністю» – територіями, які не підпадають під юрисдикцію тієї чи іншої держави та зазвичай їх відносять до загального надбання. Більшість океанічних зон перебуває у вільному доступі, тому що це засновано на звичаях системи користування морськими територіями. Але вимоги, що прийняті в багатьох країнах Південно-Тихоокеанського регіону або в Японії, є винятком із загального правила. Тому, відсутність власника призводить до *«трагедії спільної власності»* та найчастіше споживчого ставлення до ресурсу. Результатом цього стає зниження біорізноманіття океану. Таким чином, для того, щоб покращити систему управління океанічними ресурсами представникам директивних органів та широкому суспільству необхідно зрозуміти, що доля всього людства залежить від океану, тому в його збереженні зацікавлений кожен з нас.

З погляду на системи управління цими ресурсами, особливу складність представляють морські райони поза національної юрисдикції. Навіть якщо необхідність *комплексного і всеосяжного підходу* до боротьби з численними факторами, що загрожують екологічному стану океану, чітко усвідомлюється, жодна держава, організація чи структура не несуть спільну відповідальність за управління відкритими водами, а чинне законодавство та установи є диференційованими за галузями.

Хоча міжнародна політика відображає загальну згоду з необхідністю *екосистемного підходу* для покращення системи управління океаном, на практиці цей підхід, як і раніше, застосовується рідко. Це пов'язано головним чином із практичними складнощами, у тому числі з відсутністю інформації та аналітичних і наукових методів, необхідних для реалізації цього процесу. Певною мірою це також пов'язано з недостатнім розумінням суті екосистемного підходу, зокрема передбаченого ним принципу широкої участі всіх зацікавлених сторін. Існує безліч різновидів екосистемного підходу – наприклад, підхід, передбачений Конвенцією про біологічне розмаїття, та підхід, який застосовується Продовольчою та сільськогосподарською організацією Об'єднаних Націй, які високо сумісні. Насправді найчастіше

застосовується екосистемний підхід, що передбачає *комплексне управління прибережними районами* чи прибережними територіями, і навіть комплексне управління водними ресурсами чи ресурсами річкових басейнів.

При застосуванні цих підходів важливо пам'ятати, що океани пов'язані між собою за рахунок руху водних мас, міграції видів та поширення личинок. І хоча виняткові економічні зони певних держав юридично є окремими територіальними одиницями, непов'язаними з відкритими водами, вони пов'язані з ними лише з екологічної та біологічної точки зору. Тому в контексті екосистемного підходу система управління має враховувати екосистеми та види, що знаходяться за межами політичних кордонів. Цей підхід не тільки покращить сировинну базу рибальства та умови проживання мігруючих видів, а й принесе користь населенню, що проживає на узбережжі, особливо в країнах, що розвиваються, для яких ці біологічні види та екосистеми мають економічне, соціальне і культурне значення.

Тривале забруднення може завдати серйозної шкоди прибережним та морським екосистемам і поставити під загрозу існування цілих громад. Оскільки 98,8% морського флоту все ще використовують викопне паливо, впровадження альтернативних видів палива все ще залишається на ранніх стадіях. Але 21% суден, які будуть побудовані, працюватимуть на більш чистих альтернативних видах палива: метанол, зріджений природний газ і гібридні технології (рис. 1).

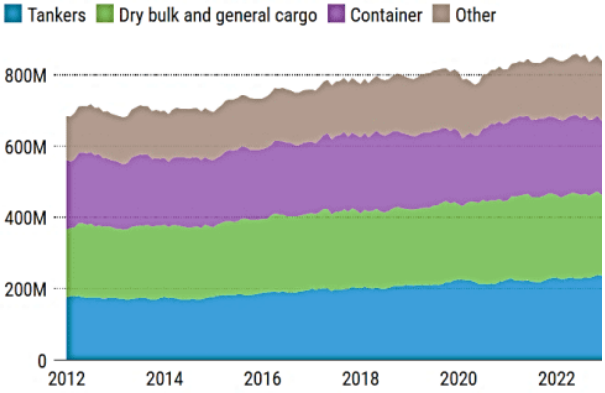


Рис. 1. Викиди вуглекислого газу за основними типами суден в тоннах, 2012-2023 роки (дані Marine Benchmark, джерело UNCTAD, 2023 р.)

Отже. складність питання полягає в тому, хто відповідає за пере-

хід на декарбонізацію. Третина викидів вуглецю від судноплавства припадає на країни прапорів Ліберії, Панами та Маршаллових Островів, тому вони відповідатимуть за впровадження нових екологічних стандартів судноплавства (рис. 2).

	Country	2012	2022
1	Liberia	84,234,832	116,604,626
2	Panama	133,942,472	113,840,759
3	Marshall Islands	45,270,368	88,611,254
4	China, Hong Kong SAR	46,350,802	63,030,146
5	Singapore	40,511,064	55,007,389
6	Malta	27,002,673	46,599,011
7	China	18,441,308	34,892,234
8	Bahamas	32,054,279	33,102,919
9	Japan	14,084,980	22,207,515
10	Denmark (Dis)	11,734,910	16,887,869

Рис. 2. Зростання викидів вуглекислого газу в тоннах, за країнами-власниками суден у 2012 та 2022 роках (дані Marine Benchmark, джерело UNCTAD, 2023 р.)

Зауважимо, що відповідальність за перехід на екологічніші судна, альтернативні види палива та бункерувальні потужності в основному лягає на судновласників, адміністрацію портів та енергетичну промисловість. За результатами сучасних аналізів, 80% забруднювачів потрапляють у морську середу з суші. Деякі небезпечні речовини, що утворюються в результаті промислової, сільськогосподарської та гірничодобувної діяльності, наприклад токсичні важкі метали, стійкі органічні забруднювачі (включаючи пестициди та промислові хімікати), вуглеводні та радіоактивні речовини, зрештою потрапляють у морське середовище через поверхневі та підземні води.

За останні роки збільшилася кількість випадків шкідливого цвітіння водоростей, у процесі якого можуть утворюватися токсини, що викликають такі харчові захворювання, як смертельне паралітичне отруєння молюсками та сигуатерне отруєння рибою (перші ознаки зазвичай виявляються протягом шести годин після вживання зараженого продукту і продовжуються кілька днів або тижнів; у людей мо-

же спостерігатись зміна температурних відчуттів: гаряче здається холодним, а холодне – гарячим). Такі випадки завдають шкоди рибальству, аквакультурі, туризму, перешкоджають використанню питної води та рекреаційних водних ресурсів.

Для управління діяльністю людини в світовому океані і в прибережних районах в рамках екосистемного підходу можуть використовуватися різні інструменти і стратегії, наприклад: біорегіональна класифікація; узгоджені системи морських природоохоронних зон або керованих районів моря; зональне господарювання в океанах та управління рибальством.

Для запобігання деградації навколишнього середовища під впливом запропонованих заходів можуть використовуватися оцінка впливу на довкілля та стратегічна екологічна оцінка. Тому, загалом головне завдання полягає в тому, щоб об'єднати різні підходи до управління, які використовуються різними галузями, у єдиний комплексний план дій, у центрі якого знаходиться екосистема. Для виконання цього завдання країни можуть використовувати морське просторове планування (МПП) – підхід, який завойовує більше прихильників. МПП – це спосіб інтеграції різних видів діяльності, узгоджений з ідеєю збереження навколишнього середовища. Аналогічно системі комплексного управління прибережними районами, цей спосіб передбачає екосистемний підхід, що реалізується за допомогою процесу планування, в якому беруть участь усі зацікавлені сторони.

Багато чого можна запозичити у населення, що проживає в прибережних районах, – їх досвід розпорядження ресурсами та використовувані ними заходи, які можуть бути застосовані в інших регіонах і здатні покращити систему управління діяльністю людини в океанічних екосистемах.

Україна має близько 2700 км берегової лінії вздовж Чорного моря та Азовського моря. Анексія Кримського півострова Росією у 2014 році та окупація Донецької, Запорізької та Херсонської областей внаслідок збройного конфлікту з лютого 2022 року призвели до втрати Україною доступу до більшої частини своєї південної та південно-східної берегових ліній. Чорне море отримує скиди трьох найбільших рік Європи, і його площа водозбору приблизно вп'ятеро перевищує його площу. Оскільки це включає великі промислові та сільськогосподарські регіони, проблеми забруднення є загальними (рис. 3).

Велика глибина та дрібний вихід Чорного моря призводять до невеликого змішування води, і нижче 100-150 м вона значною мірою

позбавлена кисню. Азовське море тим часом надзвичайно дрібне, і в ньому переважає приплив річок Дон та Кубань. Поживні речовини, які вони принесли на мілководді, колись підтримували високі рибні запаси, проте евтрофікація, забруднення та надмірний вилов риби деградували екосистему моря.

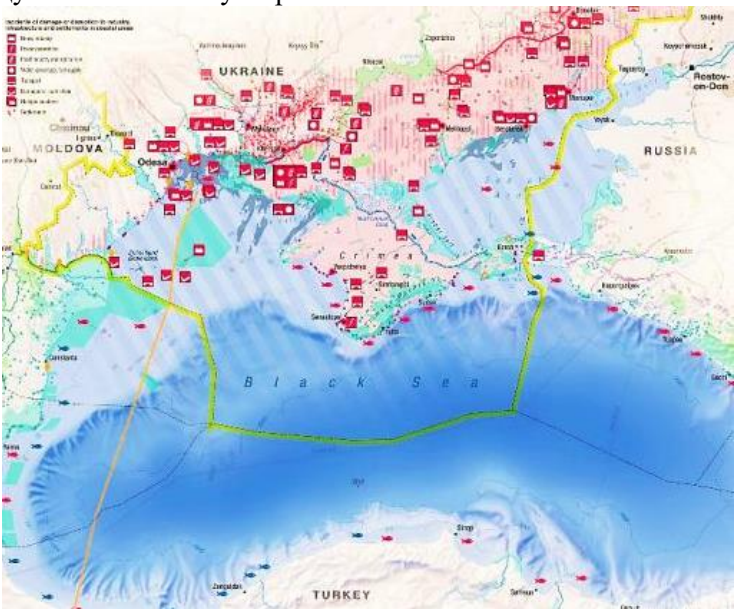


Рис. 3. Загрози забруднення прибережних зон України та втрата доступу у зв’язку з анексією Кримського півострова Росією

Внаслідок анексії Криму Україна втратила доступ до одинадцяти морських охоронних регіонів у межах своєї прибережної зони. З лютого 2022 року було втрачено доступ до морських компонентів, таких як: Чорноморський біосферний заповідник та Національний природний парк «Білобережжя Святослава», обидва з яких знаходяться у південному Херсоні.

Вплив бойових дій на морське довкілля. Основний вплив збройного конфлікту на прибережні та морські екосистеми включає хімічне та акустичне забруднення, фізичну шкоду місцям проживання та скорочення природоохоронної діяльності. Конфлікт також перешкоджає екологічному моніторингу та управлінню Чорним та Азовським морями. Дані «Ecodozor» (платформа ОБСЄ, Організація з безпеки і співробітництва в Європі, що висвітлює екологічні ризики, пов’язані з війною в Україні) показують збільшення зареєстрова-

них збитків та руйнування прибережних поселень за мірою розвитку конфлікту [9].

В результаті військових дій було здійснено атаки як на військове, так і на цивільне судноплавство України, коли російські військово-морські сили діяли поблизу стратегічно важливих портів, таких як Одеса. До початку квітня Росія, схоже, вирішила не здійснювати висадки між Миколаєвом та Одесою, використовуючи два великі десантні загони, які вона сформувала.

Конфлікт і окупація Росією територій України призвели до збитків та руйнування низки прибережних і морських місць проживання, багато з яких є крихкими або високочутливими. Нижче наведені приклади ілюструють діапазон загроз, які конфлікт створив для прибережних і морських місць проживання: 1) про наявність боєприпасів і мін, що не розірвалися, повідомлялося в багатьох місцях; 2) пожежі були викликані у прибережних чагарниках та лісах та в Національному природному парку «Білоберіжжя Святослава», внаслідок їх адресності чи використання як вогневої позиції; 3) мінні поля були закладені на пляжах та узбережжях, щоб запобігти висадці десанту; 4) будівництво траншей та укріплень завдало шкоди флорі та посилило ерозію ґрунту, у той час як сміття та військові відходи, залишені персоналом, забруднили ґрунти та ґрунтові води; 5) у міру просування лінії фронту змінилася і лінія фізичного пошкодження житла, особливо там, де вони зазнають сильного обстрілу; 6) одним із прикладів цього є екологічно чутливі водно-болотні угіддя вздовж гирла Дніпра на півдні Херсона, які були укріплені Росією після виходу з міста Херсон; 7) у Криму важливі прибережні житла, як повідомлялося, було перетворено на військові навчальні майданчики; 8) поряд із фізичними порушеннями, шумове порушення, ймовірно, торкнулося видів птахів та ссавців.

Бойові дії також вплинули на морське довкілля. Острів Зміїний (Змія) став місцем інтенсивних боїв у період з лютого по липень 2022 року, з використанням як важкої вибухової, так і запальної зброї.

Ще один проблемний МОР – унікальне поле «Філофори Зернова». Це область, яка була створена для захисту та відновлення «Phyllophora» – водорості, яка є ключовим родом і інженером екосистем. До конфлікту цей МОР вже наражався на особливий ризик через надлишковий осад і навантаження поживними речовинами і залежав від збільшення викидів з українських річок. У межах кордонів МОР було багато розливів нафти та затоплення суден, включаючи

крейсер «Москва».

Негативні зміни в рибальській активності у Чорному морі. Військові дії з боку Росії вплинули на морські перевезення в Чорному та Азовському морях, а також змінили управління та контроль рибальства. Важливо відмітити, що зміни інтенсивності та місцезнаходження промислу можуть вплинути на рибні запаси, тоді як скорочення судноплавства може вплинути на морське середовище. Українські морські рибальські флоти були неактивні протягом 2022 року, при цьому загальний річний улов Чорного та Азова склав майже 13 000 тонн. Внутрішнє та дельта рибальство також постраждало.

Після анексії Криму Росія в односторонньому порядку зменшила ділянку Азовського моря, де українським рибалкам було дозволено ловити рибу на 75%; до цього в Азовському морі було виловлено близько 100 українських катерів. Це особливо вплинуло на українських рибалок через високий рівень залежності від прибережних вод Криму. Припинення угод про рибальство протягом 2022 року означає, що наразі в Азовському морі немає спільного управління.

Аналіз даних транспондера рибальських суден на базі AIS (автоматична ідентифікаційна система) показав, що промисел російськими траулерами посилився у Чорному морі після анексії Криму у 2014 році (рис. 4).

Рис. 4. Посилення риболовного промислу російськими траулерами у Чорному морі після анексії Криму (AIS)

Нещодавно, з березня по червень 2022 року, загальна рибальська активність у Чорному морі знизилася, при цьому рибальські судна знаходилися недалеко від берега. Слід зазначити, що дані AIS не

розповідають усієї історії, оскільки судна, які ведуть незаконний промисел, відключають свої транспондери.

Інциденти, що призводять до ризику забруднення. В період з лютого по травень 2022 року, коли був миттєвий наступ на Миколаїв, російські війська зайняли більшу частину лівого берега лиману. В результаті Миколаїв і прилеглі міста отримали значні фізичні збитки, що завдали великих обсягів різноманітного сміття. Це призвело до розповсюдження широкого спектру забруднюючих речовин, включаючи важкі метали, поліхлоровані дифеніли та азбест. Деякі з цих небезпечних матеріалів транспортуватимуться в гирлі річки Буг через поверхневий стік або через потік підземних вод. Лиман річки Буг є ключовим морським портом, і багато промислових об'єктів, розташованих вздовж лівого берега, було пошкоджено.

Супутникові знімки показують пошкодження трьох складів, які, можливо, зберігають аміачно-нітратні добрива, і навколишніх водойм із бурою водою – ймовірно, забруднених протипожежними пінами та добривами, які створили екологічний ризик у гирлі річки. Ще одним видимим непрямим впливом було розтікання стічних вод у період з 28 червня по 15 липня 2022 року від станції очищення стічних вод «Halytsynove» (рис. 5).

Рис. 5. Супутниковий знімок втіків залишків бокситу в лиман річки Буг

Такі викиди неочищених стічних вод можуть шкодити екосисте-

ми за рахунок виділення токсичних речовин та евтрофікації [9-11].

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Багатоаспектний вплив судноплавства і людини на світовий океан має враховуватися щодо методів ефективного управління морськими ресурсами. Зрозуміло, що управління морськими і прибережними територіями та міжнародними водами багатьох країн в основному диференційовано по галузях: установи у сфері рибальства, що регулюють рибальський промисел; екологічні органи, які займаються запобіганням забруднення; інші спеціалізовані структури, що управляють судноплавством та видобутком нафти. Отже, стратегії та політика у сфері збереження біорізноманіття та захисту навколишнього середовища, а також у галузі рибальства, зміни клімату та боротьби зі злиднями найчастіше розробляються та здійснюються різними установами. Це і є основною проблемою та корінням усіх бід. З кумулятивним ефектом неможливо впоратися, займаючись вирішенням окремих проблем. Колишня система управління, яка є диференційованою за галузями, неспроможна впоратися зі зростанням погіршення екологічного стану світового океану, яке впливає також і на судноплавство. При численності джерел шкоди потрібно комплексне управління, тобто необхідно якнайшвидше виробити всеосяжний підхід для ефективного управління ресурсами океану для безпеки судноплавства.

Для перспективних досліджень важливим стане пошук наукових методів зміни парадигми управління екологічними ресурсами океану, поклавши в її основу *комплексний, інтегрований екосистемний підхід* [12-13], який застосовуватиметься до всіх видів діяльності людини, що впливають на світову морську екосистему і судноплавство в цілому.

Перелік використаних джерел

1. Review of Maritime Transport 2023. URL: https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023 (дата звернення 07.11.2023).

2. Забруднення прибережних та морських екосистем. URL: https://www.iaea.org/ru/temy/zagryaznenie-pribrezhnyh-i-morskih-ekosistem (дата звернення 16.11.2023).

3. Md. Shahidul Islam, Masaru Tanaka. Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: a review and synthesis. Marine Pollution

Bulletin, Volume 48, Issues 7–8, 2004, P. 624-649, ISSN 0025-326X. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.12.004.

4. Coastal pollution and impacts. URL: https://www.coastalwiki.org/wiki/Coastal_pollution_and_impacts (дата звернення 10.11.2023).

5. Ukraine conflict environmental briefing: The coastal and marine environment. URL: https://ceobs.org/ukraine-conflict-environmental-briefing-the-coastal-and-marine-environment/ (дата звернення 15.10.2023).

6. Про схвалення Морської природоохоронної стратегії України : Розпорядження від 11 жовтня 2021 р. N 1240-р : станом на 4 серп. 2023 року. URL: https://ips.ligazakon.net/document/KR211240 (дата звернення 18.11.2023).

7. Berlinskyi, N. A., & Cheroy, L. I. (2020). Розвиток евтрофікації і накопічення забруднень у річці дунай і прибережній морській зоні. Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки, 25(1(36), 11–22. https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.1(36).205158.

8. Thomas Kiørboe, André Visser, Ken H Andersen, A trait-based approach to ocean ecology, ICES Journal of Marine Science, Volume 75, Issue 6, November-December 2018, Pages 1849–1863, https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy090.

9. Платформа, створена за підтримки ОБСЄ, висвітлює екологічні ризики, пов’язані з війною в Україні. URL: https://www.osce.org/uk/project-coordinator-in-ukraine-closed/520475 (дата звернення 18.11.2023).

10. Marine pollution and ecosystems. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollution/ecosystems/marine-pollution (дата звернення 03.10.2023).

11. Report from the Commission to the European Parliament and Council on the implementation of the Marine Strategy Framework Directive (Directive 2008/56/EC). Brussels, 25.6.2020, COM(2020) 259 final. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0259&from=EN (дата звернення 07.11.2023).

12. Contaminants in Europe’s seas – moving towards a clean, non-toxic marine environment, EEA Report No 25/2018. European Environment Agency. URL:

https://www.eea.europa.eu/publications/contaminants-in-europes-seas/ (дата звернення 14.11.2023).

13. Marine messages II – navigating the course towards clean, healthy and productive seas through implementation of an ecosystem-based approach, EEA Report No 17/2019. European Environment Agency. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/marine-messages-2/file (дата звернення 15.11.2023).

14. Ocean Pollution: Causes, Effects and Prevention. URL: https://www.texasdisposal.com/blog/ocean-pollution-causes-effects-and-prevention/ (дата звернення 18.11.2023).

10.31653/smf47.2023.231-239

Knaub L.V.[1], Lebedev B.V.[2], Krasnodiy I.P.[1], Astashenya I.I.[1], Zasukha O.Yu.[1]

[1]Odesa military academy
[2]National University "Odessa Maritime Academy"

DESIGN IMPROVEMENT OF DIESEL ENGINES TAKING INTO ACCOUNT MODERN ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS

Statement of the problem in a general form. Modernization of medium- and high-speed diesel engines at the current stage is reduced to increasing their energy efficiency with simultaneous strengthening of environmental requirements to combat global warming. This process involves not only a change in the structure and technical characteristics of vehicles, but also a transition to the use of alternative types of fuel. In our paper, we explore the key technical aspects of this transition, including fuel systems and their adaptation to the new requirements of today's medium- and high-speed diesel engines. The results of our research will reveal important information about the improvement of diesel fuel systems, contributing to the improvement of their operational efficiency and compliance with the new standards.

The transition to new environmental standards is becoming especially relevant in the current conditions of geopolitical challenges. This process involves not only adaptation to equipment standards, but also transition to the use of new types of fuel and improvement of their supply systems.

An important aspect of our research is the analysis and assessment of advantages and disadvantages associated with the use of alternative fuels and modification of fuel systems. Our findings will make it possible to develop optimal solutions for increasing the productivity of trucks, reducing the negative impact on the environment, and increasing the overall reliability and efficiency of military vehicles.

Analysis of recent research publications.

Considering the possibilities of using alternative types of fuel and modifying the fuel systems of medium and high-speed diesel engines, several basic lines can be identified that contribute to improving the performance of diesel engines, reducing the negative impact on the environment, and increasing the overall reliability and efficiency of military vehicles:

– replacing traditional petroleum fuels with biofuels (for example, biodiesel or bioethanol) can help reduce CO_2 emissions and other pollutants (the use of biofuels can be particularly useful in areas where there is access to renewable sources of raw materials such as vegetable oil or biomass) [1];

- the introduction of hybrid systems that combine two or more energy sources, such as electricity and diesel fuel, can reduce fuel consumption and improve the performance of trucks (electrification can also provide the ability to use vehicles in "silent mode", which is important in military operations) [2];

– modification of the fuel system for more effective recirculation of exhaust gases back to the engine can lower the combustion temperature and reduce emissions of nitrogen oxides (NOx), which is an important argument for compliance with environmental regulations [3];

– the use of compressed natural or liquefied natural gas can be effective, since gas is a less polluting fuel compared to traditional types of fuel [4];

– the use of modern electronic engine management systems to optimize engine parameters and control the fuel system can increase productivity and reduce fuel consumption [5];

– the use of new materials in the construction of diesel engines can lead to a decrease in fuel consumption [6].

It is important to note that the successful modernization of the fuel system to use alternative fuels requires thorough research and testing to ensure safety, reliability and compliance with environmental standards. It may also require the development of new components and technologies to ensure efficient operation with different types of fuel [7].

Application of the above-mentioned methods can help solve the problems associated with increasing the efficiency of diesel engines and improving their environmental performance, but they require large and expensive costs for development and improvement.

Setting objectives. We offer a solution to these problems by using a cheap additional power system in the form of a vortex mixer-evaporator [8]. The vortex mixer-evaporator works on the energy of waste gases and allows the use of cheap, compared to the standard ones, low-cetane fuels, for example, stable gas condensate without processing.

But the use of high-viscosity fuels in engines is complicated by the fact that their thermophysical parameters differ from traditional fuels, which require a careful approach when evaluating the formation of a fuel

mixture - atomization, evaporation and mixing with an oxidizer. In addition, the high sulfur content poses additional challenges, especially regarding the environmental cleanliness of exhaust gases [9].

Presentation of the main research material.

Improvements in fuel delivery and hybrid fuel systems are important areas of research that can contribute to more efficient use of resources, reduction of harmful emissions, and increased flexibility in the use of fuels for motor vehicles and the armed forces. The use of advanced fuel delivery systems such as the Rank tube can be an effective way to improve the efficiency and environmental safety of modern military vehicles.

A Rank tube is a device designed to prepare fuel for combustion by vaporizing it, mixing it with exhaust gases, and recirculating it back into the engine. This facilitates more complete use of fuel, reducing emissions of harmful substances and increasing engine efficiency.

The use of a Rank tube in the fuel supply system can lead to the following advantages:

– evaporation of fuel and its mixing with exhaust gases contributes to better combustion, which leads to a decrease in emissions of harmful substances into the atmosphere;

– more efficient burning of fuel reduces emissions of harmful substances, which is an important aspect for compliance with environmental standards;

– increased efficiency and more efficient use of fuel can increase the range of vehicles.

However, the implementation of such systems requires a thorough engineering approach, testing and adaptation to the specific conditions and requirements of military automotive equipment. In addition, it should be taken into account that any changes in the fuel supply system must ensure the reliability and safety of operation of automotive equipment in conditions of combat or intensive operation.

Using the thermal energy of exhaust gases with an additional power supply system (a part of the thermal energy is used when the ambient temperature drops significantly) for heating fuel flow, and by using the kinetic energy of the exhaust gases to atomize the heated fuel, the above requirements of the diesel engine are met. The ratio of recirculated exhaust gases to fresh air is chosen so that the combustion of low-cetane fuels is detonation-free at all speed and load modes of operation. The

additional power supply system is a direct-flow Ranka tube with a forced vortex flow in the nozzle inlet, which houses a fuel atomizer (Fig. 1).

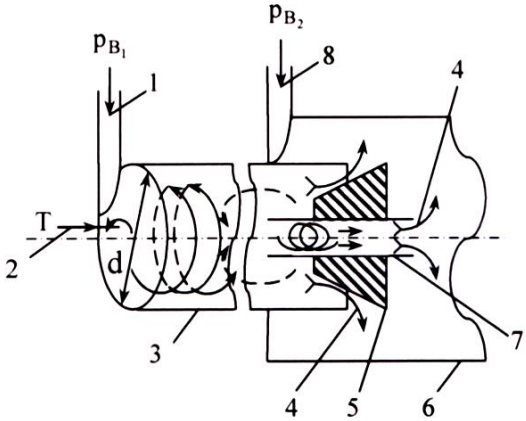


Fig. 1. Scheme of the vortex additional diesel power supply system:
1 – tangential supply of air from the HTN compressor (p_{B_1}); 2 – fuel supply from the priming pump (T); 3 – cylindrical part of the vortex tube; 4 – flows aerosol prepared part of the working mixture; 5 – regulator consumption of the mixture and frequency of rotation of the vortex flow; 6 – diesel intake manifold; 7 – diaphragm of the vortex system feeding; 8 – tangential air supply (secondary vortex air flow from HTN (p_{B_2}))

This design of this device allows you to use an aerodynamic spraying method with the formation of fuel droplets with a diameter of 0.1–40 microns, which satisfies the combustion regime in terms of burnout speed and completeness at any engine speed.

To prove the plausibility of the stated arguments, we will present the analysis of experimental data of motorless tests on the quality of spraying and evaporation in the vortex system (Fig. 2).

Taking into account the fact that the fuel consumption through the evaporator-mixer does not exceed 50% of the hourly maximum fuel consumption by the engine, we conducted tests on three loaded modes of engine operation with changes in fuel consumption up to 7.7 kg/h (Fig. 3).

The analysis of the results shows that with increasing fuel consumption, the quality of sawing deteriorates, while a sharp "jump" in the deterioration of sawing occurs at the maximum torque Me_{max}, when the fuel consumption G_T = 2 kg/h, at the maximum power Ne_{max}, G_T = 2.9 kg/h and the maximum rotation frequency $n_{max\ x/x}$, G_T = 6.5 kg/h.

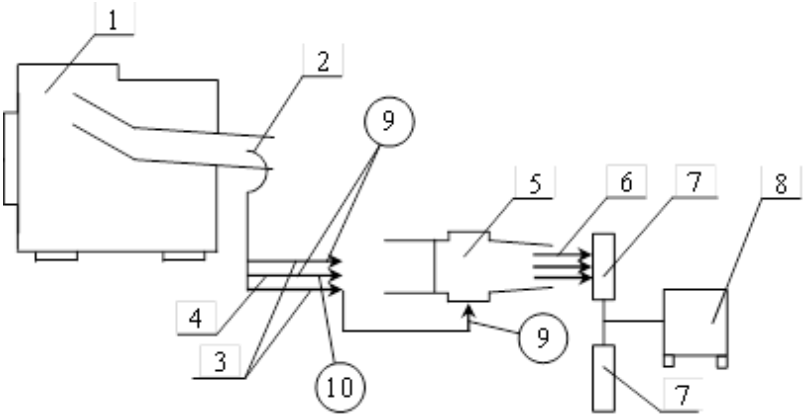


Fig. 2. The general scheme for determining the quality of fuel atomization in the vaporizer-mixer:
1 – internal combustion engine; 2 – gas reservoir; 3 - gas pipelines in sprayer and in volute; 4 – fuel line; 5 – evaporator-mixer; 6 – a mixture of fuel and exhaust gases; 7 - plate (smoked ash, covered with a film of magnesium oxide); 8 – electric motor; 9 – temperature and pressure sensors; 10 – fuel flow meter

Such a jump from an aerosol state to a torch (by a torch we mean a state when the average volume diameter of a droplet is higher than 5-8 microns) can be explained by the fact of the lack of pressure and temperature of the exhaust gases.

It should be noted that with a fuel consumption of up to 3 kg/h, the mixture meets the requirements of aerosol mixing and evaporation, that is, at $D_{30} < 1$ μm, which significantly exceeds the quality of fuel preparation. The appearance of large drops with a diameter of more than 40 μm is determined as a mismatch of the geometric dimensions of the tube and atomizer to the parameters of the gases, and it can also occur due to the greater heat of vaporization of the fuel compared to the heat contributed by the exhaust gases.

The geometric dimensions of the tube, atomizer, gas-subducting channels with the gas collector determine the frequency of rotation of the vortex and the fuel ejection flow through the nozzle of the tube, i.e., directly affect the quality of the mixture.

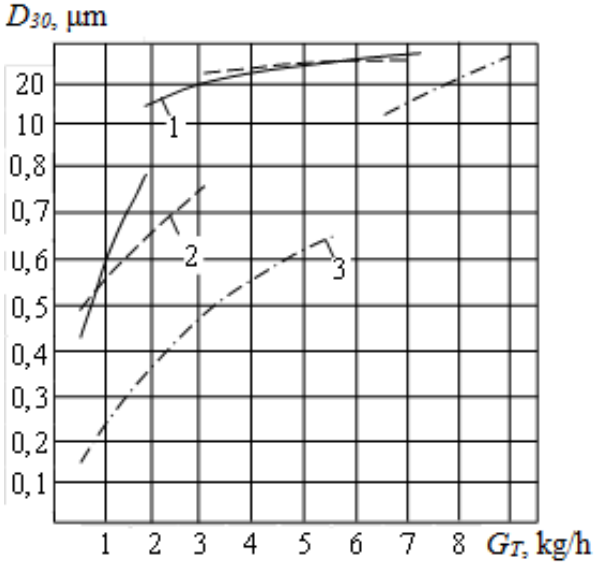


Fig. 3. Dependence of fuel atomization quality on engine operation modes and hourly fuel consumption:
1 – maximum torque; 2 is the maximum power; 3 – maximum rotation frequency

An increase in the pressure of exhaust gases at the nozzle inlet leads to a decrease in the concentration of oxygen in the total charge, which contradicts the idea of improving the ratio of fuel consumption and oxygen in the total volume of the charge.

Taking into account this fact, we will consider the influence of exhaust gas pressure on the quality of spraying, i.e., we will find the marginal minimum pressure necessary to obtain an aerosol state at a constant hourly consumption of fuel G_T = 2.0; 2.9; 6.5 kg/h.

Below are the research results for the maximum power mode Ne_{max} = 77.3 kW (Fig. 4).

As expected, with increasing pressure, the quality of spraying improves, and with increasing fuel consumption, it significantly deteriorates. Despite the fact that the aerosol state is achieved for all modes of fuel consumption at a pressure value of less than 0.1 MPa, it is necessary to limit the minimum pressure that satisfies aerosol formation. Namely, for D_{30} < 1 μm at consumption G_T = 2 kg/h – point A at P_1 = 0.015 MPa; for G_T = 2.9 kg/h – point B at P_1 = 0.02 MPa; for G_T = 6.5 kg/h – point C at P_1 = 0.055 MPa.

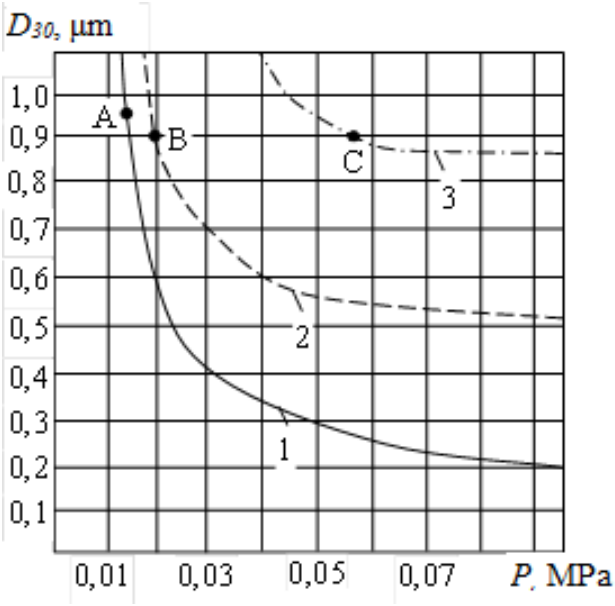


Fig. 4. Dependence of fuel atomization quality on gas pressure at the entrance to the tangential entrance and vortex sprayer tubes:
1 – fuel consumption *Gp* = 2 kg/h; 2 – fuel consumption *Gp* = 2.9 kg/h;
3 – fuel consumption *Gp* = 6.5 kg/h

These findings are of particular value when designing an evaporator-mixer for diesel engines with large hourly fuel consumption.

Conclusions and prospects for further research. The use of a Rank tube in the fuel supply system can contribute to an increase in engine efficiency for several reasons:

1. The Rank tube provides more effective preparation of fuel before it is fed to the engine cylinders. This involves vaporizing the fuel and mixing it with the exhaust gases, which helps to mix the fuel-air mixture better. When the fuel is evenly distributed in the air, more complete and uniform combustion occurs, which increases the efficiency of the engine.

2. The Rank tube allows more efficient use of fuel, preventing its leaks and losses in the form of unused fuel. This is especially important in combat operations or long maneuvers where fuel efficiency is critical.

3. The use of the Ranka tube also allows the exhaust gases to be recirculated back into the combustion system. This contributes to lowering the combustion temperature, reducing the formation of harmful substances and improving the combustion efficiency. Due to more efficient fuel com-

bustion, less harmful emissions such as nitrogen oxides (NO_x), hydrocarbons (HC) and carbon monoxide (CO) are produced. Reducing their formation helps reduce the harmful effects of motor vehicles on the environment.

4. Reducing emissions of harmful substances allows transport equipment to comply with environmental norms and standards established by governments and international organizations. Military vehicles, like civilian vehicles, are subject to strict requirements to reduce environmental impact, and the use of a Rank tube can help in this direction.

As a result of the use of the Rank tube and the effective preparation of fuel before combustion, the efficiency of the engine increases, which leads to more efficient use of fuel energy and an increase in the overall performance of vehicles. This is especially important for military vehicles, where the efficiency and reliability of engines are critical to a variety of tasks.

The given results give us grounds for conducting further theoretical and experimental studies for gas turbine installations. This is a separate direction of advanced researches.

References

1. Внукова Н.В. Альтернативне паливо як основа ресурсозбереження і екобезпеки автотранспорту / Н.В. Внукова, М.В. Барун // Energy saving. Power engineering. Energy. – Харків: Харківський політехнічний університет. – 2011. – № 9(91). – С. 45-54.

2. Мокін О.Б. Оптимізація руху гібридного автомобіля із системою електропривода, яка непрацює / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Машинобудування та транспорт. – Вінниця: ВНТУ. – 2015. – № 4. – С. 1- 6.

3. Радченко Р.М. Метод рециркуляції відпрацьованих газів суднових дизелів для зменшення їх токсичності / Р.М. Радченко, М.А. Пирисунько // Холодильна техніка та технологія. – Миколаїв: НУК. – 2018. – №54(4). – С. 11-16.

4. Окоча А. 2016. Газоподібне паливо для ДВЗ: види, стандарти, марки. [online]. Київ: Agroexpert. – 2016.

5. Кашканов А.А. Інформаційні комп’ютерні системи автомобільного транспорту / А.А. Карканов, В.П. Кужель, О.Г. Грисюк. Навч.посіб. – Вінниця: ВНТУ. – 2010. – 230 с.

6. Stukalets I. Using SolidWorks Flow Simulation for modeling the geometric shapes of car bodz parts / I. Stukalets, S. Korobka, R.

Tsonznets // Bulletin of Lviv National Agrarian University. – Lviv: LNAU. – 2021. – №25. – С. 127-142

7. Слинько, Г. І. Підвищення паливної економічності дизельного двигуна 6ЧН12/14 завдяки вдосконаленню розпилення та сумішоутворення // Г. І. Слинько, Р. Ф. Сухонос, П. В. Цокотун, В. В. Слинько, Д. А. Володін // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2020. – № 1. – С. 69– 76. – DOI 10.15588/1607-6885-2020-1-10

8. Knaub L.V, Lebediev B.V, Maslich N.Y. Reduction of toxicity of burnt diesel gases with the additional feeding system // Суднові енергетичні установки 95. – Одеса: НУ Одеська морська академія, 2021. – № 43 – С. 95-100 с.

9. Бойченко С. В. Екологічні аспекти визначення вмісту сірки в нафтопродуктах./ С. В. Бойченко, В. Ф. Новікова, В. М. Турчак, Т. В. Медвєдєва //Вісник НАУ, 2010. №1. С. 219–222.

10.31653/smf47.2023.240-248

Lebedev B.[1], Uminsky S.[2], Korolkova M. [2], Melnik A.[1]

[1]National University "Odessa Maritime Academy"
[2]Odesa military academy

TECHNOLOGY FOR THE RESTORATION OF DIESEL CRANKSHAFTS WITH THE STRENGTHENING OF NECKS

Formulation of the problem. The resource of a marine diesel engine before overhaul depends mainly on the state of the crank mechanism, and the crankshaft is the main link in this mechanism. Crankshafts are among the most critical parts of engines and are operated under conditions of variable loads. Shaft journals are subject to sliding friction at high speeds and high specific pressures. The crankshaft is one of the most important expensive engine parts (its cost is more than 10% of the cost of the entire engine) - to a large extent determines its resource [1-3]. During the operation of such complex and expensive units as internal combustion engines, sudden failures occur, which are caused by parts with defects that require replacement or restoration, and in most cases the necessary technologies for this are not available. As a result of wear, the initial dimensions of the mating surfaces of the parts change, and their geometric shape is distorted if the wear proceeds unevenly. The bonded surfaces of the parts show scratch marks, scuff marks, local metal spalling or spalling, or surface cracks. The latter arise mainly due to metal fatigue. The operation of parts under loads exceeding the calculated ones, and violation of the rigidity and relative position of parts in the assembly, in addition to wear, can lead to more noticeable residual deformations in the form of curvature, torsion, dents, etc. Parts operating at high temperatures are also subjected to action gas corrosion and warping. and additional parts, pressure, welding, surfacing, metallization, electrolytic reduction [1-3]. The presence of parts with repair dimensions, in addition to violating interchangeability, increases the cost and complicates the defect detection, restoration and control of parts, as well as the technological process and assembly organization.

Analysis of current research. The study of literary sources, domestic and foreign experience in the repair and restoration of parts has shown

that the known technologies and methods for the restoration of parts: electric arc surfacing, electrocontact methods of welding materials, electric arc metallization, plasma surfacing, etc., in some cases are difficult in technological execution, time-consuming, unproductive, limited in the

possibility of application to eliminate certain defects. Crankshafts are the most complex and expensive parts of the "shaft" class. Their cost is 10-25% of the cost of the engine, and upon reaching the limit state, about 20% of the shafts are rejected. Technologies for the restoration of crankshafts by coating are mainly focused on ensuring the wear resistance of the journals, but at the same time, the fatigue strength is reduced by 25-30%, and the resource is inferior to the norm. Spraying is used, and the main sprayed material is chromium-nickel powders, which provide the necessary performance characteristics, but at the same time are characterized by high cost. and development of a technology for the restoration of cast-iron crankshafts by spraying with a mixture of powders that provide the necessary standard resource [4-7]. In terms of obtaining high performance characteristics of remanufactured shafts, an important role is played by the microstructure of the coating and its properties on the surface and in the zone of connection with the base material. Optimal in this case is a heterogeneous structure consisting of a matrix and carbides, the content of which is controlled by the presence and ratio of alloying elements. The formation of the type of carbides is strongly influenced by the ratio of chromium and carbon, and the formation of the properties of the matrix is strongly affected by the content of nickel and manganese, but highly alloyed materials of the austenitic class are expensive, therefore, one of the objectives of the study was to select an inexpensive surfacing material that provides the necessary performance characteristics during surfacing. The wear resistance and fatigue strength of deposited coatings can be significantly increased by applying surface plastic deformation after surfacing using tooling that forms a favorable coating texture [4–7]. In most cases, the increase in wear resistance due to hardfacing of high-carbon alloy material leads to a decrease in the fatigue limit of renewable parts. The analysis of crankshaft restoration processes showed that some of them contain energy-intensive operations, the other part increases wear resistance, but at the same time, fatigue strength decreases. To solve this problem, expensive equipment or materials are often used, which are not always justified in repair production. Bearings that are heavily loaded and operate at high speeds require a constant supply of pressurized lubricant to ensure hydrodynamic lubrication. If this is violated (instability of supply, a decrease in lubrication pressure), conditions of semi-liquid lubricants are formed, leading to a decrease in the thickness of the oil film and an increase in the likelihood of contact between microroughnesses of the shaft neck and the liner [8], heat generation in the bearing increases, as a result

of which semi-ridine friction is associated with the danger of overheating and bearing failure. The process of shaft movement in plain bearings is due to changing operating conditions (friction) and shaft displacements in the bearing [9]. In the initial period of rotation and conditions of limiting lubrication, the shaft moves in the direction opposite to rotation, by an angle φ, under such conditions, the microroughnesses of the friction pair touch and wear. With an increase in the rotational speed, the shaft pushes the lubricant under it and “floats up”, forming an oil wedge under it (hydrodynamic lubrication).

Fig. 1. Seizure of the crankshaft journal

The service life of the crankshaft is characterized by the possible recovery number. Another factor that characterizes the durability of the crankshaft is the resistance to tiring loads. Despite the different nature of the external manifestation of failures due to wear and fatigue, they are based on the same physical processes described by the laws of fracture mechanics, according to which most types of wear are of a fatigue nature. Non-compliance of the gaps with the technical conditions in the “neck-insert” interface, changes in the macrogeometry and roughness of the necks lead to a deterioration in the working conditions of the interface,

which causes an intensive increase in the scoring of the interface during the running-in process. Analysis of the results of studies of defects in crankshafts that appear during operation shows that failure of crankshafts in most cases occurs:

- due to scuffing of the necks;
- with the dominant effect of bending in the plane of the crank;
- due to its destruction due to the constant growth of deformations and cracks and the gradual accumulation of local defects.

Changes in the clearances and ovality of the shaft journals as they wear affect the operation of the bearing. As the ovality of the journals increases, the runout of the crankshaft increases, which, in turn, affects their wear. It has been established [10] that there is a correlation between the wear of the crankshaft journals and the runout. Runout not only increases journal wear, which in turn further increases runout, but also increases crankshaft imbalance and engine vibration, and this leads to a decrease in shaft fatigue strength. To increase the durability and improve the operating conditions of diesel crankshaft bearings, it is necessary:

- to increase the wear resistance of the necks of the shafts;
- provide higher wear resistance of the necks compared to wear resistance.

stability of the antifriction layer of plain bearing shells.

The purpose of the work is to increase the efficiency of technical operation by applying the technological process of restoring crankshafts with the strengthening of the necks, which makes it possible to obtain an optimal set of parameters of the wear-resistant coating material and ensure their necessary durability.

Material and research methods. To restore the crankshafts of diesel engines, three technological schemes are used:

- polishing of necks on the repair size;
- polishing of necks on the repair size with the subsequent strengthening;
- coating to restore the nominal size of the necks with subsequent or simultaneous strengthening.

When overhauling a diesel engine, in order to restore the geometry of the journals and gaps in the bearings, the shaft journals can be ground to the repair size with the installation of liners of the repair size, respectively, or the shaft necks can be restored to the nominal size by spraying or welding. Modification with geomaterials should be considered the most optimal finishing operation for processing shaft journals, which makes it pos-

sible to obtain a roughness of not more than Ra = 0.1 μm. There is a need to develop new approaches when choosing a triboconnection and the required service life. Therefore, the development of a methodology for selecting the composition of geomaterials depending on the operating conditions and the specified service life of the triboconnection remains relevant.

The analysis of applied recovery technologies showed that:

- without further strengthening of the necks of the shafts, the fatigue and tribotechnical durability of the shafts is not ensured;

- the issue of developing such a technological process for restoring the crankshaft remains relevant, which would provide the necessary operational properties of the interface and manufacturability of products (low labor intensity, processing accuracy, specified coating roughness parameters). Presentation of the main material.

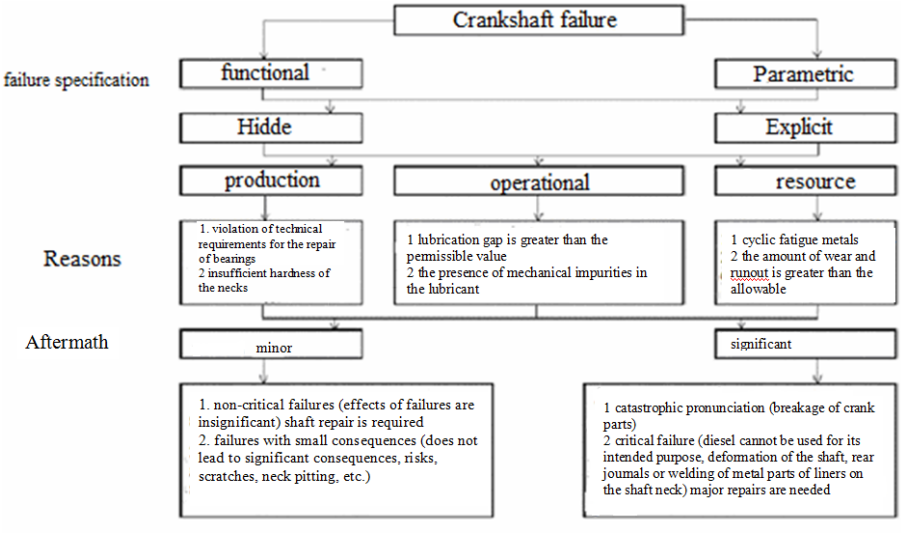


Fig. 2. Classification of failures, crankshafts

The result of functional stops of diesel engines caused by breakdowns of its individual parts and crank assemblies of the engine or other reasons, and precision failures - the values of the dimensional parameters of the necks go beyond the permissible limits. The consequences of such failures are increased wear and scuffing of the shaft journals. Bullying of the necks and melting of the anti-friction ball of the liners, as a rule, lead to deformation of the crankshafts, less often to the breakage of the shaft, i.e., to critical or catastrophic consequences.

As a result of neck wear, shape deviations from roundness (ovality) and cylindricity (taper, barrel or saddle shape) are formed. To reduce the likelihood of scuffing, dashes and scratches on the journals and reduce the wear rate, it is necessary to increase the hardness and wear resistance of the surface layer of the shaft journals. Wear of crankshafts significantly affects the wear rate of other parts of a diesel engine. From the above data, it follows that the dominant degradation processes that cause the predominant part of the functional ones are the phenomena caused by friction processes with limiting or mixed (semi-fluid) lubrication, much less tedious processes. The most promising compositions for strengthening friction surfaces are mineral and organomineral materials [11]. Then the method is selected. At present, the modification of friction surfaces is carried out by the friction method or ultrasonic treatment [11, 12]. To strengthen the necks of crankshafts, the most promising is the friction method. To reduce the likelihood of seizing and tearing during the running-in period and increasing the durability of the “shaft journal – bearing shell” triboconnection by reducing the wear rate, especially during the running-in period, the most promising way to strengthen the crankshaft journals is to create a ceramic-metal thin-film coating on the surfaces. To obtain high wear resistance of the coating, it is necessary to obtain a heterogeneous structure, which has a plastic and durable matrix and solid fillers. Metal-ceramic and organo-ceramic films have such a structure. At present, compositions of geomaterials (natural silicates with a layered structure) based on serpentinite and vermiculite [12] and polymer-silicate nanocomposites based on polytetrafluoroethylene and serpentinite [11], which are capable of forming protective metal-ceramic and polymer-ceramic films, are widely used to modify friction surfaces. on friction surfaces. The rate of layer formation (growth) is proportional to local temperature and pressure flashes at actual contact spots. The landing of the layer primarily occurs on the worn areas of the mating surfaces, as a result, the dimensions and shape of the parts are restored. Natural and artificial [12] silicates have a layered structure with a weak bond between the layers, which facilitates the shear between them. For example, magnesium [MG(OH)2] layers with silicon (Si2O3) layers alternate in the serpentine structure. Wear-resistant ceramic-metal films formed on friction surfaces in the presence of a lubricant composition with the addition of powdered magnesium hydrosilicate can have a hardness of 65–72 HRC, a roughness of Ra from 0.042 to 0.30 μm at a friction coefficient of 0.003, and a fracture temperature of 1700–2000 °C. the main mineral used to obtain ceramic-metal coatings is serpentine

(antigorite, chrysotile and Lizard). Translated into oxides, serpentine contains 43 masses. % MgO, 44 wt. % SiO2 and 12.1-12.9 wt. %H2O. The composition of ingredients in serpentinites can vary widely [11]. The simplest and most technologically advanced way to modify the crankshaft journals is friction-mechanical, so that it allows machining and modification on one machine without reinstalling it. To modify the journals of the crankshafts by the friction-mechanical method, a steel or cast-iron indenter is used, which is pressed against the hardened surface with the necessary force. A mixture of mineral or organo-mineral materials with lubricant is fed into the tribocontact zone. The crankshaft is rotated on a lathe or a specialized machine for grinding crankshafts. The mechanism of formation of a wear-resistant ceramic-metal coating on the friction surface during the friction-mechanical processing method by supplying a lubricant composition containing minerals, organo-mineral or polymer-mineral compositions can be conditionally divided into 2 stages, which are performed in two technological operations:

- The application of a composite modifying material on the friction surface and the formation of individual sections, depending on the energy parameters (sliding speed and pressing force of the indenter to the surface to be strengthened), ranges from one to several minutes (maximum 6 minutes);
- Formation of a wear-resistant ceramic-metal coating.

The execution time of this technological operation does not exceed 1 hour (45-50 minutes). The wear resistance of the coating depends on the parameters of the formation mode (running). The formation of a wear-resistant metal-ceramic coating occurs due to the following processes. During the first technological operation, the friction surface is caricatured by harder particles compared to the hardness of the hardened material, which are part of the mineral or composition, and the particles are densely hardened into the recess of the microrelief. These processes are a necessary condition for launching two processes: abrasive wear (running in) and an unstable process of formation of a protective ceramic film. The microrelief is cleaned of all contaminants (products of wear and decomposition of lubricants, etc.) present on the friction surface.

Modification of the friction surface for the formation of thin-film ceramic-metal, organic-metal-ceramic and polymer-metal-ceramic coatings makes it possible to increase the wear resistance of the tribojoint "crankshaft journal - bearing shell". It is necessary that the composition ensures the creation of a coating having maximum hardness with minimum modu-

li of elasticity and coefficient of friction. The technological process of restoration of diesel crankshafts with the formation of composite coatings is carried out in the following sequence:

1. washing and cleaning of the shaft;
2. fault detection;
3. grinding necks to repair size;
4. neck modification;
5. quality control of the crankshaft.

Conclusions

Currently, composite materials are practically not used, which make it possible to provide the specified indicators of durability of restored parts, due to insufficient knowledge, lack of recommendations for their use depending on operating conditions and sufficient experience in solving technological problems.

To increase the durability of crankshafts up to 40 thousand hours and avoid scuffing, it is necessary to reduce the wear rate of friction surfaces by 1.5 times. To ensure the probability of failure-free operation for P(t) = 0.9, the wear rate of the friction surfaces should be reduced by a factor of 2.3. The recommended materials for modifying crankshaft journals (aluminosilicate modified with metallosiloxane and aluminosilicate modified with polysaccharide and magnesium carbonate) make it possible to increase the wear resistance not only of the shaft, but of the “crankshaft journal - bearing shell” interface, to reduce scuffing due to the formation of a metal-polymer-ceramic coating on the surface. At the same time, the cost of restoring the crankshaft increases only by 12-15%.

References

1. Сімдянкін А.А. Контактно-силова взаємодія деталей циліндро-поршневої групи: Монографія: К. - 2003. - 144 с.

2. Чорновіл М.І. Підвищення якості відновлення деталей машин /М.І. Чорновіл, С.Є. Поєдинок, Н.Є. Степанов - Київ, Техніка, 2009. - 168 с.

3. Гащук П.М., Миськів Т.Г.Нікіпчук С. В. Двигуни. Тепловий тадинамічний розрахунок. Навчальний посібник.-Львів: Українські технології, 2016.-144с.

4. Гур'янов, Г. В. Електроосадження зносостійких композицій / Г.В.Гур'янов. - Кишинів: Штііца, 2015. - 237 с.

5. Данилов, І.К. Моделювання та оптимізація структури експлуатаційно-ремонтного циклу ДВЗ / І.К. Данилов. – К.2014. - 110 с.

6. Черноіванов, В.І. Організація і технологія відновлення деталей машин. - Київ, Агропроміздат, 2009. - 336 с.

7. Radzevich,S/P/ Dudleys Handbook of Practical Gear Design and Manufacture/ 2 nd Edition, CRC Press, Boca Raton, Flonda, 2011, 1111 pages.

8. Bianco/G. And Radzevich,S/P/ Precision Gear Shaving/-Nev York/ Nova Sci ence Publishers/ 2010/- 321 pages.

9. Телух, Д. М. Введення в проблему використання природних шаруватих гідросилікатів у трибосполученнях [Електронний ресурс] / Д. М. Телух, В. В. Кузьмін, В. Н. Усачов // Інтернет-журнал «Тертя, знос, мастило». - 2009. - №3. – С. 1–10. - Режим доступу

10. Oliver, W. C., Pharr, G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // J. Mater. Res. 2004. V. 19 № 1. P. 3-20.

10.31653/smf47.2023.249-263

Zhuravlov Yu.I., Kostyuchenko Ye.F., Povar A.I.

National University "Odessa Maritime Academy"

ASSESSMENT OF THE THERMAL AND STRESS-STRAIN STATE OF CYLINDRICAL SURFACES OF SHIP PARTS WITH WEAR-RESISTANT COATINGS

Statement of the problem and its connection with important scientific or practical tasks

Parts of the ship's technical means (STM) in the process of its operation wear out, as a result of which their sizes and shapes change. When parts reach a critical state, failure occurs and repairs are required to restore their performance.

The need for repair may also arise due to a sudden failure caused by jamming of moving joints, jamming of the shutter, breakage of drive parts, equipment, and so on. Parts of STM can be subjected to various types of wear.

The task of the research will be to determine the weakest points of the ship's technical equipment, in particular, the connections of the parts "shaft-sliding bearing" for their quick detection during the incoming inspection. It is also important to compare the criterion dependencies of the gap for two different types of fittings.

The analysis of the situation shows that the prerequisites for the failure of the STM can be divided into four groups [1]:

1 - damage of a factory nature, appearing in case of low-quality initial control of STM at the factory;

2 - damage that occurred during transportation or factory damage that was not detected during incoming inspection;

3 - damage that occurred directly during operation (vibration and erosion-corrosion damage);

4 - damage caused by poor-quality repair of the STM and its components.

Analysis of recent research and publications

There are various types of defects that affect the performance of parts of the ship's technical equipment

Mechanical wear and tear. Mechanical wear occurs as a result of mutual friction of parts (for example, sealing rings of latches, spindle and running nut in their threaded connection, shafts in sliding bearings). As a

result, mechanical wear (wear) depends on the operating forces, the strength and hardness of the metal of the parts, the number of cycles of operation of the STM and the wear resistance of the rubbing surfaces. Oxidative processes occurring in the surface layer of the metal (oxidative wear), processes of microcutting by abrasive particles (abrasive wear), fatigue processes on the metal surface of gear wheels and ball bearings (fatigue wear), processes of metal adhesion, wintering can play a decisive role in mechanical wear, removing roughness.

Erosive wear. Details of ship's technical equipment that perform liquid throttling are subject to erosive wear: plungers and seats of throttling and regulating valves. Wear during erosive wear depends on the throttling mode of the liquid, the duration of its action on the part and the properties of the material of the part. The processes of crevice and impact erosion and cavitation destruction of metal are distinguished. With crevice erosion, the surfaces of the parts are eroded by the action of a jet of wet steam passing at high speed through the gap formed by the saddle and plunger. In impact erosion, the material is destroyed by the impact of water droplets on the surface of the part. In the cavitation mode of movement in the flow of a fast-moving medium and corresponding hydrodynamic conditions, bubbles (voids) are formed as a result of a violation of its integrity. Collapsing, they create local hydraulic shocks, which, acting on the metal surface, destroy it.

Thermal wear. Thermal wear, or thermal aging of metal, is the result of structural transformations that occur in materials during heating. The most characteristic, for example, is the aging of rubber, as a result of which it loses elasticity, becomes brittle. The stuffing box burns out and hardens under the influence of high temperature and pressure.

Chemical wear. Chemical wear occurs as a result of corrosion - the chemical action of working environments on the material of parts of ship's technical equipment. As a result, chemical compounds with low mechanical properties are formed, which are destroyed under the action of force loads or washed out by the working environment. Salts and gaseous substances can be dissolved in condensate and feed water: air oxygen, carbon dioxide, nitrogen, ammonia, hydrogen, etc. However, metal corrosion is caused only by solutions of salts, oxygen and carbon dioxide. Despite desalination and deaeration, a certain amount of substances that cause corrosion of metals remain in the water, as a result of which oxides are formed that settle on the walls of the equipment, including on the surfaces of parts of the ship's technical equipment.

- Corrosion. Corrosion can manifest itself in different ways: general (of the entire metal surface); cracks (cracking of steel); crevice, intercrystalline, pitting (ulcer, point) and others (knife, erosion, selective etching). For STM, the greatest danger is corrosion cracking of steel, which occurs under the simultaneous action of the environment and mechanical stress, including residual stress, for example, created after welding or heat treatment. High-strength steels and alloys are most prone to corrosion cracking: cracks can develop between crystal grains (intercrystalline corrosion) or crossing grains (transcrystalline corrosion).

The listed mechanical, erosive, thermal and chemical wear under known conditions can act simultaneously, which accelerates the failure of parts. Since during the operation of the STM, the wear and tear processes of the parts occur continuously, systematic monitoring of their technical condition is required to detect possible malfunctions.

Setting objectives

The purpose of this study is to determine the weakest parts of the STM, in particular, the combination of "shaft-sliding bearing" parts for their quick detection during incoming inspection.

Key words: ship technical equipment, defects of ship parts, "shaft-sliding bearing" combination, wear of surfaces.

Teaching the main research material

Properties of composite material for ship parts can be considered in two directions. The first are those that depend exclusively on the geometric arrangement of the phases and their corresponding volume fractions, but do not depend on the sizes of the components at all. The second are those that depend on structural factors, such as the periodicity of the arrangement or the sizes of the particles of two or more constituent phases [2-4].

Coefficients of thermal expansion of composites include both elastic constants and coefficients of thermal expansion of individual phases. An important function of reinforcing fillers and fibers in the main material is the reduction and control of thermal expansion [5-8].

The strength of a brittle solid material containing a crack depends on the square root of the crack length. Because very small particles cannot contain long cracks, and because the surface region of most solids behaves differently than the interior (a small fiber or sphere contains proportionally more surface material than a large piece), the tensile strength depends on the size of the part being tested.

The strongest materials are ceramics, consisting of elements from the first rows of the periodic table (B, C, SiC, $A1_2O_3$, etc.). This is because these elements contain the largest possible block of strong covalent bonds directed in three dimensions. Such materials also have a high melting point, low coefficient of thermal expansion, and low density. All of these are highly desirable engineering properties.

Strong fibers, whether rigid or not, also have the great advantage of restraining cracking in so-called brittle matrices (Fig. 1). A crack passing through a brittle material may not penetrate the fibers, but leaves a fiber-lined crack so that the material in which the crack is located is prone to cracking in a large number of places before the fibers themselves fail or pull out.

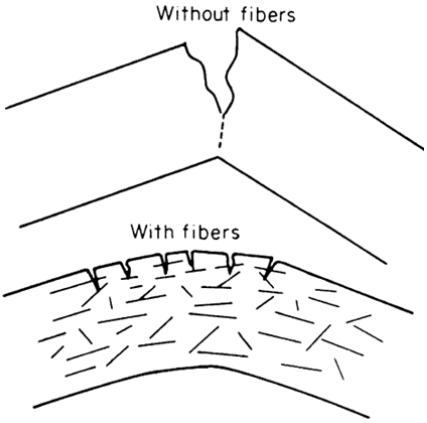


Fig. 1. Demonstration of how fibers prevent cracks in a brittle material from propagating through the fibers into their path

Frictional properties such as wear resistance can, for example, be significantly improved with the help of reinforcing inclusions: the tribological behavior is to some extent determined only by the surface material, it is less important if the reinforcing structure is fibrous or not. Solid ceramic particles added to polymers or metals thus provide very good improvements in wear and abrasion resistance, as well as fibers. An example is aluminum reinforced with SiC particles. This composite is used to make high-performance brake discs, which are strong, light, excellent heat conductors and sufficiently fire-resistant.

Although less effective than with fiber, the viscosity of a brittle matrix can also be improved by adding whiskers, short fibers, or single particles. This can be done using several mechanisms. The reinforcement can be a

much stiffer phase than the matrix, which (provided the crack does not penetrate between particles) prevents crack propagation by forming bridges that bring the crack matrix closer together.

Increases in strength and toughness can be achieved in ceramics undergoing stress-induced transformation [8]. The most impressive is the case of ceramics containing zirconium particles, which represent a tetragonal to monoclinic phase transformation. Using the addition of CeO2 and others, at room temperature you can get a metastable solid tetragonal solution. Under the influence of the applied load, a transformation from martensitic-tetragonal (t) to monoclinic (m) takes place in the vicinity of the crack, which is associated with an increase in volume and shear deformation, which prevent crack propagation and therefore lead to an increase in viscosity. This is an increase ΔK_c^t AKgf, given [9]:

$$\Delta K_c^t = \frac{\eta E e^T V h^{0,5}}{1-\mu},$$

where η is a coefficient that depends on the shape of the transformation zone around the crack, h is its width, E is the effective Young's modulus of the material, V is the volume fraction of transformed particles, e^T is an unbounded deformation transition, μ is Poisson's ratio.

The width of the zone and the volume fraction of the transformed particles depend on the microstructure and especially on the grain size of the material due to the critical stress for the transformation of ac. The larger the grain size, the smaller the ac index, the higher the volume fraction of transformed particles; however, when the grain size becomes larger than the critical size d_e, heating creates conditions for the transformation that occurs during cooling, and most grains are already transformed before crack growth.

When the particle size exceeds the critical size d_e, microcracks appear, which lead to a decrease in the strength of the material [9, 10]. However, if the particle size is smaller than the critical size, microcracks require additional stress that can be provided by the applied load. For effective microcrack reinforcement, the reinforcement must be placed in the technological process zone before the end of the crack. The size of the particles should be as close as possible to the critical size in order to cause significant amplification.

Cracks can be deflected either by stress fields present around the particles or by solid particles of higher resistance. This mechanism leads

to a non-planar crack subject to a mixed failure mode. Regarding discs and rods, the effect of the aspect ratio was investigated. High deflection and, therefore, high stiffness are obtained by rod particles with a high aspect ratio for a volume fraction of about 10-20%.

Cyclic loading contributes to the rate of crack growth and leads to a decrease in the threshold stress. Fatigue behavior can be characterized as the spread of corrosion under load associated with increased degradation [7]. There are several rigid mechanisms (intensification of transformation, bridging of cracks, microcracks).

Residual stress due to thermal mismatch is an important parameter affecting crack resistance. When the coefficient of thermal expansion of the particles is lower than that of the matrix, the composites will most likely resist microcrack development, while, conversely, the crack resistance will be mostly determined by the crack-particle interaction.

A good example of destruction by microcracks is observed in SiC—Al_2O_3 composites: the maximum viscosity occurs as a function of the particle content. The highest strengthening is achieved with the smallest particles, but degradation of strength is observed for large particles, due to the formation of large cracks.

Improvements in creep resistance in other matrices for particle or tube composites are also observed, but generally low. However, excellent resistance to creep is obtained for mulito-zirconium composites and Si_3N_4 composites.

Currently, a new class of structural ceramic materials with effective mechanical properties is being developed. These materials are known as "ceramic nanocomposites", they are obtained by combining a structural ceramic matrix, such as Al_2O_3, ZrO_2 or Si_3N_4, with a nano-sized second phase. Second phases are typically used as "nanoparticles" of 300 nm or less and are added in amounts from 1 vol. % up to 30 vol. % [4]. It was reported that ceramic nanocomposites have both room and high-temperature properties, which significantly exceed the properties of the monolithic matrix in various material systems, which indicates that there is a "structural synergism" of the system between the matrix and the second phase [3-5]. The most widely studied ceramic nanocomposite Al_2O_3-SiC has a promising development.

The processing steps used to obtain nanocomposites have a significant effect on their microstructures and properties. It is well known that the properties of a nanocomposite strongly depend on the dispersion of the second phase [6]. In particular, the uniform dispersion of the second phase

is critical for obtaining the necessary properties in the nanocomposite relative to the monolith. Unfortunately, the spatial distribution of the second phase is very sensitive to the used processing conditions, which indicates that small changes in processing can lead to significant differences in the properties of the nanocomposite.

In nanocomposites with a large volume fraction of the second phase (45 vol%), the matrix grains are equated to a narrow size distribution, and the particles of the second phase are evenly distributed between the matrix grains. An example of this type of microstructure (5 vol.% SiC in Al_2O_3) can be seen in Fig. 2. On the contrary, in samples with a low volume fraction of the second phase, the grain size distribution of the matrix grain can be much wider and in extreme cases there can be anomalous grains.

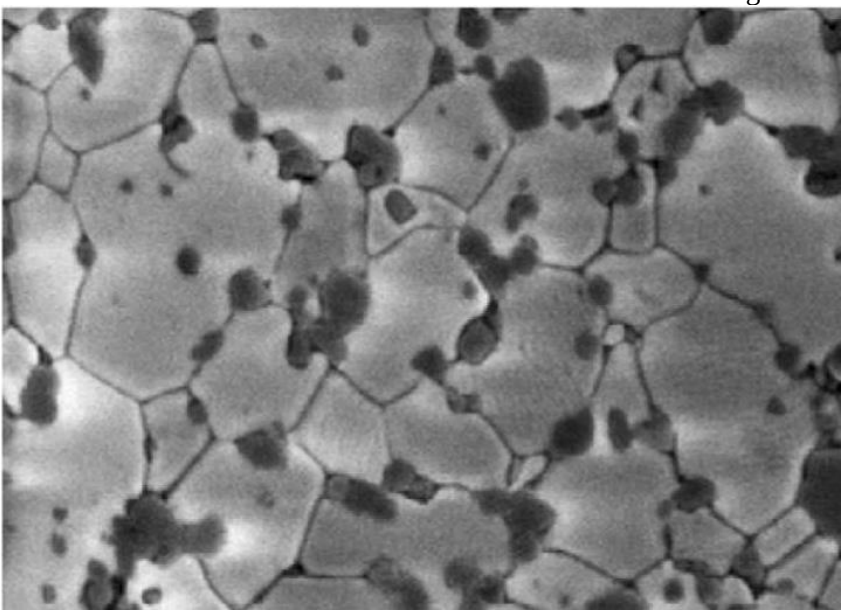


Fig. 2. Scanning electron microscope image of the microstructure of $A1_2O_3$ nanocomposite and 5 vol. % SiC, which shows the presence of both intergranular and intragranular particles

As shown in Fig. 2, the particles of the second phase in the nanocomposite are located either on the grain boundaries (intergranular) or inside the grain (intragranular). In particular, it is believed that intragranular particles are responsible for the excellent properties of the nanocomposite at room temperature, while intergranular particles are responsible for its high-temperature properties. Intergranular particles also

significantly increase the microstructural stability of the nanocomposite. The interaction of particles with grain boundaries strongly inhibits matrix grain growth, which, as a rule, takes place at high temperature. Figure 3 shows SiC particles that inhibit grain growth in the nanocomposite by establishing migrating grain boundaries. The relative proportions of intra- and intergranular particles are strongly related to the grain size of the matrix in the $A1_2O_3$ -SiC system, while the percentage of intergranular particles significantly decreases with grain size. For example, approximately 70% of the particles are expected to be intergranular for a grain size of 1 mm, while 25% of the particles should be intergranular for a grain size of 5 μm [7].

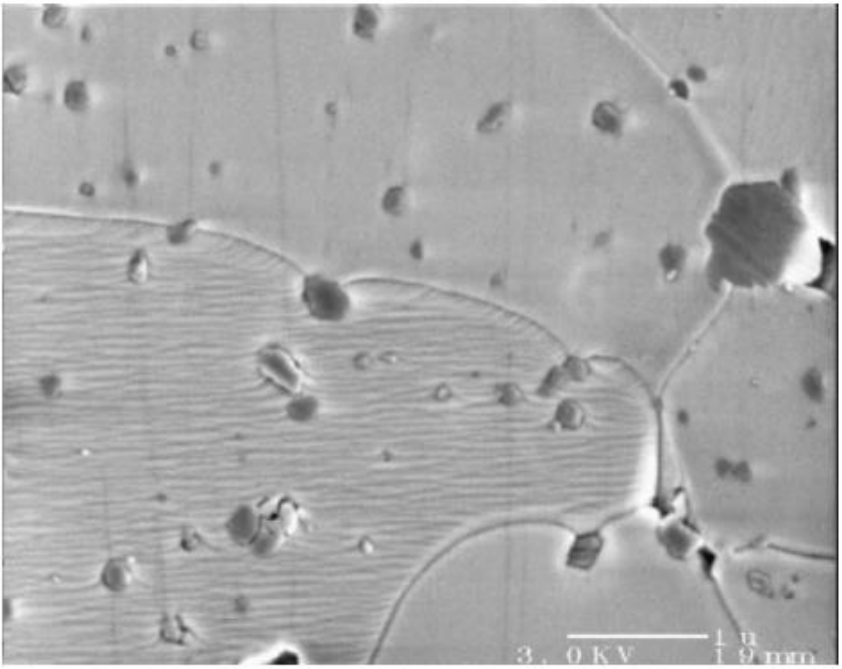


Fig. 3. Image from a scanning electron microscope of SiC particles (5 vol. %) inhibiting grain growth by establishing the migration boundaries of $A1_2O_3$ grains

High-temperature properties of $A1_2O_3$-SiC nanocomposites. The excellent strength and viscosity of the nanocomposite is maintained at room temperature up to 1000 °C [3]. Also, at higher temperatures, the creep resistance of A12O3 is significantly increased due to the presence of 8iC particles [6]. As shown in Fig. 4, the creep rate of $A1_2O_3$ containing 5

vol. % 8iC (150 nm), 2-3 orders of magnitude lower than that of monolithic $A1_2O_3$ at temperatures up to 1300 °C. In addition, the creep duration of the nanocomposite is an order of magnitude longer than that of the monolith. Unfortunately, the deformation index of the nanocomposite is lower than that of $A1_2O_3$, due to the nucleation of intergranular particle cavities. The improved creep resistance of $A1_2O_3$—SiC is explained by a number of mechanisms. These mechanisms include a decrease in the rate of grain diffusion through the boundary of granular particles; inhibition of form placement processes necessary for creep, such as sliding and grain migration; and reducing the internal diffusivity of the A12O3 grain boundary by contamination with silicon cations.

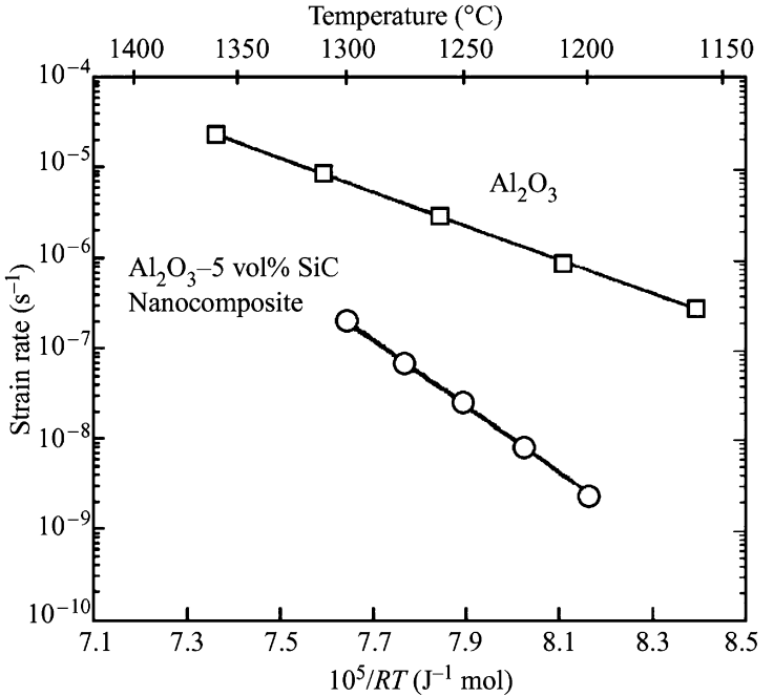


Fig. 4. Diagram of the rate of creep deformation as a function of temperature for monolithic nanocomposites $A1_2O_3$ and $A1_2O_3$ with 5 vol.% SiC [4]

Study of thermomechanical processes in coated products during their processing and operation to determine the conditions for the formation of defects in the coating peeling from the base material and their elimination, taking into account the physical and mechanical condition of the surface layer, technological parameters of the finishing treatment, and hereditary

defects arising in the process application of coatings, show that during translational movement of a cutting tool in a cylinder with out-of-roundness δ (or roughness Ra) in the area (-a; a), zones of partial peeling of the coating are formed on its working surface. Under the influence of working tangential stresses, these areas can reach such values that the coating peels off from the matrix of the cylindrical surface.

Let's find out under which peeling parameters, related to the roughness of the working surface of the cylinder and its geometric error, as well as the physical and mechanical properties of the coating and the material of the cylinder, destruction of its own coating occurs.

The calculation scheme for determining the stress-strain state of the "cylinder-coating" system is given in Fig. 5.

The first step is to consider the equation of thermal conductivity for a two-layer cylinder with symmetrical heating, with free heat exchange with the inner and outer surfaces of the cylinder. The temperature and heat flow in the vicinity of the interface changes continuously.

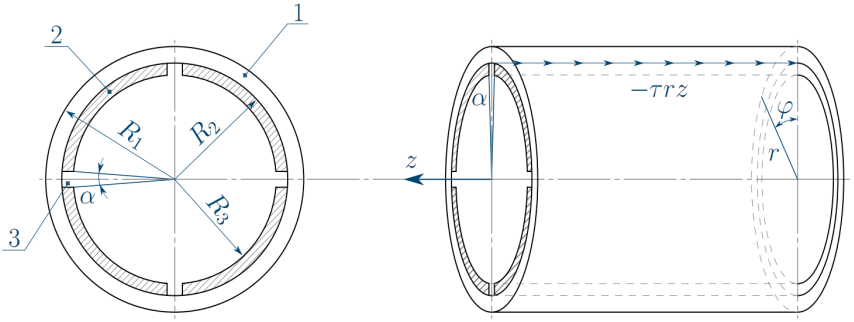


Fig. 5. Calculation scheme for determining the stress-strain state: 1—cylinder body; 2 — coating body; 3 —areas of the absence (exfoliation) of the coating

In other words, we have the following task: to find a continuous function ti(r,τ) in the domain D{ R1≤r≤R3, 0 ≤τ <∞] that satisfies the equation [8-9].

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \alpha_i \left(\frac{\partial^2 t_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t_i}{\partial r} \right), \qquad (1)$$

where i =1 for the first region D{ R1≤r≤R3, 0 ≤τ <∞], i =2 for the second region D{R1≤r≤R3, 0 ≤τ <∞]

boundary conditions:

$$\frac{\partial t_1}{\partial r} - h_1\left[t_1 - T_1(\tau)\right] \ when\ r = R_1,$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial r} - h_2\left[t_2 - T_2(\tau)\right] \ when\ r = R_3; \qquad (2)$$

connection conditions:

$$t_1 = t_2, \ \ \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r} \ \ when\ r = R_2; \qquad (3)$$

initial condition:

ti{г, 0) = Φi

Here, αi, hi, λi, are the coefficients of thermal conductivity, relative heat transfer, and thermal conductivity, respectively, of the coating (i = 2) and the base material (i = 1).

The functions Φi(г), Ti(τ) satisfy the following conditions:

Ti(τ) is a function differentiated with respect to τ. In addition:

$$\int_0^{\tau}\int_{R_0}^{R_{\Phi i}} \frac{\partial T_i}{\partial \tau}\left[AI_0\left(\gamma_n \frac{r}{\sqrt{\alpha_i}}\right) + BN_0\left(\gamma_n \frac{r}{\sqrt{\alpha_i}}\right)\right]\exp\left[-\gamma_n^2\left(\tau - \bar{\tau}\right)\right] dr d\bar{\tau} < \infty \qquad (4)$$

Φi(г) is a continuous function with respect to г, the derivative of which may have a discontinuity

of the first kind at r = R2.

We will look for a solution to problem (1)-(4) in the form:

$$t_i = \left[T_2(\tau) - T_1(\tau)\right]\left(A_i \ln r + B_i\right) + T_i(\tau) + \theta_i(r,\tau). \qquad (5)$$

The solution for θ_i is found by the method of finite integral transforms, the kernels of which $u_{ni}(г)$ are the Bessel equation:

$$u_{ni}^{//} + \frac{1}{r}u_{ni}^{/} + \frac{\gamma_n^2}{\alpha_i}u_{ni} = 0; \qquad (6)$$

with boundary conditions:

$$u_{ni}^{/} - h_1 u_{ni} = 0; \quad при\ r = R_1; \qquad (7)$$

$$u_{1n} = u_{2n}, \gamma_1 u_{1n} = \gamma_2 u_{2n} \quad при\ r = R_2;$$

$$u_{2n} + h_2 u_{2n} \quad при\ r = R_3.$$

The final solution of problems (1)-(4) will be written as follows:

$$t_i(r,\tau)=\psi_i(r,\tau)+\sum_{n=1}^{\infty}\exp\left(-\gamma_n^2\tau\right)\left[\bar{\theta}_n(0)+\int_0^{\tau}\frac{d\bar{\psi}_n(\bar{\tau})}{d\bar{\tau}}\exp\left(-\gamma_n^2\bar{\tau}\right)d\bar{\tau}\right]u_{ni}(r)$$

Here $\psi_i(r,\tau)=\left[T_2(\tau)-T_1(\tau)\right](A_i\ln r+B_i)+T_i(\tau)$.

To determine the stress-strain state of a cylinder with a coating due to the action of a temperature field, consider the following problem. A two-layer unlimited hollow cylinder, on the inner surface of which a temperature field $t_i = t_i(r, \tau)$. acts. The materials of the cylinder and the coating are in contact along the entire surface of the interface and, therefore, the movements on the interface will be continuous. Another condition at the interface is obtained from the condition of continuity of normal stresses σ_r. On the outer surfaces, σg are assumed to be zero. Thus, we have the following problem: to find a continuous function $u_i(r, \tau)$ in the region $D\{R_1 \le r \le R_3,\ 0 \le \tau < \tau_0]$, which satisfies the equation:

$$\frac{1}{c_i^2}\frac{\partial^2 u_i}{\partial\tau^2}=\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_i}{\partial r}-\frac{u_i}{r^2}-m_i\frac{\partial t_i}{\partial r}; \qquad (8)$$

where i = 1 for the first region, i.e. when r changes from R_1 to R_2 and i = 2 for the second region when r changes from R_2 to R_3; $u_i(r,\tau)$ — displacement, C_I — propagation speed of expansion waves in an elastic medium; with boundary conditions:

$$\frac{\partial u_1}{\partial r}+p_1u_1=m_1t_{1,} \qquad when\ r=R_1,$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial r}+p_2u_2=m_2t_{2,} \qquad when\ r=R_3 \qquad (9)$$

with connection conditions:

$$u_1=u_2,\frac{\partial u_1}{\partial r}+q_{12}u_1=\frac{\partial u_2}{\partial r}+p_{12}m_1t_1-m_2t_{2,} \quad when\ r=R_2, \qquad (10)$$

with initial conditions:

$$u_i(r,0)=\Phi_i(r),\frac{\partial u_i(r,0)}{\partial\tau}=\psi_i(r), \qquad (11)$$

We will look for a solution to this problem in the form of:

$$u_i(r,\tau)=\psi_i(r,\tau)+\theta_i(r,\tau)$$

Here

$$\psi_i(r,\tau) = A_i(\tau)r + \frac{B_i(\tau)}{r} + \frac{m_i}{r}\int_{R_i}^{r} t_i(\rho,\tau)\rho\partial\rho$$

quasi-static solution of problem (8)-(11). Ai(τ) and Bi(τ)) are some functions that are chosen so that homogeneous boundary conditions are fulfilled for the function θi(r,τ). The solution obtained for Θi is obtained by the method of finite integral transforms.

The corresponding transform formulas have the form:

$$\vec{\theta}_n = \frac{p_{12}}{c_1^2}\int_{R_1}^{R_2}\theta_1\omega_{1n}rdr + \frac{1}{c_1^2}\int_{R_1}^{R_2}\theta_2\omega_{2n}rdr,$$

$$\theta_i = \sum_{n=1}^{\infty}\vec{\theta}_n\omega_{ni} \quad \left(R_i \le r \le R_{i+1}\right)$$

Here $\omega_{ni}(r)$ is a solution of Bessel's equations:

$$\omega_{ni}^{n} + \frac{1}{r}\omega_{ni}^{'} + \left(\frac{\gamma_n^2}{c_1^2} - \frac{1}{r^2}\right)\omega_{ni} = 0,$$

with boundary conditions:

$$\omega_{1n}^{'} + p_1\omega_{1n} = 0 \quad when\ r = R_1,$$

$$\omega_{1n} = \omega_{2n},\ p_{12}\omega_{1n}^{'} + q_{12}\omega_{1n} \quad when\ \ r = R_2,$$

$$\omega_{2n} + p_2\omega_{2n} = 0 \quad when\ r = R_2.$$

to determine Θ_n we have the equation:

$$\frac{d^2\overline{\theta}_n}{d\tau^2} + \gamma_n^2\overline{\theta}_n = -\frac{d^2\overline{\psi}_n}{d\tau^2}, \qquad (12)$$

with initial conditions:

$$\overline{\theta}_n = \overline{\Phi}_n - \overline{\psi}_n, \frac{d\overline{\theta}_n}{d\tau} = \overline{\psi}_n - \frac{d\overline{\psi}_n}{d\tau} \quad при\ \ \tau \qquad (13)$$

The solution of equation (12) with the initial conditions (13) will be written as follows:

$$\overline{\theta}_n = c_{1n}\cos\gamma_n\tau + c_{2n}\sin\gamma_n\tau - \frac{1}{\gamma_n}\int_0^{\tau}\frac{d^2\overline{\psi}_n}{d\tau^2}\sin\left[\gamma_n\left(\tau - \overline{\tau}\right)\right]d\overline{\tau}, \quad (14)$$

where

$$c_{1n} = \overline{\Phi}_n(0) - \overline{\psi}_n(0),\ c_{2n} = \frac{1}{\gamma_n}\left[\overline{\psi}_n(0) - \frac{d\overline{\psi}_n(0)}{d\tau}\right].$$

Conclusions and prospects for further research

1. The mechanism of the formation of defects in the surface layer of ship parts of "shaft-sliding bearing" connections with wear-resistant coatings prone to the formation of cracks is determined.

2. The dependence of the rate of creep deformation as a function of temperature for monolithic nanocomposites Al_2O_3 and Al_2O_3 with 5 vol.% SiC was established.

3. A mathematical model of the thermal and stress-strain state of cylindrical surfaces of ship parts with wear-resistant coatings has been constructed. This approach makes it possible to study processes in heterogeneous environments with variable parameters with the necessary accuracy, which in turn opens up new opportunities for their research.

References

1. Pavlyshyn P. Damage to power valves and their input control. 11 Proceedings of the Odessa Polytechnic University, 2019. - Output. 3(59). - c. 64-67.

2. X-ray Tomography in Material Science / ‚J. Baruchel, G. Peix, ‚J. Y. Buffiere et al. — Hermes Science, 2000. — 1SBX: 9782746201156.— Access mode: https://books.google.com.ua/books?id=RrlRAAAAMAAJ.

3. Bader M. G. Handbook of composite reinforcements // International Materials Reviews. — 2012.— jan. — Vol. 39, no. 3. — P. 123-124.

4. Gay D. Composite Materials: Design and Applications. Third Edition. — 3rd edition. — Boca Raton : CRC Press. 2014. — P. 635. — ISBN: 9780429101038. — Access mode: https : //www. taylorfrancis com/books/9780429101038.

5. Test Methods, Nondestructive Evaluation, and Smart Materials / L. Carlsson, R. L. Crane, K. Ucliino et al. // Comprehensive Composite Materials. — 2000. — Vol. 5.

6. Chawla K. K. Composite Materials: Science and Engineering. Materials Research and Engineering. — New York :Springer, 2013. — ISBN: 9781475739121.—Access mode: https://books.google.com.ua/books7id=87LaBwAAQBAJ

7. Christensen R. M. Mechanics of Composite Materials. Dover Civil and Mechanical Engineering. — Dover Publications, 2012. — ISBN: 978048G136GG0.—Access mode: https://books.google.com.ua/books?id=ean01ydtVc4C.

8. Chou T. W. Microstructural Design of Fiber Composites. Cambridge Solid State Science Series. — Cambridge University Press, 2005.— ISBN: 9780521019651. — Access mode: https://books.google.com.ua/ books7id=pHlER7dPXr4C.

9. Green D. J. Transformation toughening of ceramics. — CRC press, 2019.

10. Pavlyshyn P. Device for electric drives torque diagnostics and its characteristics study // Koroliov A., Kozlov I., Pavlyshyn P., Turmanidze R., Yeputatov Yu. // Lecture notes in mechanical engineering, 2020. - p. 159-165.

РЕФЕРАТИ

Афтанюк В.В., Кіріс О.В., Афтанюк А.В. **Аналіз експлуатації та модернізація клапанів нагнітання газу двохпаливних суднових двигунів**

У статті представлені результати аналізу експлуатації та шляхів модернізації клапанів нагнітання газу двохпаливних суднових двигунів.

У суднових умовах роботи двохпаливних двигунів виникає ряд експлуатаційних проблем: перегрів газоблоку через заклинювання клапана електронного уприскування газу; недосконале програмне забезпечення системи управління двигуном; відмови в допоміжних системах постачання газового палива; руйнування форсунок подавання газоподібного палива внаслідок перегріву.

Однією з наважливих проблем є швидкий вихід з ладу форсунок подавання газоподібного палива внаслідок перегріву, що призводить до неможливості використання газоподібного палива, тобто двигун повинен працювати тільки на рідкому паливі, що зніжує екологічні показники судна.

Для модернізації форсунок подавання газоподібного палива проведено аналіз технічних рішень, що дозволив визначити напрямок подальших досліджень.

Математична модель течії газу крізь отвір в головці клапану, враховує проходження газового потоку крізь малий отвір з резервуару необмежених розмірів (рис. 3). Визначення втрат напору, в цьому випадку базується на математичній моделі каналу з раптовим звуженням, в якому місцеві опори обумовлені тертям потоку при вході у вужчий отвір та вихроутворенням.

Забезпечення більш довготривалої роботи газорозподільного головки клапану запропоновано збільшити товщину стінки головки, а для зменшення гідравлічного опору змінити форму отвору.

Для поліпшення роботи клапанів нагнітання газу обґрунтована конструктивна зміна газорозподільного отвору, що передбачає збільшення товщини стінки та зміну форми отвору, тобто виконання отвору у формі сопла (рис.4) зі ступенем звуження n = 0,5.

Для подальшого дослідження течій запропоновано розробити твердотільну модель головки клапану нагнітання газу та провести комп’ютерне моделювання потоків – CFD моделювання.

Ключові слова: суднові двохпаливні двигуни клапан нагнітання газу, математичне моделювання газових потоків.

Aftaniuk V., Kiris O., Aftaniuk A. **Analysis of operation and modernization of gas injection valves of dual-fuel marine engines**

The article presents the results of the analysis of operation and ways to modernize the gas injection valves of dual-fuel marine engines.

A number of operational problems arise in shipboard conditions of dual-fuel engines: overheating of the gas block due to jamming of the electronic gas injec-

tion valve; imperfect software of the engine management system; failures in auxiliary gas fuel supply systems; destruction of gaseous fuel supply nozzles due to overheating.

One of the pressing problems is the rapid failure of gaseous fuel supply nozzles due to overheating, which leads to the impossibility of using gaseous fuel, that is, the engine must work only on liquid fuel, which reduces the ship's environmental performance.

An analysis of technical solutions was carried out for the modernization of gaseous fuel supply nozzles, which made it possible to determine the direction of further research.

The mathematical model of gas flow through a hole in the valve head takes into account the passage of gas flow through a small hole from a reservoir of unlimited dimensions (Fig. 3). Determination of head losses, in this case, is based on a mathematical model of a channel with a sudden narrowing, in which local resistances are caused by friction of the flow at the entrance to the narrower opening and vortex formation.

To ensure longer-term operation of the gas distribution head of the valve, it is proposed to increase the thickness of the head wall, and to reduce the hydraulic resistance, change the shape of the hole.

To improve the operation of the gas injection valves, a structural change of the gas distribution hole is justified, which involves an increase in the wall thickness and a change in the shape of the hole, i.e. making the hole in the shape of a nozzle (Fig. 4) with a degree of narrowing n = 0.5.

For further study of flows, it is proposed to develop a solid-state model of the gas injection valve head and conduct computer simulation of flows - CFD modeling.

Key words: marine dual-fuel engines, gas injection valve, mathematical modeling of gas flows.

Богач В.М., Обертюр К.Л., Довиденко Ю.М. **Вдосконалення процесу подачі мастила в циліндри суднових дизелів**

Публікація присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності роботи суднових дизелів шляхом вдосконалення процесів мащення циліндрів. У роботі виконано аналіз стану питання по досліджуваній проблемі, в результаті якого визначені основні недоліки процесу мащення циліндрів суднових дизелів.

Виконано аналіз умов питання з досліджуваної проблеми та визначено недоліки систем мащення дизельних двигунів. Проведено дослідження з вивчення процесів змащення циліндрів суднових двигунів, що дозволило отримати уявлення про загальну продуктивність цих систем. При цьому використовуються сучасні методи дослідження.

Цими дослідженнями визначено, що процес змащування супроводжується «виштовхуванням» частини масла в циліндр, гази поширюються в

каналі, що викликає реальну втрату циліндрового масла і виникнення додаткового джерела відкладень. Визначено характеристики процесу змащення, та їх взаємозв'язок з конструкцією змащувальних пристроїв.

Експериментально підтверджено вплив геометричних параметрів змащення системи каналів на характеристики процесу витікання масла в циліндр і в кінцевому результаті на ефективність його використання в двигуні.

В цілому описані вище рішення забезпечують підведення всього масла безпосередньо до стика "кільце-втулка" і, тим самим, створюють умови для подальшого вдосконалення організації змазування циліндра.

За рахунок капілярних властивостей каналу, що забезпечують постійну заповненість його маслом, гранично обмежене проникнення гарячих газів, яке, крім окисних процесів, супроводжувалося інтенсивним перемішуванням з маслом і приготуванням суміші, що інтенсифікує концентрованість порцій.

Розроблено мастильний пристрій який дозволяє підвищити ефективності використання мастила і поліпшити стан дизеля, що є ефективним напрямком підвищення економічності роботи суднових дизелів.

Ключові слова: судновий дизель, система мащення, лубрикатор, мастилопідводящий канал, процес мастилоподачі, циліндрова втулка, поршень, поршневе кільце, знос, нагар.

Bogach V.M., Obertyur K.L., Dovidenko Y.M. **Improvement of the lubrication supply process in the cylinders of marine diesel engines**

The publication is dedicated to solving the current problem of increasing the efficiency of marine diesel engines by improving cylinder lubrication processes. In the paper, an analysis of the state of the problem under study was performed, as a result of which the main shortcomings of the process of greasing the cylinders of marine diesel engines were determined. An analysis of the conditions of the problem under study was performed and the shortcomings of diesel engine lubrication systems were identified.

A study was conducted to study the lubrication processes of ship engine cylinders, which allowed to get an idea of the overall performance of these systems. At the same time, modern research methods are used. These studies determined that the lubrication process is accompanied by the "pushing" of part of the oil into the cylinder, gases spread in the channel, which causes a real loss of cylinder oil and the appearance of an additional source of deposits. The characteristics of the lubrication process and their relationship with the design of lubrication devices are determined.

The influence of the geometric parameters of the channel system lubrication on the characteristics of the process of oil flow into the cylinder and, ultimately, on the efficiency of its use in the engine, has been experimentally confirmed. In general, the solutions described above ensure that all the oil is supplied directly to

the "ring-sleeve" joint and, thereby, create conditions for further improvement of the organization of cylinder lubrication.

Due to the capillary properties of the channel, which ensure its constant filling with oil, the penetration of hot gases is extremely limited, which, in addition to oxidative processes, was accompanied by intensive mixing with oil and the preparation of a mixture that intensifies the concentration of portions.

A lubrication device has been developed that allows you to increase the efficiency of the use of lubricants and improve the condition of the diesel engine, which is an effective way to increase the efficiency of the operation of marine diesels.

Keywords: ship diesel engine, greasing system, greasing channel, greasing process, cylinder plug, piston, a piston ring, deposits.

Заблоцький Ю.В. **Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння**

Розглянути питання щодо зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння. Визначено що енергетичні комплекси суден морського та внутрішнього водного транспорту є багатокомпонентними структурними об’єктами, при цьому їх функціонування починається з прийому на борт судна робочих рідин (палива, мастила, води); їх основним експлуатаційним завданням є перетворення потенційної енергії робочих рідин на корисну роботу, що забезпечує або рух судна, або вироблення теплової та електричної енергії; завершальним етапом їх виробничого циклу є видалення відпрацьованих газів і охолоджувальних рідин у довкілля. Як результат аналізу досвіду проектування та експлуатації суднових пропульсивних комплексів, що забезпечують мінімальний рівень необертових втрат, визначено, що найбільшим доступним в умовах експлуатації вже існуючого енергетичного обладнання є оптимізація роботи циркуляційних систем мащення, при цьому з цілого ряду методів, що є найбільш прийнятними для суднових умов (з технологічної та фінансової точки зору), є використання оптимального доливання мастила в циркуляційну систему мащення та застосування поверхнево активних речовин. Підтвердженням цього стали результати випробувань, що виконувались на суднових дизелях 6EY22AW та полягали в вимірюванні механічного коефіцієнта корисної дії на різних режимах роботи (що відповідають 35-ти, 50-ти, 65-ти і 80-ти %-ому навантаженню) за різної інтенсивності поповнення системи мащення (через кожні 100 годин роботи, через кожні 25 годин роботи та через кожні 10 годин роботи) та за різних варіантах додавання поверхнево активних речовин до моторного мастила.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що зниження механічних втрат дизеля пропорційне зростанню його механічного коефіцієнту корисної дії. Цей параметр під час роботи дизеля 6EY22AW фірми Yanmar з рекомендованою фірмою-виробником інтенсивністю доливання

моторного мастила в циркуляційну систему мащення та без додаткового додавання поверхнево-активних речовин до об’єму моторного мастила в діапазоні навантаження 35…80 % від номінального навантаження знаходиться в межах 0,722…0,842. Вибір оптимального режиму поповнення циркуляційної системи, а також додавання в загальний обсяг циркуляційної системи поверхнево-активної речовини з оптимальною концентрацією сприяє 9,62…14,62 %-ому збільшенню механічного коефіцієнту корисної дії дизеля та відповідному зменшенню його механічних втрат.

Ключові слова: втрати енергії, мащення суднових дизелів, механічний коефіцієнт корисної дії, моторне мастило, поверхнево-активна речовина, судновий дизель, циркуляційна система мащення.

Zablotskyi Yu.V. **Reduction of energy losses during lubrication processes of marine internal combustion engines**

To consider the issue of reducing energy losses during the lubrication processes of marine internal combustion engines. It was determined that the energy complexes of sea and inland water transport vessels are multi-component structural objects, while their functioning begins with the reception of working fluids (fuel, lubricants, water) on board the vessel; their main operational task is to convert the potential energy of working fluids into useful work, which ensures either the movement of the vessel or the production of thermal and electrical energy; the final stage of their production cycle is the removal of waste gases and coolants into the environment. As a result of the analysis of experience in the design and operation of ship propulsion systems, which ensure a minimum level of non-rotating losses, it was determined that the most available in the conditions of operation of already existing power equipment is the optimization of the operation of circulating lubrication systems, while from a number of methods that are the most acceptable for ships conditions (from a technological and financial point of view), there is the use of optimal addition of lubricant to the lubrication circulation system and the use of surface-active substances. This was confirmed by the results of tests performed on 6EY22AW marine diesel engines, which consisted in measuring the mechanical efficiency coefficient at different operating modes (corresponding to 35, 50, 65 and 80 % load) at different intensities replenishment of the lubrication system (after every 100 hours of operation, after every 25 hours of operation and after every 10 hours of operation) and according to various options of adding surface-active substances to engine oil. As a result of experimental studies, it was established that the reduction of mechanical losses of a diesel engine is proportional to the increase of its mechanical efficiency. This parameter is within 0.722–0.842 during the operation of the Yanmar 6EY22AW diesel engine with the manufacturer's recommended intensity of adding motor oil to the circulating lubrication system and without additional addition of surfactant to the volume of motor oil in the load range of 35–80 % of the nominal load. The choice of the optimal mode of replenishment of the circulation system, as well as

the addition of a surfactant with an optimal concentration to the total volume of the circulation system contributes to a 9.62–14.62 % increase in the mechanical efficiency of the diesel engine and a corresponding reduction in its mechanical losses.

Key words: circulating lubrication system, energy losses, marine diesel lubrication, marine diesel, mechanical efficiency, motor oil, surface-active substance.

Кривий М.О. **Визначення характерних кутів пар ковзання суднових енергетичних установок**

На довговічність роботи суднових енергетичних установок (СЕУ) суттєво впливають такі динамічні вузли, як пари ковзання. Для розрахунку і прогнозування безаварійної роботи пар ковзання використовують інтегральні показники їх роботи, такі як коефіцієнт навантаження, коефіцієнти спротиву обертанню та гідродинамічного тертя. Обчислення цих показників залежить від так званих *характерних кутів* мастильного шару пари ковзання, до яких відносяться: початок і кінець робочої зони, кут максимального тиску і кут відхилення лінії центрів. Предметом дослідження даної роботи є отримання математичних моделей для визначення *характерних кутів* роботи пари ковзання. Одним із недоліків існуючих підходів до визначення загальних інтегральних характеристик пар ковзання є те, що завчасно невідомі характерні кути мастильного шару і не враховується значення радіального зазору підшипника ковзання. Але саме цей параметр змінюється в процесі експлуатації і його не врахування може призвести до не коректної оцінки довговічності роботи пар ковзання суднових енергетичних установок. Усуненню цього недоліку і присвячена дана робота, в якій, запропонованим методом варіації границь, отримані розв’язки математичної моделі мастильного шару пари ковзання, що дало можливість отримати у вигляді детальних таблиці уточнені значення для характерних кутів, які уточнюють і розширяють існуючі таблиці для таких кутів. За допомогою останніх і методів регресивного аналізу побудовані нові математичні моделі для характерних кутів, які залежать від відносного ексцентриситету, а математичні моделі кута відхилення лінії центрів і від відносного радіального зазору. Встановлено, що при малих значеннях відносного ексцентриситету (усталений режим), і при значному часі експлуатації пар ковзання, потрібно враховувати значення радіального зазору для дослідженні довговічності роботи пар ковзання суднових енергетичних установок. Запропонований підхід може бути використаний для отримання математичних моделей загальних інтегральних характеристик мастильного шару пари ковзання суднових енергетичних установок.

Ключові слова: пара ковзання, суднові енергетичні установки, рівняння Рейнольдса, характерні кути, математичні моделі, мастильний шар

Kryvyi M.O. **Determination of the specific angles of friction pairs of ship power plants**

The durability of ship power plants (spp) is significantly affected by such dynamic components as friction pairs. To calculate and predict the trouble-free operation of friction pairs, integral indicators of their operation are used, such as the load factor, coefficients of resistance to rotation and hydrodynamic friction. The calculation of these indicators depends on the so-called specific angles of the lubrication layer of the sliding pair, which include: the beginning and end of the working zone, the angle of maximum pressure and the angle of deviation of the center line. The subject of research in this work is to obtain mathematical models for determining the characteristic angles of operation of the friction pair. One of the disadvantages of existing approaches to determining the general integral characteristics of friction pairs is that the characteristic angles of the lubricating layer are not known in advance and the value of the radial clearance of the sliding bearing is not taken into account. But it is this parameter that changes during operation, and its failure to take into account can lead to an incorrect assessment of the durability of friction pairs of ship power plants. This work is devoted to the elimination of this shortcoming, in which, by the proposed method of boundary variation, the solutions of the mathematical model of the lubricating layer of the friction pair were obtained, which made it possible to obtain in the form of a detailed table the specified values for the characteristic angles, which refine and expand the existing tables for such angles. With the help of the latest methods of regression analysis, new mathematical models for characteristic angles, which depend on the relative eccentricity, and mathematical models of the deviation angle of the center line and on the relative radial clearance, were built. It was established that at small values of relative eccentricity: (steady state), and with a significant period of operation of the friction pairs, it is necessary to take into account the value of the radial gap to study the durability of the friction pairs of ship power plants. The proposed approach can be used to obtain mathematical models of the general integral characteristics of the lubricating layer of the friction pair of ship power plants.

Key words: friction pair, ship power plants, Reynolds equation, specific angles, mathematical models, lubricating layer.

Крупов І.В. **Аналіз систем автоматичного управління земснарядами**

Автоматизація процесу днопоглиблення є важливим засобом для підвищення продуктивності та зменшення потреби у людському персоналі в цій галузі. Стаття обговорює виклики, пов'язані з автоматизацією цього процесу, зокрема управлінням якірними землесосами в умовах низької швидкості, і вказує на важливу роль датчиків та систем автоматичного контролю в їх подоланні. Серед них манометри, що контролюють тиск, вакуумметри для вимірювання вакууму, тягоміри для вимірювання тяги, ша-

роміри для визначення товщини ґрунту, ґрунтоміри для аналізу параметрів ґрунту і витратоміри для вимірювання витрати робочого середовища.

Ці датчики інтегровані в системи автоматичного керування, які регулюють рух снаряда, враховуючи отримані дані. Системи контролю можуть автоматично реагувати на ситуації, такі як забитий всмоктуючий отвір або забій напірної частини ґрунтопровода, що сприяє безперебійній роботі обладнання.

Крім цього, звертається увага на системи автоматичного регулювання землесоса, які дозволяють автоматично керувати швидкістю переміщення снаряда в залежності від умов та потреби в заборі ґрунту. Це сприяє оптимізації робочих процесів і підвищенню продуктивності днопоглиблення.

Окремо проаналізована структура автоматизованого містка земснаряду , процедура виходу його на задану ділянку та процес ґрунтозабору з використанням системи «Автоствір».

Узагальнюючи, автоматизація днопоглиблення використовує різні датчики та системи контролю для оптимізації процесу, підвищення продуктивності та зменшення ризику аварій, сприяючи безперебійній та ефективній роботі суднових технічних засобів у цій сфері. Ця автоматизація відіграє ключову роль у розвитку сучасних технологій днопоглиблення, що дозволяє досягти оптимальних результатів і підтримувати стабільну роботу обладнання у важких умовах морського середовища.

Ключові слова: судноплавство, навігація, днопоглиблення, автоматизація, аналіз, практичне застосування

Krupov I.V. **Analysis of dredger automatic control systems**

The automation of the dredging process is a crucial means to enhance productivity and reduce the reliance on human personnel in this field. This article discusses the challenges associated with automating this process, particularly in managing anchor dredgers under low-speed conditions, emphasizing the vital role of sensors and automatic control systems in overcoming these challenges. These include pressure gauges for pressure control, vacuum gauges for measuring vacuum, dynamometers for measuring tension, layer meters for determining soil thickness, soil meters for analyzing soil parameters, and flow meters for measuring the flow of the working environment.

These sensors are integrated into automatic control systems that regulate the movement of the dredge, taking into account the acquired data. Control systems can automatically respond to situations such as a clogged suction hole or a breakthrough in the soil pipeline, contributing to the uninterrupted operation of the equipment.

Additionally, attention is drawn to Suction Automation and Regulation Systems (SARS), which enable automatic control of the dredge's speed based on conditions and the need for soil intake. This contributes to process optimization and increased dredging productivity.

The structure of the automated dredge bridge, the procedure for reaching a specified area, and the soil intake process using the "AutoDig" system are separately analyzed. In summary, dredging automation employs various sensors and control systems to optimize the process, enhance productivity, and reduce the risk of accidents, facilitating uninterrupted and efficient operation of maritime technical facilities in challenging marine environments. This automation plays a key role in advancing modern dredging technologies, enabling optimal results and maintaining equipment stability in harsh maritime conditions.

Keywords: shipping, navigation, dredging, automation, analysis, practical application

Мадей В.В., Волков О.М., Сторчак О.О. **Забезпечення експлуатаційних показників дизелів морських суден під час використання палива біологічного походження**

Розглянути питання щодо забезпечення експлуатаційних показників суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання палива біологічного походження. Визначено, що паливо біологічного походження характеризується сумірними значеннями густини та в’язкості з паливом нафтового походження тому забезпечують створення паливних сумішей з ними, які в подальшому використаються для роботи дизелів. Ефективне використання подібних сумішей неможливо без визначення найбільш раціонального складу паливних сумішей – відсоткового вмісту в них палива біологічного походження та найбільш раціональних режимів впорскування цих сумішей в циліндр дизеля. Дослідження з визначення оптимальних кутів випередження подачі палива під час використання паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження виконувались на морському спеціалізованому судні класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн. В енергетичну установку судна входили дизелі 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6EY18ALW Yanmar. Експлуатація дизелів виконувалась на нафтовому паливі RME180 або DMA та на суміші цих палив з біопаливом FAME B30. Під час досліджень кут випередження подачі палива для суднового дизеля 6EY18ALW Yanmar змінювався в діапазоні -18…-6 °повороту колінчатого валу, для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo – в діапазоні -7…-1°. Саме цей діапазон рекомендований фірмами виробниками під час експлуатації дизелів. Під час досліджень встановлено, що з метою підвищення ефективності використання паливних сумішей необхідно змішувати процес впорскування в бік верхньої мертвої точці, тобто знижувати кут випередження подачі палива, при цьому діапазон цієї зміни повинен відповідати рекомендаціям заводів виробників щодо можливих кутів впорскування палива. При цьому на всьому діапазоні зміни кутів випередження впорскування спостерігається зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами. Одночасно з цим значення питомої витрати палива має мінімальне значення за деякими кутами випередження впорскування, які рекомендовані

як оптимальні під час використання паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження.

Ключові слова: емісія оксидів азоту, кут випередження впорскування палива, нафтове паливо, паливна суміш, паливо біологічного походження, питома витрата палива, судновий дизель

Madey V.V., Volkov O.M., Storchak O.O. **Ensuring operational performance of diesel engines of marine vessels when using fuel of biological origin**

Consider the issue of ensuring operational performance of internal combustion ship engines when using fuel of biological origin. It was determined that fuel of biological origin is characterized by comparable values of density and viscosity with fuel of petroleum origin, therefore, they ensure the creation of fuel mixtures with them, which will be used in the future for the operation of diesel engines. Effective use of such mixtures is impossible without determining the most rational composition of fuel mixtures - the percentage content of fuel of biological origin in them and the most rational injection modes of these mixtures into the diesel cylinder. Studies on determining the optimal angles of advance of fuel supply during the use of fuel mixtures, which include fuel of biological origin, were carried out on a marine specialized vessel of the Bulker Carrier class with a deadweight of 63,246 tons. The ship's power plant included 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo and 6EY18ALW Yanmar diesels. Diesel engines were operated on petroleum fuel RME180 or DMA and on a mixture of these fuels with FAME B30 biofuel. During research, the advance angle of fuel supply for the 6EY18ALW Yanmar marine diesel engine varied in the range of -18...-6° of crankshaft rotation, for the 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo diesel - in the -7...-1°range. It is this range that is recommended by companies and manufacturers during the operation of diesel engines. During research, it was found that in order to increase the efficiency of using fuel mixtures, it is necessary to mix the injection process towards the top dead center, that is, to reduce the advance angle of fuel supply, while the range of this change should correspond to the recommendations of the manufacturers' factories regarding possible fuel injection angles. At the same time, there is a decrease in the emission of nitrogen oxides with exhaust gases over the entire range of changes in injection advance angles. At the same time, the value of the specific fuel consumption has a minimum value for some injection advance angles, which are recommended as optimal when using fuel mixtures that include fuel of biological origin.

Key words: emission of nitrogen oxides, fuel injection advance angle, fuel mixture, fuel of biological origin, marine diesel, petroleum fuel, specific fuel consumption,

Малахов О.В., Бондаренко А.В., Палагін О.М., Найденов А.І., Ліхогляд К.А. **Моделювання процесу сепарації суднових льяльних вод**

При роботі суден суднові льяльні води є найбільш багатотоннажним видом відходів і для їх обробки всі судна згідно з регламентуючими вимогами повинні обладнуватися сепараторами (СЛВ). СЛВ є технологічними стоками, які в умовах роботи судна виникають у машинному відділенні, у вантажних трюмах, а також під час експлуатації палуби та палубних механізмів. В умовах експлуатації судна використовують три основні напрямки очищення: фізичний, хімічний та біологічний. Найчастіше їх використовують у комбінації. Аналіз методів сепарації СЛВ на основі цих трьох напрямків показав, що вони характеризуються одним загальним недоліком – односпрямованим очищенням. У ході сепарації вихідним продуктом є лише одна компонентна складова – вода і при використанні на судні сучасних методів очищення під час поділу дуже складно отримати вторинні продукти нафтохімії. З цієї причини при проведенні досліджень в якості перспективного напрямку для подальших наукових досліджень був обраний метод сепарування, що використовує штучну кавітацію. Для подальшого моделювання процесу виділення водної компоненти із загального потоку суднових лляльних вод всередині робочої камери сепараційної установки була розроблена нова математична модель. Вона дозволяє теоретичним шляхом вивчати метод сепарації СЛВ, заснований на використанні гідродинамічного процесу суперкавітації зі штучною вентиляцією каверни. При локальному зародженні в потоці суперкавітуючої каверни всередині неї буде завжди знаходитися тільки насичена водяна пара. У ході досліджень було виконано оцінку просторової стійкості каверни в діапазоні різних чисел кавітації. У результаті вивчення процесу сепарації СЛВ встановлено, що зниження робочого тиску всередині робочої камери кавітаційного сепаратора необхідно завжди компенсувати зростанням температури оброблюваного потоку.

Malakhov O. V., Bondarenko A. V., Palagin O. M., Naydyonov A. I., Lykhoglyad K. A. **Modeling the process of separation of ship bilge waters**

During the operation of ships, bilge water is the most large-tonnage type of waste and for their treatment, all ships, in accordance with regulatory requirements, have to be equipped with bilge water separators. Bilge water are process wastes that, under ship operating conditions, arise in the engine room, in cargo holds, as well as during the operation of the deck and deck machinery. Under ship operating conditions, three main cleaning directions are now used: physical, chemical and biological. In most cases they are used in combination. An analysis of SLV separation methods based on these three directions showed that they are characterized by one common drawback - unidirectional purification. During separation, the output product is only one component - water. When using modern purification methods on a ship during separation, it is very difficult to obtain secondary petrochemical products. For this reason, the method of separation using artificial cavitation was chosen as a prospective direction for further research. A new mathematical model was developed for further simulation of the

process of separating the water component from the general flow of ship bilge water inside the working chamber of the separation unit. It allows to theoretically study the method of SLV separation, based on the use of the hydrodynamic process of supercavitation with artificial ventilation of the cavern. When a supercavitating cavity nucleates locally in the flow, only saturated water vapor will always be inside of it. During the research, an assessment was made of the spatial stability of the cavern in the range of different cavitation numbers. During the study of the BW separation process, it was stated that decrease in the operating pressure inside the working chamber of the cavitation separator have to be always compensated by an increase in the temperature of the processed flow.

Малахов О.В., Маслов І.З., Найденов А.І., Генчев В.В., Мазур Т. М.
Технологічні аспекти експлуатації суден днопоглиблювального флоту

При експлуатації сучасних суден днопоглиблювального флоту модернізація використовуваних технологій видобутку, транспортування та вивантаження ґрунту при своєму правильному використанні може призвести до істотного зниження екологічного навантаження на карту намиву та підвищення рентабельності судна за рахунок скорочення його простоїв.

На основі аналізу відомих технологій видобутку, транспортування та вивантаження ґрунту суднами днопоглиблювального флоту встановлено, що проблема руйнування ущільненого поверхневого шару ґрунту залишається, як і раніше, не вирішеною, а існуючі технічні пристрої не дозволяють одночасно обробляти всю площу ущільненого поверхневого шару з підготовкою ґрунту до його наступного транспортування. У ході досліджень було вирішено два завдання, які полягали у розробці нової технологічної схеми видобутку та транспортування ґрунту при роботі суден днопоглиблювального флоту та розробці нових технологічних схем підвищення продуктивності суднової системи розмиву ґрунтової пульпи. Детально описано розроблену технологію автоматизації процесу вивантаження ґрунту на карту намиву.

В статті показано, що продуктивність процесу видобутку грунту під час роботи судна може бути збільшена шляхом реалізації двох напрямків. Перший напрямок відповідає технологічній стадії, яка пов'язана з видобутком ґрунту, а другий напрямок пов'язаний з його вивантаженням. Швидкість розвантаження на місці складування скорочує простої судна і знижує екологічне навантаження на водний регіон карти намиву. Для реалізації другого напрямку була розроблена і детально описана в статті система автоматизованого управління технологічним процесом розвантаження грунту. Під час розробки системи автоматизованого управління вивантаженням пульпи був використаний принцип пристроїв маршрутизаторів, що розширює масштаб мережі та забезпечує надлишкові канали передачі для підвищення надійності.

Malakhov O. V., Maslov I.Z., Naydyonov A. I., Henchev V.V., Mazur T.M. **Technological aspects of dredging fleet operation**

When operating modern dredging fleet vessels, modernization of the used technologies for the extraction, transportation and unloading of soil, if used correctly, can lead to a significant reduction in the environmental load on the alluvium map and increase the profitability of the vessel by reducing its downtime.

Based on an analysis of known technologies for the extraction, transportation and unloading of soil by dredging fleet vessels, it has been established that the problem of destruction of the compacted surface layer of soil remains unresolved, and existing technical devices do not allow simultaneous processing of the entire area of the compacted surface layer with the preparation of soil for its subsequent transportation. In the course of the research, two problems were solved, which consisted in the development of a new technological scheme for the extraction and transportation of soil during the operation of dredging fleet vessels and the development of new technological schemes for increasing the productivity of the ship's soil pulp erosion system. The developed technology for automating the process of unloading soil onto an alluvial map is described in detail.

It was shown in the article, that productivity of the soil extraction process during the operation of the vessel can be increased by implementing two directions. The first direction corresponds to the technological stage, which is related to soil extraction, and the second direction is related to its unloading. The speed of unloading at the place of storage reduces the downtime of the vessel and reduces the environmental load on the water region of the washout map. To implement the second direction, a system of automated control of the technological process of soil unloading was developed and described in detail in the article. During the development of the automated pulp unloading control system, the principle of router devices was used, which expands the scale of the network and provides redundant transmission channels to increase reliability.

Нікольський В.В., Левінський М.В., Нікольський М.В., Слободянюк М.В., Кузьмінський Б.В. **Вдосконалення системи віддаленого моніторингу параметрів суднових дизелі з електронним управлінням**

Робота присвячена розв’язанню науково-прикладного завдання – вдосконаленню системи моніторингу параметрів суднового дизеля.

Доведено, що сучасні системи моніторингу двигунів з електронним управлінням облаштовані системами, які з одного боку не дозволяють здійснювати моніторинг параметрів віддалено, мають апаратне забезпечення, яке не забезпечує в повній мірі надійність експлуатації з урахуванням вимог резервування та дублювання автоматизованих систем управління.

Висунуто припущення про переваги застосування бездротових технологій для віддаленого управління в реальному часі і новітніх досягнень в

галузі апаратно-програмного забезпечення на відміну від існуючих технологій, які застосовані в системах моніторингу параметрів суднового дизеля.

Розроблена інформаційна модель обміну інформацією про стан суднового дизеля, яку реалізовано в навчальному машино-котельному відділенні кафедри технічної експлуатації національного університету «Одеська морська академія».

Проведено експериментальне дослідження системи віддаленого моніторингу параметрів аварійного дизель-генератора, яке довело спроможність запропонованої реалізації інформаційної моделі, обране обладнання здатне ефективно відображати в реальному часі процеси, що відбуваються під час роботи аварійного дизель-генератора.

Ключові слова: система моніторингу, судновий дизель MAN-B&W тип ME, аварійний дизель-генератор, Kohler 50EOZD, John Deere 4045TFM75kohler, Phoenix_Contact.

Nikolskyi V., Levinskyi M., Nikolskyi M., Slobodianiuk M., Kuzminskyi B.
Improvement of remote monitoring systems for parameters of marine diesel engines with electronic control

The work is dedicated to solving a scientific and applied task – improving the monitoring system for the parameters of a marine diesel engine.

It has been proved that modern engine monitoring systems with electronic control are equipped with systems that, on one hand, do not allow for remote parameter monitoring and, on the other hand, have hardware that does not fully ensure reliable operation, taking into account the requirements for the redundancy and duplication of automated control systems.

Assumptions have been made about the advantages of applying wireless technologies for real-time remote control and the latest developments in hardware and software compared to existing technologies used in marine diesel engine parameter monitoring systems.

An information exchange model regarding monitoring of the state of the marine diesel engine has been developed and implemented in the educational marine boiler and diesel department of the Technical operation of fleet department at the National University "Odessa Maritime Academy."

An experimental study of the remote monitoring system for the parameters of an emergency diesel generator has been conducted, demonstrating the capability of the proposed implementation of the information model. The selected equipment is capable of effectively reflecting in real-time the processes occurring during the operation of the emergency diesel generator.

Key words: monitoring system, marine diesel MAN-B&W, ME type, emergency diesel generator, Kohler 50EOZD, John Deere 4045TFM75kohler, Phoenix Contact.

Сагін С.С. **Вдосконалення взаємодії елементів суднового пропульсивного комплексу під час забезпечення маневру розходження морських суден**

Розглянуто взаємодія елементів суднового пропульсивного комплексу на методи контролю та управління рухом морських суден під час маневрування з метою забезпечення їх безпечного розходження за умовою хорошої видимості. Для вирішення питання щодо забезпечення безпеки судноплавства були розглянуті підмножини ситуацій надмірного зближення суден з різною взаємною відповідальністю та з різним розташуванням суден один від одного, що регламентуються відповідними правилами Міжнародних правил запобігання зіткнення суден у морі які встановлюють взаємодію суден залежно від ситуації, що виникла під час небезпечного зближення.

Вказано, що для забезпечення процесу безпечного маневрування, є професійна взаємодія офіцерського складу з метою удосконалення показників суднового пропульсивного комплексу . Визначено, що процес розходження двох суден передбачає зміну ситуації небезпечного зближення на допустиму безпечну ситуацію за допомогою маневру розходження. Вказано, що для забезпечення процесу безпечного розходження важливою складовою є управління ситуацією зближення, за допомогою якого визначається потенційна можливість зміни небезпечної ситуації шляхом виконання маневру розходження. Також зазначено, що через велику кількість різноманітних ситуацій у взаємних розташуваннях суден, виникають певні труднощі в коректності дій, що приймаються з метою забезпечення їх безпечного розходження. Тому питання формалізації процесу розробки методів управління рухом судна, у частині маневрування суден під час розходження, а також визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження є актуальним та перспективним науковим напрямом яке впливає на безпеку судноплавства.

Як основні небезпечні ситуації, що виникають під час розходження суден, розглянути ситуація обгону (відносно варіантів судно, що обганяє, та судно, що обганяється; а також судно, що обганяється, та судно, що обганяє), ситуація зближення суден на зустрічних курсах, ситуація зближення суден на курсах, що перетинаються. Для кожної з цих ситуацій запропоновані аналітичні залежності з визначення небезпечних курсів руху суден, які попереджують їх зіткнення. Запропоновані рішення сприяють створенню методу управління рухом суден під час виникнення різних ситуаціях їх небезпечного зближення з урахуванням взаємодії суднового пропульсивного комплексу.

Зазначено, що потужності головного двигуна, повинно бути враховано з можливістю експлуатаційного відхилення потужності які неминучі в процесі експлуатації.

Отримані результати свідчать про можливість застосування розроблених аналітичних виразів в сучасних електронних автоматичних системах,

що працюють за принципом реального часу з метою визначення та розв’язання завдань на розходження, які є суттєвою підтримкою для навігаційних офіцерів під час виникнення ситуацій небезпечного зближення суден.

Ключові слова: безпека судноплавства, судновий пропульсивний комплекс, метод управління, суднові двигуни, морський транспорт, навігаційна обстановка, попередження зіткнення суден, рух судна, управління рухом судна.

Sagin S.S. **Improvement interaction of the elements of the ship's propulsive complex during the sea vessels maneuvering of divergence.**

Considered the interaction of the elements of the ship's propulsive complex on the methods of control and management of the vessel movements, during manoeuvring in order to ensure their safe divergences under the condition of good visibility. To solve the question of ensuring the safety of navigation, subsets of situations of excessive convergence of ships considered with different mutual responsibilities and with different locations of ships from each other, which are regulated by the relevant rules of the International Rules for the Prevention of Collisions of Ships at Sea, which establish the interaction of ships depending on the situation that arose during dangerous rapprochement.

It is indicated that in order to ensure the process of safe manoeuvring, there is a professional interaction of the ship’s officers in order to improve the indicators of the ship's propulsive complex. Determined that the process of divergence of two ships involves changing the situation of dangerous convergence to an acceptable safe situation with the using maneuver of divergence. Indicated that in order to ensure the process of safe divergence, an important component is the management of the convergence situation, which determines the potential possibility of changing the dangerous situation by performing the divergence manoeuvre. It is also stated that due to the large number of various situations in the mutual locations of ships, certain difficulties arise in the correctness of actions taken to ensure their safe divergence. Therefore, the issue of formalization of the process of developing methods for controlling the movements of the vessels, in terms of manoeuvring ships during divergences, as well as determining the method of managing the movement of sea transport vessels while ensuring their safe divergences which is a actual and promising scientific direction that affects on the safety of navigation.

As the main dangerous situations that arise during the separation of ships, consider the situation of overtaking (relative to the options of the overtaking vessel and the overtaken vessel; as well as the overtakenvessel and the overtaking vessel), the situation when vessel are metting on reciprocal or nearly reciprocal courses, the vessel crossing situation. For each of these situations, analytical dependencies are proposed for determining dangerous courses of movement of vessels that prevent their collision. The proposed solutions contribute to the crea-

tion of a method of controlling the movement of ships during the occurrence of various situations of their dangerous convergence, taking into account the interaction of the ship's propulsive complex.

It is noted that the power of the main engine should be taken into account with the possibility of operational power deviations that are inevitable during the operation.

The obtained results indicate the possibility of using the developed analytical expressions in modern electronic automatic systems operating on a real-time basis for the purpose of determining and solving divergence tasks, which are essential support for navigation officers during situations of the vessel dangerous divergences.

Key words: safety of navigation, ship propulsion complex, control method, maritime transport, marine engines, navigation situation, safety of navigation, ship collisions prevention, ship movement management, ship movement.

Сагін С.В., Суворов П.С., Бондар С.А. **Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден**

Розглянути питання щодо оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден. Визначено, що під час експлуатації пропульсивних комплексів з напрацюванням, що наближається до нормативного терміну, тобто з малим остаточним ресурсом, особливе значення набуває якість технічної експлуатації. При цьому переважне значення набуває метод технічного обслуговування, який судновласник має намір застосувати на судне до моменту його списання (час до якого може досягати десяти років), що дозволить забезпечити на період експлуатації, що залишився, скорочення простоїв, безпеку роботи, а також дозволить спрогнозувати витрати на технічне обслуговування та ремонт. Зазначено, що критерії оцінки виникнення аварійних події ґрунтуються на суворо встановлених рівнях ризику. Ідентифікація ризиків виконується виходячи з аналізу небезпек, пов’язаних з потоком відмов механізмів в зазначений період експлуатації. На базі обробки статистичних даних звітів департаменту технічної експлуатації однієї з судноплавних компаній було здійснено розрахунок параметрів потоку відмов за 15-річний період експлуатації судна з циклом експлуатації кожні п'ять років. Як таке судно було обрано судно класу «річка-море» дедвейтом 6430 тонн з головним двигуном Wärtsilä 6R32BC. Як основні елементи, відмови яких можуть привести до виникнення небезпечних або аварійних ситуацій були обрані наступні: форсунки, з’єднання та ущільнення, паливні насоси високого тиску, трубопроводи високого тиску, регулятор частоти обертання, розподільний вал, охолоджувач мастила, мотильові підшипники, охолоджувач повітря, системи підготовки палива, клапани системи розподілення газів, циліндрові кришки, поршні та поршневі кільця, циліндрові втулки, газотурбонагнетач, редуктор, рамові підшипники, упорний

підшипник. Були визначені значення потоку відмов; градації вірогідності виникнення ризику та витрат, що пов'язані з їх усуненням, а також розраховані матриці розподілення вірогідності виникнення ризику елементів суднового дизелю. Саме розрахунок матриць розподілення вірогідності ризиків пропонується як метод визначення оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден.

Ключові слова: аварійна подія, вірогідність виникнення ризику, метод оцінки ризику, морський транспорт, потік відмов, ресурс експлуатації, ризик виникнення аварійної події, судновий дизель, судновий пропульсивний комплекс.

Sagin S.V., Suvorov P.S., Bondar S.A. **Development of a method for assessing the risks of occurrence of emergency events during the operation of diesel engines of marine vessels**

To consider the issue of assessing the risks of occurrence of emergency events during the operation of diesel engines of marine vessels. It was determined that during the operation of propulsive complexes with a working life approaching the regulatory term, that is, with a small final resource, the quality of technical operation acquires special importance. At the same time, the maintenance method that the ship owner intends to apply to the vessel until the time of its decommissioning (the time until which can reach ten years) becomes of paramount importance, which will allow for the remaining period of operation to reduce downtime, work safety, and also allow to predict maintenance and repair costs. It is noted that the criteria for assessing the occurrence of emergency events are based on strictly established risk levels. Risk identification is performed based on the analysis of hazards associated with the flow of mechanism failures in the specified period of operation. On the basis of the processing of statistical data from the reports of the technical operation department of one of the shipping companies, the parameters of the flow of failures were calculated for the 15-year period of operation of the vessel with an operation cycle of every five years. A river-sea class vessel of 6,430 deadweight tons with a Wärtsilä 6R32BC main engine was chosen as such vessel. The following were selected as the main elements, the failure of which can lead to dangerous or emergency situations: injectors, connections and seals, high-pressure fuel pumps, high-pressure pipelines, speed controller, camshaft, oil cooler, butterfly bearings, air cooler , fuel preparation systems, gas distribution system valves, cylinder covers, pistons and piston rings, cylinder liners, gas turbocharger, reducer, frame bearings, thrust bearing. The failure rate values were determined; gradations of risk occurrence probability and costs associated with their elimination, as well as calculated matrixes of the risk occurrence probability distribution of ship-new diesel engine elements. It is the calculation of risk probability distribution matrices that is proposed as a method for determining the risk assessment of the occurrence of emergency events during the operation of marine diesel engines.

Key words: emergency event, failure flow, operational resource, probability of risk occurrence, risk assessment method, risk of emergency occurrence, sea transport, ship diesel, ship propulsion complex.

Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. **Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту**

Розглянути питання щодо запобігання інвазійного забруднення морських акваторії, які виникають під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту. Визначено важливість проведення операцій з баластом під час здійснення навігаційних переходів морських суден. Описано склад суднової системи баластної води. Наведена схема перевезення водного баласту морськими суднами. Визначені негативні наслідки, до яких призводить неконтрольоване скидання водного баласту, що перевозиться в баластних танках морських суден з одного географічного регіону до іншого.

Визначені вимоги Міжнародної конвенції про контроль суднових баластних вод й осадів та управління ними. Розглянуті особливості стандартів D-1 та D-2 цієї конвенції, які регулюють заміну баластних вод та якість баластних вод.

Як підтвердження ризиків інвазійного забруднення з баластними водами морських суден наведені результати з визначення утворення відкладень біомаси на поверхнях баластних танків, які проводились в найбільш розповсюджених в регіонах Індійського,Тихого та Атлантичного океанів, а також в Середземноморському басейні

Виконано аналіз можливих напрямків і методів обробки водяного баласту, а також визначені критерії, яки беруть до уваги під час вибору методу обробки баласту під час його транспортування суднами морського транспорту.

Як найбільш розповсюджені методів обробки баласту розглянути ультрафіолетове опромінення, хлорування та озонування.

Визначено, що здійснення основних операцій у технології очищення та знезараження баласту має бути організовано під час його знаходженні в суднових баластних танках на протязі навігаційного переходу судна та транспортування баласту, тобто за умов наявності достатнього часу задля забезпечення ефективності здійснюваних процесів. Доведено, що попередження інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту досягається шляхом керованого впливу на суднову систему баластної води та забезпечує екологічні та енергетичні показники роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Ключові слова: баластна вода, безпека мореплавства, зниження ризику, інвазійне забруднення, морський транспорт, обробка баластної води.

Sagin S.V., Kolegaev M.O., Parmenova D.G. **Reducing the risks of invasive pollution of marine water areas during the operation of sea and inland water transport vessels**

Consider issues related to the prevention of invasive pollution of marine water areas that arise during the operation of sea and inland water transport vessels. The importance of carrying out operations with ballast during navigation passages of sea vessels has been determined. The composition of the ship's ballast water system is described. The scheme of transportation of water ballast by sea vessels is given. The negative consequences caused by the uncontrolled discharge of water ballast transported in the ballast tanks of sea vessels from one geographical region to another have been identified. The requirements of the International Convention on the Control and Management of Ship Ballast Water and Sediments are defined. The features of standards D-1 and D-2 of this convention, which regulate the replacement of ballast water and the quality of ballast water, are considered. As confirmation of the risks of invasive pollution with ballast water of sea vessels, the results of determining the formation of biomass deposits on the surfaces of ballast tanks, which were carried out in the most widespread regions of the Indian, Pacific and Atlantic oceans, as well as in the Mediterranean basin, are given An analysis of possible directions and methods of processing water ballast was performed, as well as criteria that are taken into account when choosing a method of processing ballast during its transportation by sea transport vessels were determined. Consider ultraviolet irradiation, chlorination and ozonation as the most common ballast treatment methods. It was determined that the implementation of the main operations in the ballast cleaning and disinfection technology should be organized during its stay in the ship's ballast tanks during the ship's navigation passage and ballast transportation, i.e. under the conditions of sufficient time to ensure the efficiency of the processes being carried out. It has been proven that the prevention of invasive pollution of marine water areas during the operation of sea and inland water transport vessels is achieved by controlled influence on the ship's ballast water system and ensures the environmental and energy performance of sea and inland water transport vessels.

Key words: ballast water treatment, ballast water, invasive pollution, maritime safety, risk reduction, sea transport.

Сагін С.В., Матєйко О.В. **Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів**

Виконано аналіз способів інертизації вантажних танків суден, що призначені для перевезення зріджених газів. Визначено, що інертизація вантажних танків суден, що перевозять рідкі нафтові або зріджені газові вантажі, забезпечує зниження вмісту кисню в цих танках до рівню, що гарантую неможливість будь-якого займання безпосередньо вантажу, залишків пари вантажу, або суміші газів, що знаходиться в танку. Як інертний газ розглянута можливість використання азоту, якій є хімічно неактивним газом та у

хімічні реакції з деякими елементами вступає тільки за високих тисків і температур у присутності каталізатора, тому в нормальних умовах не вступає в реакцію з вантажами, що перевозяться суднами-газовозами. Як завдання дослідження був аналіз суднових схем, що забезпечують процес інертизації вантажних танків суден-газовозів. Було визначено, що технологічні схеми, що забезпечують інертизацію вантажних танків, залежать від конструкційних особливостей суден-газовозів. Розглянути основні способи інертизації, а саме каскадна, за якої вантажні танки продуваються інертним газом один за одним та атмосфера одного танка витісняється в інший танк і таким чином виконується заповнення всіх танків; паралельна, за якої азот подається одночасно до всіх танків по загальній газовій магістралі, відведення атмосфери танку на вентиляційну колону або до берегової системи газовідведення здійснюється по загальної магістралі також одночасно з усіх танків; напивкаскадна, за якої вантажні танки газовоза поділяють на дві окремі групи, що дозволяє проводити продування каскадом однієї групи танків послідовно, а другої групи в паралель. Надані переваги та недоліки вказаних способів та наведені їх принципові схеми. Зазначено, що продування вантажних танків суден-газовозів також можливо шляхом використання пари вантажу, що є досить легкою операцією, а також що для суден середньої вантажомісткості (до 15000 м^3) продування парами вантажу доцільніше проводити в паралель, тому що для продування судна такої місткості, використання каскадного способу продування призведе до значних тимчасових втрат, тому що після продування систему необхідно буде налаштувати на паралельне навантаження. Виконана оцінка способів, що забезпечують продування вантажних танків каскадом холодною парою легких вантажів, а також продування каскадом з використанням гарячої пари рідкого вантажу. Наведена переваги та схема вказаних способів.

Ключові слова: інертизація вантажних танків, інертний газ, морський транспорт, судна для перевезення скраплених газів, схеми інертизації вантажних танків, транспортування зріджених газів.

Sagin S.V., Mateiko O.V. **Analysis of methods of inerting cargo tanks of gas carriers**

An analysis of methods of inertization of cargo tanks of vessels intended for the transportation of liquefied gases was performed. It was determined that the inertization of cargo tanks of vessels carrying liquid oil or liquefied gas cargoes ensures a reduction of the oxygen content in these tanks to a level that guarantees the impossibility of any direct ignition of the cargo, cargo vapor residues, or the mixture of gases in the tank. As an inert gas, the possibility of using nitrogen is considered, which is a chemically inactive gas and enters into chemical reactions with some elements only at high pressures and temperatures in the presence of a catalyst, therefore, under normal conditions, it does not react with cargo transported by gas tankers. The task of the research was the analysis of ship schemes

that ensure the process of inertization of cargo tanks of gas carriers. It was determined that technological schemes that ensure the inertization of cargo tanks depend on the structural features of gas carriers. Consider the main methods of inertization, namely cascade, in which cargo tanks are blown with inert gas one after the other and the atmosphere of one tank is displaced into another tank, thus filling all tanks; parallel, in which nitrogen is supplied simultaneously to all tanks through the common gas main, the removal of the atmosphere of the tank to the ventilation column or to the onshore gas removal system is carried out through the common main also simultaneously from all tanks; cascading, in which the cargo tanks of the gas carrier are divided into two separate groups, which allows cascade blowing of one group of tanks in series, and the second group in parallel. The advantages and disadvantages of the specified methods are provided and their principle schemes are given. It is noted that blowing cargo tanks of gas carriers is also possible by using cargo steam, which is a fairly easy operation, and also that for ships of medium cargo capacity (up to 15,000 m3), it is more expedient to carry out cargo steam blowing in parallel, because for blowing a vessel of such capacity, the use of a cascade method of blowing will lead to significant temporary losses, because after blowing the system will have to be adjusted to a parallel load. An evaluation of the methods that provide cascade blowing of cargo tanks with cold vapor of light cargo, as well as cascade blowing using hot vapor of liquid cargo, was carried out. The advantages and scheme of the specified methods are given.

Key words: inertization of cargo tanks, inert gas, schemes of inertization of cargo tanks, sea transport, ships for the transportation of liquefied gases, transportation of liquefied gases.

Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С.,Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скруберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту

Розглянути питання щодо забезпечення екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скруберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. Визначено, що додаткове скруберне очищення випускних газів суднових дизелів є технологією завдяки якої можливо використовувати паливо, вміст сірки в якому перевищує 0,5 %. Додаткове очищення випускних газів суднових дизелів в скруберах суттєво поширює можливість використання морських сортів палива з підвищеним вмістом сірки, сприяє тим самим зменшенню експлуатаційних витрат на придбання палива. Одночасно з цим системи скруберного очищення вимагають додаткових витрат енергії на обслуговування обладнання, що входить до їх складу, а також є підставою збільшення опору в газовипускної магістралі дизелів та пов’язаного з цим зменшення ефективної потужності дизелів. В зв’язку з цим завданням дослідження було проведення аналізу еколо-

гічної, економічної та енергетичної ефективності процесу скруберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. Дослідження виконувались на судне класу Bulker Carrier дедвейтом 63246 тонн. В енергетичну установку судна входили дизелі 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo та 6EY18ALW Yanmar випускні гази яких проходили додаткове очищення в скрубберної системі відкритого типу. З метою оцінки ефективності методу скруберного очищення було введено поняття «екологічна стійкість судна», яка визначається як відношення різниці максимально можливої та поточної концентрації оксидів сірки в випускних газах до максимально можливої концентрації. При цьому екологічна стійкість характеризує запас емісії оксидів сірки від максимально можливих значень. Також з метою визначення економічних витрат на забезпечення процесу скрубберного очищення виконувався розрахунок додаткової потужності, як необхідна для функціювання цей системи. Було встановлено, що використання скруберного очищення забезпечує екологічну стійкість в діапазоні 4,18…22,96 % під час експлуатації судна поза спеціальних екологічних районах та в діапазоні 3,02…26,05 % під час експлуатації в цих районах. Одночасно з цим, використання скрубберного очищення призводить до 2,92…3,42 %-го збільшення втрат потужності дизелів та питомої витрати палива.

Ключові слова: вміст сірки в паливі, емісія оксидів сірки, ефективна потужність, зони спеціального екологічного контролю, морський транспорт, питома витрата палива, скрубберне очищення, судновий дизель.

Sagin S.V., Madey V.V., Sagin S.S., Chimshir V.I., Razinkin R.O. **Analysis of environmental sustainability and energy efficiency of the use of scrubber cleaning of diesel exhaust gases of marine transport vessels**

To consider the issue of ensuring environmental sustainability and energy efficiency of the use of scrubber cleaning of diesel exhaust gases of marine transport vessels. It was determined that additional scrubbing of exhaust gases of marine diesel engines is a technology that makes it possible to use fuel with a sulfur content of more than 0.5%. Additional cleaning of the exhaust gases of marine diesel engines in scrubbers significantly expands the possibility of using marine types of fuel with a high sulfur content, thereby contributing to the reduction of operating costs for the purchase of fuel. At the same time, scrubber cleaning systems require additional energy costs for the maintenance of the equipment that is part of them, and are also the reason for increasing the resistance in the gas exhaust line of diesel engines and the related decrease in the effective power of diesel engines. In connection with this research task, the analysis of ecological, economic and energy efficiency of the process of scrubber cleaning of exhaust gases of diesel engines of marine transport vessels was carried out. The research was carried out on a Bulker Carrier class vessel with a deadweight of 63,246 tons. The ship's power plant included 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel & Turbo and

6EY18ALW Yanmar diesels, the exhaust gases of which underwent additional cleaning in an open scrubber system. In order to evaluate the efficiency of the scrubber cleaning method, the concept of "environmental sustainability of the ship" was introduced, which is defined as the ratio of the difference between the maximum possible and current concentration of sulfur oxides in exhaust gases to the maximum possible concentration. At the same time, environmental stability characterizes the emission reserve of sulfur oxides from the maximum possible values. Also, in order to determine the economic costs of ensuring the scrubbing cleaning process, the calculation of the additional power required for the operation of this system was carried out. It was established that the use of scrubber cleaning provides environmental stability in the range of 4.18–22.96 % during the operation of the vessel outside special ecological areas and in the range of 3.02–26.05 % during operation in these areas. At the same time, the use of scrubber cleaning leads to a 2.92–3.42 % increase in diesel power losses and specific fuel consumption.

Key words: effective power, emission of sulfur oxides, marine transport, scrubber cleaning, marine diesel, specific fuel consumption, sulfur content in fuel, zones of special environmental control.

Сагін А.С. **Корегування процесу подачі палива під час використання в суднових дизелях палив з різним вмістом сірки**

Як об’єкт дослідження було обрано процес експлуатації суднових дизелів під час використання палива, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %. Подібні сорти палива характеризуються меншою температурою самозаймання та більшою теплотворною здатністю. Під час згоряння це призводить до збільшення швидкості згоряння палива та ступеню підвищення тиску під час згоряння, саме через це збільшуються динамічні навантаження на деталі циліндро-поршневої групи та підшипники дизеля. Також це (через підвищення температури наприкінці згоряння) створює умови для збільшення концентрації оксидів азоту в випускних газах дизеля. Вказане (а саме зміна динамічних та теплових навантажень, що виникають під час використання в суднових дизелях палив зі зниженим вмістом сірки) призводить до виникнення аварійних ситуацій. Як метод управління ризиком виникнення подібних аварійних ситуації запропоновано переналаштування паливної апаратури високого тиску, а саме зміна кутів випередження подачі палива. Дослідження виконувались на судні, що призначено для перевезення контейнерів та на якому як головний двигун встановлено судновий дизель 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo. Як показники, за якими оцінювалась використання та впровадження запропонованого методу, були обрані тиск згоряння, ступінь підвищення тиску під час згоряння, температура випускних газів та концентрація оксидів азоту в випускних газах. Експериментально доведено, що при цьому досягається збільшення екологічної стійкості роботи дизеля на 3,61…10.97 %, підвищення теплової стійкості – до 2,54 %, збільшення

динамічної стійкості – до 4,82 %. Це обумовлюється зсувом процесу самозаймання та згоряння в бік розширення та відповідним зменшенням тиску та температури наприкінці згоряння. Найбільш сприятливе використання цього методу на сучасних дизелях, що мають електронну систему управління впорскуванням палива, тому не вимагають механічного переналаштування паливних насосів. З урахуванням цього, саме метод, що заснований на зміні кутів випередження подачі палива, визначено таким, що забезпечує *управління факторами ризику виникнення аварійних ситуацій під час використання в суднових дизелях палива з низьким вмістом сірки.*

Ключові слова: впорскування палива, динамічні навантаження, діагностування дизеля, екологічні показники, кут випередження подачі палива, метод управління, морський транспорт, паливна апаратура, паливо для суднових дизелів, судновий дизель, теплові навантаження, фактор ризику.

Sagin A.S. **Adjustment of the fuel supply process when using fuels with different sulfur content in marine diesel engines**

The process of operation of marine diesel engines during the use of fuel with a sulfur content of no more than 0.1% was chosen as the object of research. Similar types of fuel are characterized by a lower auto-ignition temperature and higher calorific value. During combustion, this leads to an increase in the rate of fuel combustion and the degree of pressure increase during combustion, precisely because of this, the dynamic loads on the parts of the cylinder-piston group and diesel engine bearings increase. Also, this (due to the increase in temperature at the end of combustion) creates conditions for an increase in the concentration of nitrogen oxides in diesel exhaust gases. This (namely, the change in dynamic and thermal loads that occur during the use of fuels with a reduced sulfur content in marine diesel engines) leads to the occurrence of emergency situations. As a method of managing the risk of occurrence of such emergency situations, the rearrangement of the high-pressure fuel equipment, namely the change of the advance angles of the fuel supply, is proposed. The research was carried out on a vessel intended for the transportation of containers and on which a marine diesel engine 8K80ME-8.2-TII MAN-Diesel & Turbo was installed as the main engine. Combustion pressure, the degree of pressure increase during combustion, the temperature of exhaust gases and the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases were chosen as the indicators by which the use and implementation of the proposed method were evaluated. It has been experimentally proven that this results in an increase in the environmental sustainability of diesel operation by 3.61–10.97 %, an increase in thermal stability – up to 2.54 %, and an increase in dynamic stability – up to 4.82 %. This is due to the shift of the self-ignition and combustion process towards expansion and the corresponding decrease in pressure and temperature at the end of combustion. The most favorable use of this method is on modern diesels that have an electronic fuel injection control system, so they do not require mechanical re-adjustment of fuel pumps. Taking this into

account, the method based on the change of fuel advance angles is defined as the one that provides management of the risk factors of emergency situations when using low-sulfur fuel in marine diesel engines.

Key words: fuel injection, dynamic loads, diesel diagnostics, environmental indicators, fuel advance angle, control method, marine transport, fuel equipment, fuel for marine diesels, marine diesel, thermal loads, risk factor.

Сандлер А. К., Опришко М. О. **Вдосконалення лопатевого апарату вітроенергетичних установок**

Існуюча в Україні "Комплексна програма будівництва вітрових електростанцій" передбачає проектування й технічну реалізацію нових ВЕУ.

Проведений аналіз сучасного стану вітроенергетики дозволяє визначити її пріоритетні напрямки розвитку, а саме:

удосконалювання традиційної класичної схеми ВЕУ;

впровадження безмультипликаторної схеми ВЕУ.

Завдання раціональної побудови схеми перетворення вітрової енергії в електричну, а також підвищення потужності в одиниці з метою підвищення ефективності роботи ВЕУ з аеродинамічною мультиплікацією з використанням досягнень силової електроніки, створення нового встаткування, є актуальним науково-технічним завданням і має важливе наукове й практичне значення. В умовах, що склалися, найважливіше значення для надійності, довговічності та ефективності ВЕУ мають значення величин граничних швидкостей вітру в зоні. Вони визначають прийняті розрахункові нормативи при проектуванні елементів установки на міцність, параметри автоматичних систем управління, аеродинамічні характеристики лопатей. Мета дослідження – вдосконалення лопатевого апарату вітрогенераторної установки, яка забезпечить регулювання вітрового навантаження на кожну лопать в залежності від її положення відносно вітрового шару, та у якому одночасно збережені надійність та простота схемотехнічних рішень апаратів відомих типів. Поставлена задача вдосконалення лопатевого апарат вирішується тим, що останній, що складається з маточини, в якої змонтовано механізм зміну кута атаки лопаті, і лопатей, та який відрізняється тим, що кожна лопать має закрилок, який приводиться до дії п`єзоелектричним приводом, та азимутальний датчик вітру, що зв'язані з центральним процесором установки. У динаміці робота закрилків полягає в тому, що при їхньому випуску збільшується кривизна профілю і площа поверхні лопаті, отже, збільшується й несуча здатність лопаті.

Ключові слова: вітроенергетична установка, лопатевий апарат, закрилок

Sandler A. K., Oprishko M. O. **Improvement of the blade apparatus wind power plants**

The existing in Ukraine "Complex program of construction of wind power plants" provides design and technical implementation of new wind power plants.

The analysis of the current state of wind power engineering allows to define its priority directions of development, namely:

- improvement of the traditional classical scheme of wind turbines;
- utilization of non-multiplier scheme of wind turbines.

The task of rational construction of the scheme of wind energy conversion into electric energy, as well as increasing the power in the unit in order to improve the efficiency of wind turbine with aerodynamic multiplication using the achievements of power electronics, the creation of new equipment, is an urgent scientific and technical task and has an important scientific and practical significance. Under the existing conditions, the values of limiting wind speeds in the zone are of crucial importance for reliability, durability and efficiency of wind turbines. They determine the accepted design standards in the design of installation elements for strength, parameters of automatic control systems, aerodynamic characteristics of blades. The aim of the research is to improve the blade apparatus of a wind turbine generating plant, which will provide regulation of wind load on each blade depending on its position relative to the wind layer, and in which at the same time the reliability and simplicity of circuitry solutions of known types of apparatuses are preserved. The set task of improving the blade apparatus is solved by the fact that the latter, consisting of a hub, at which the mechanism for changing the angle of attack of the blade, and blades, and distinguished by the fact that each blade has a flap, driven to action by a piezoelectric drive, and azimuthal. wind sensor associated with the central processor of the installation. In dynamics, the operation of the flaps is to increase the curvature of the profile and surface area of the blade when they are released, and thus increase the carrying capacity of the blade.

Keywords: wind power plant, blade apparatus, flapper

Сандлер А. К., Шестопалов К. О., Єрін В. О. **Глибока утилізація вторинних енергоресурсів суднових компресорних установок**

Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є розробка технологій глибокої утилізації теплоти вторинних об'єктів суднових енергетичних установок. Впровадження таких технологій дозволяє суттєво (на 10 … 15 %) підвищити ефективність використання теплового потенціалу палива й забезпечити його економію, а також поліпшити екологічну обстановку у світовому океані за рахунок зниження викидів у навколишнє середовище шкідливих речовин. Розробка й впровадження теплоутилізаційних технологій сполучені з необхідністю рішення низки досить складних науково-технічних завдань. Утилізаційні технології, як правило, впроваджуються в процесі модернізації або реконструкції існуючих суднових енергетичних установок. При цьому

вибір утилізаційної схеми суттєво залежить від стабільності річної потреби судна в певному виді низкопотенційного теплоносія, отриманого в процесі утилізації. У цьому випадку домінуючим критерієм ефективності є коефіцієнт використання палива, на основі якого обирається теплоутилізаційна схема. Поставлена задача вирішується тим, що система утилізації низькопотенційного тепла компресорних установок, яка складається з двох півциліндричних основ, що з'єднуються між собою еластичними фіксаторами, та на усієї площі внутрішньої поверхні яких змонтовані первинні частини елементу Пельтьє з телуріду вісмуту, а на зовнішньої поверхні додаткові радіатори охолодження та вторинні частини елементу Пельтьє з германіду кремнію, які сполучені з первинними частинами металевими стрижнями та комутаційними пристроями для зв`язку з електромережою. Відмінність системи полягає у тому, що півциліндричні основи охоплюють "холодну" частину робочого циліндру двигуна Стірлінга, сполученого з електрогенератором, а "гаряча" частина циліндра двигуна міститься у внутрішній порожнині ресивера, до якого надходить стисле повітря для охолодження.

Ключові слова: компресорна установка, утилізація тепла, двигун Стірлінга

Sandler A. K., Shestopalov K. O., Yerin V. O. **Deep utilization of secondary energy resources ship compressor installations**

One of the ways to solve this problem is the development of technologies for deep utilization of heat of secondary objects of ship power plants. The introduction of such technologies makes it possible to significantly (by 10 ... 15%) increase the efficiency of using the thermal potential of fuel and ensure its economy, as well as improve the ecological situation in the world's oceans by reducing emissions of harmful substances into the environment. The development and implementation of heat utilization technologies are connected with the need to solve a number of rather complex scientific and technical tasks. As a rule, recycling technologies are implemented in the process of modernization or reconstruction of existing ship power plants. At the same time, the choice of the recycling scheme depends significantly on the stability of the ship's annual need for a certain type of low-potential coolant obtained in the recycling process. In this case, the dominant efficiency criterion is the fuel utilization ratio, on the basis of which the heat utilization scheme is selected. The task is solved by the fact that the low-potential heat utilization system of compressor units, which consists of two semi-cylindrical bases connected to each other by elastic fasteners, and on the entire area of the inner surface of which the primary parts of the Peltier element made of bismuth telluride are mounted, and on the so-called outer surface additional cooling radiators and secondary parts of the Peltier element made of silicon germanide, which are connected to the primary parts by metal rods and switching devices for communication with the electrical network. The difference

of the system is that the semi-cylindrical bases cover the "cold" part of the working cylinder of the Stirling engine connected to the electric generator, and the "hot" part of the engine cylinder is contained in the inner cavity of the receiver, which receives compressed air for cooling.

Key words: compressor unit, heat recovery, Stirling engine

Столярик Т.О. **Використання системного підходу під час розв'язання завдань з підвищення ефективності експлуатації систем мащення суднових дизелів**

Розглянуті теоретичні особливості використання системного підходу під час розв'язання завдань з підвищення ефективності експлуатації систем мащення суднових дизелів. З урахуванням, що системи мащення суднових дизелів є невід'ємною складовою суднової енергетичної установки, визначені ознаки актуальності досліджень та постійної наукової затребуваності з проведення випробувань щодо забезпечення режимів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння, до яких віднесено те, що системи мащення суднових дизелів є основними системами, що забезпечують їх функціонування та надійність; постійна або короткочасна зміна навантаження та експлуатаційних режимів дизелів призводить до зміни навантаження на всі його конструктивні елементи, що знаходяться в поступальному або обертальному русі та до мащення яких подається моторне мастило; погіршення умов мащення, або повна відсутність мастильного матеріалу між контактними поверхнями сприяє стрибкоподібному підвищенню механічних втрат та зростанню температурних навантажень, що може призвести до виникнення аварійних ситуацій та раптової зупинці дизелі, а іноді також до зупинці судна; підтримання необхідних режимів мащення суднових дизелів та стабілізація експлуатаційних характеристик моторних мастил, що забезпечують процес мащення основних контактних елементів дизеля гарантують надійну роботу дизелів на всіх експлуатаційних режимах. Також визначені основні запити практики щодо забезпечення режимів мащення дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту, які пов'язані з необхідністю підтримання енергетичних показників дизелів відповідно до вимог інструкції з технічної експлуатації та гарантованих значень фірм-виробників; зниження енергетичних втрат під час отримання корисної роботи; виконання вимог класифікаційних товариств щодо технічного стану суднових двигунів внутрішнього згоряння.

Розглянуті принципи декомпозиції процесу мащення за класифікаційними, реологічними та функціональним ознаками; а також принципи агрегатування процесу мащення виконується за енергетичними, екологічними та експлуатаційними показниками роботи дизелів суден морського транспорту.

Ключові слова: агрегатування процесу мащення, декомпозиція процесу мащення, експлуатація систем мащення, морський транспорт, система мащення, системний аналіз, системний підхід, судновий дизель.

Stoliaryk T.O. **The use of a system approach when solving tasks to increase the efficiency of operation of lubrication systems of marine diesel engines**

The theoretical features of the use of a system approach when solving tasks to increase the efficiency of operation of lubrication systems of marine diesel engines are considered. Taking into account that marine diesel lubrication systems are an integral part of a ship's power plant, signs of the relevance of research and constant scientific demand for conducting tests to ensure the lubrication regimes of marine internal combustion engines are identified, which include the fact that marine diesel lubrication systems are the main systems , which ensure their functioning and reliability; a permanent or short-term change in the load and operational modes of diesel engines leads to a change in the load on all its structural elements that are in translational or rotational motion and to which engine oil is supplied for lubrication; deterioration of lubrication conditions, or the complete absence of lubricant between the contact surfaces contributes to a sudden increase in mechanical losses and an increase in temperature loads, which can lead to emergency situations and a sudden stop of the diesel engine, and sometimes to the stop of the ship; maintenance of the necessary modes of lubrication of marine diesel engines and stabilization of operational characteristics of engine lubricants, which ensure the process of lubrication of the main contact elements of the diesel engine, guarantee reliable operation of diesel engines in all operational modes. Also, the main requests of the practice regarding the provision of lubrication regimes for diesel engines of marine and inland water transport vessels, which are related to the need to maintain the energy indicators of diesel engines in accordance with the requirements of the technical operation manual and the guaranteed values of the manufacturing companies, are also defined; reduction of energy losses during obtaining useful work; fulfillment of the requirements of classification societies regarding the technical condition of marine internal combustion engines. The principles of the decomposition of the lubrication process according to classification, rheological and functional characteristics are considered; as well as the principles of aggregating the greasing process is performed according to the energy, environmental and operational indicators of diesel engines of marine transport vessels.

Key words: aggregation of the lubrication process, decomposition of the lubrication process, lubrication system, marine diesel, marine transport, operation of lubrication systems, system analysis, system approach.

Огурцов Д.В., Козьміних М.А., Хлієва О.Я. **Аналіз ефективності застосування регенеративного теплообмінника у судновій холодильній машині провізійних камер при її переведенні з холодоагенту R404A на R407F**

Підвищення енергоефективності суднових парокомпресійних холодильних машин сумісно з їх переведенням на холодоагенти з низьким потенціалом глобального потеплення є одним з пріоритетним напрямків розвитку енергетичного машинобудування. Використання регенеративного теплообмінника (РТО) на лінії всмоктування у компресор є простим та дешевим способом забезпечення переохолодження рідкого холодоагенту після конденсатору з метою збільшення холодопродуктивності та холодильного коефіцієнту COP. В роботі проаналізовано доцільність застосування РТО у схемі суднової холодильної машини провізійних камери при її переведенні на використання холодоагенту з відносно низьким потенціалом глобального потеплення R407F (перехідний варіант). Показано, що використання РТО на лінії всмоктування у компресор для розглянутої схеми (з трьома рівнями температур у випарниках) призводить до незначного збільшення COP від 1,776 до 1,802 при переохолодженні рідини на 9 К. Було отримано, що температура парів на нагнітанні компресора збільшується з 102 до 127 °С, що є недопустимим. Був розглянутий варіант заміни традиційного РТО на лінії всмоктування на трьохходовий теплообмінник типу: пар після високотемпературного випарника/ пар після середньотемпературного випарника/рідина після конденсатора. Показане більш суттєве збільшення COP у порівнянні з використанням РТО на лінії всмоктування, від 1,776 до 1,843 при переохолодженні рідини на 10 К. Показано, що температура парів на нагнітанні компресора збільшується несуттєво, від 102 до 108 °С (при переохолодженні 10 К). Відзначена доцільність проведення аналогічного аналізу при переведенні суднових холодильних машин на холодоагенти з низьким потенціалом глобального потеплення, а також аналізу інших технічних рішенні забезпечення переохолодження рідкого холодоагенту для збільшення загального COP системи.

Ключові слова: суднова холодильна машин; холодильний коефіцієнт COP; потенціал глобального потеплення (GWP) холодоагенту; регенеративний теплообмінник (РТО); енергоефективність

Ogurtsov D., Kozminykh M., Khlieva O. **Performance analysis of the application of regenerative heat exchanger in ship refrigeration machine for provision chambers during its retrofit from R404A to R407F refrigerant**

The energy efficiency enhancement of ship vapour compressor refrigeration machines simultaneously with their retrofit to refrigerants with a low global warming potential (GWP) is one of the priority lines in power machine building development. The regenerative heat exchanger (RHE) application on the compressor suction line is a simple and inexpensive way to provide liquid refrigerant

subcooling after the condenser to increase the cooling capacity and coefficient of performance (COP). This study analyses the feasibility of the RHE applying in the ship refrigeration machine of the provision chambers during its retrofitting to the R407F refrigerant with relatively low GWP (transient refrigerant). It has been shown that the application of the RHE on the compressor suction line for the considered schematic solution (three temperature levels in the evaporators) contributes to a slight increase in COP from 1.776 to 1.802 at the 9 K of liquid subcooling. The increase in the vapour temperature on the compressor outlet from 102 to 127 °C was obtained, which is unacceptable. The replacement of the traditional suction line RHE with the three-pass heat exchanger (vapour from a high-temperature evaporator/vapour from a medium-temperature evaporator/liquid from the condenser) was considered. A more significant COP increase, from 1.776 to 1.843 at the liquid subcooling 10 K, was evaluated compared to the suction line RHE application. It is evaluated that the vapour temperature at the compressor outlet increases insignificantly, from 102 to 108 °C (10 K subcooling). The expediency of a similar analysis during the retrofit of the ship refrigeration machines to refrigerants with low GWP, as well as analyzing various technical solutions to ensure liquid refrigerant subcooling to increase the overall COP of the system, was emphasized.

Keywords: ship refrigeration machines; coefficient of performance (COP); global warming potential (GWP) of refrigerant; regenerative heat exchanger (RHE); energy efficiency

Шумілова К.В., Шумілов Д.І. **Багатоаспектний вплив судноплавства і діяльності людини в ракурсі парадигми управління ресурсами світового океану**

У статті досліджено стрімке розповсюдження забруднення морської екосистеми у світі, яке пов’язано з багатьма факторами впливу як судноплавства в цілому, так і діяльністю людини. Визначено, що наслідками цього є нераціональне використання ресурсів, застарілий флот, збільшення викидів шкідливих речовин в атмосферу, військові дії, уповільнення переходу на більш екологічні моделі роботи морського транспорту. Метою дослідження був аналіз методів та підходів до управління ресурсами світового океану, який дозволив би вирішити проблему зростання забруднення морських екосистем, пов’язану з багатоаспектним впливом різних чинників. Проведений аналіз звітів «Review of Maritime Transport 2023», Комісії Європейського парламенту та Ради про впровадження Рамкової директиви морської стратегії, Європейського агентства з навколишнього середовища №№ 25/2018, 17/2019 і даних порталу Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ, лабораторії навколишнього середовища в Монако та Зайберсдорфі, в яких за допомогою ядерних та ізотопних методів вивчаються процеси забруднення) показав зростання викидів парникових газів на 20% за останнє десятиліття, що склало 3% від загального обсягу у світі. Показано основний

вплив бойових дій на морські екосистеми Чорного та Азовського морів у наслідок збройного конфлікту в Україні, який перешкоджає екологічному моніторингу. Встановлено, що управління діяльністю людини в світовому океані може об'єднати різні підходи до управління морською екосистемою, а саме біорегіональну класифікацію; узгоджені системи морських природоохоронних зон або керованих районів моря; зональне господарювання в океанах та управління рибальством.

Наведені результати аналізу статистичних даних та експертних оцінок звітів свідчать про можливість використання багатьма країнами морського просторового планування для управління морськими ресурсами, яке дає змогу інтегрувати різні види діяльності у ракурсі ідеї збереження навколишнього середовища і передбачає екосистемний підхід, з врахуванням досвіду розпорядження ресурсами в інших регіонах світу.

Ключові слова: ризики судноплавства; морська екологія; екосистемний підхід; Чорне море; екологічний моніторинг; управління морськими ресурсами.

Shumilova K.V., Shumilov D.I. **Multi-aspective impact of shipping and human activities in the perspective of the world ocean resource management paradigm**

The article examines the rapid spread of pollution of the marine ecosystem in the world, associated with many factors influencing both shipping in general and human activities. It was determined that the reasons for this were the irrational use of resources, an outdated fleet, an increase in emissions of harmful substances into the atmosphere, military operations, and a slowdown in the transition to more environmentally friendly models of maritime transport.

The purpose of the study was to analyze methods and approaches to managing the resources of the world's oceans, making it possible to solve the problem of increasing pollution of marine ecosystems associated with the multidimensional influence of various factors. An analysis of the reports “Review of Maritime Transport 2023”, the Commission of the European Parliament and the Council on the implementation of the Maritime Strategy Framework Directive, the European Environment Agency No. 25/2018, 17/2019 and the data from the portal of the International Atomic Energy Agency (IAEA, laboratories environment in Monaco and Seibersdorf, where pollution processes are studied using nuclear and isotope techniques) showed a 20% increase in greenhouse gas emissions over the past decade, accounting for 3% of the world total. The main impact of hostilities on the coastal and marine ecosystems of the Black and Azov Seas as a result of the armed conflict in Ukraine, which hinders ecological monitoring, is shown. It has been established that the management of human activities in the world's oceans can combine different approaches to managing the marine ecosystem, namely bioregional classification; harmonized systems of marine protected areas.

The presented results of the analysis of statistical data and expert evaluations of the reports indicate the possibility of many countries using marine spatial planning for the management of marine resources, which makes it possible to integrate various types of activities in the perspective of the idea of environmental preservation and provides an ecosystem approach to managing the resources of the world's regions.

Keywords: shipping risks; marine ecology; ecosystem approach; Black Sea; environmental monitoring; marine resource management.

Кнауб Л.В., Лебедєв Б.В., Краснодій І.П., Асташеня І.І., Засуха О.Ю.

Удосконалення конструкції дизельних двигунів з урахуванням сучасних екологічних вимог

У статті розглядаються можливості підвищення ефективності та екологічної безпеки дизельних двигунів. України за допомогою використання додаткової системи живлення у вигляді вихрового випаровувача-змішувача. Вихровий випаровувач-змішувач працює на енергії відпрацьованих газів і дозволяє використання дешевих, відносно стандартних, низькоцетанових палив, наприклад, стабільного газоконденсату без переробки.

Аналіз експериментальних даних безмоторних випробувань по якості розпилювання і випаровування у вихровій системі показує, що при витраті палива до 3 кг/год суміш задовольняє вимогам аерозольного змішування та випаровування, тобто, при $D_{30} < 1$ мкм. Зі зростанням витрат пального якість розпилювання погіршується, при цьому різкий «стрибок» погіршення розпилювання відбувається при максимальному крутному моменті, максимальній потужності та максимальній частоті обертання.

Результати досліджень показують, що граничний мінімальний тиск необхідний для отримання аерозольного стану при сталих годинних витратах пального G_p = 2,0 ; 2,9; 6,5 кг/год становить 0,05-0,1 МПа.

Впровадження вихрового випаровувача-змішувача в систему подачі палива дизельного двигуна дозволяє підвищити його ефективність та екологічність, а також зменшити витрати палива. В результаті використання трубки Ранка та ефективної підготовки палива перед спалюванням відбувається збільшення КПД двигуна, що призводить до більш ефективного використання енергії палива та підвищення загальної продуктивності транспортних засобів. Трубка Rank дозволяє більш ефективно використовувати паливо, запобігаючи його витокам і втратам у вигляді невикористаного палива. Це особливо важливо для військової морської, автомобільної та амфібійної техніки, де ефективність та надійність двигунів мають вирішальне значення для виконання різноманітних завдань.

Ключові слова: дизельний двигун, низькоцетанове паливо, вихровий випаровувач-змішувач, якість розпилювання, випаровування, трубка Ранка, підготовка палива, екологічна безпека

Knaub L.V., Lebedev B.V., Krasnodiy I.P., Astashenya I.I., Drought O.Yu. **improvement of diesel engines taking into account modern environmental requirements**

The article considers the possibilities of increasing the efficiency and environmental safety of diesel engines. of Ukraine by using an additional power supply system in the form of a vortex mixer-evaporator. The vortex mixer-evaporator works on the energy of waste gases and allows the use of cheap, relatively standard, low-cetane fuels, for example, stable gas condensate without processing.

The analysis of experimental data of motorless tests on the quality of atomization and evaporation in a vortex system shows that with a fuel consumption of up to 3 kg/h, the mixture meets the requirements of aerosol mixing and evaporation, i.e., at $D_{30} < 1$ μm. As fuel consumption increases, the quality of spraying deteriorates, while a sharp "jump" in the deterioration of spraying occurs at maximum torque, maximum power and maximum rotation frequency.

The results of the research show that the maximum minimum pressure is necessary to obtain an aerosol state at a constant hourly consumption of fuel G_p = 2.0; 2.9; 6.5 kg/h is 0.05-0.1 MPa.

The introduction of a vortex evaporator-mixer into the fuel supply system of a diesel engine allows to increase its efficiency and environmental friendliness, as well as to reduce fuel consumption. As a result of the use of the Rank tube and the effective preparation of fuel before combustion, the efficiency of the engine increases, which leads to more coefficient of efficiency use of fuel energy and an increase in the overall performance of vehicles. The Rank tube allows more efficient use of fuel, preventing its leaks and losses in the form of unused fuel. This is especially important for military marine, automotive and amphibious vehicles, where the efficiency and reliability of engines are critical to a variety of tasks.

Key words: diesel engine, low cetane fuel, vortex mixer-evaporator, atomization quality, evaporation, Rank tube, fuel preparation, environmental safety

Лебедев Б., Уминський С., Королькова М., Мельник О. **Технологія відновлення колінчастих валів дизелів зі зміцненням шийок**

Найбільш характерними дефектами колінчастих валів суднових середньооборотних дизелів є: знос і задираки шийок, деформації, корозія та ін.

Технології відновлення колінчастих валів нанесенням покриттів в основному орієнтовані на забезпечення зносостійкості шийок, але при цьому втомна міцність знижується на 25-30%, а ресурс поступається нормативно. Використовують напилення, а основним напилюваним матеріалом є хромонікелеєві порошки, що забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики, але при цьому відрізняються високою вартістю. і розробка технології відновлення чавунних колінчастих валів напиленням сумішшю порошків, які забезпечують необхідний нормативний ресурс Для відновлення сталевих колінчастих валів в багатьох випадках використовують наплавку, як більш продуктивний спосіб відновлення. За рахунок великих тепловкладень при

реалізації цього способу відбувається зміна осьових розмірів вала, що згодом призводить до ускладнення збірки відремонтованих двигунів. В даний час фактори впливаючі на величину осьової деформації наплавляємих валів залишаються маловивченими. Технологічні процеси, які передбачають відновлення зношених валів шляхом нанесення покриттів на їх шийки, відрізняються від процесів виготовлення деталей необхідністю отримання ремонтних заготовок, в т.ч. нанесенням покриттів і особливостями обробки. Вибір технологічних баз при обробці різанням відновлюваної деталі відрізняється від відповідної процедури при обробці заготовок з поковок і виливків. У частині отримання високих експлуатаційних характеристик відновлених валів важливу роль відіграють мікроструктура покриття і її властивості на поверхні і в зоні з'єднання з основним матеріалом. Найбільше застосування при отриманні ремонтних заготовок знайшли наплавка (60-80%) і напилення (6-12%). Зносостійкість і втомну міцність наплавлених покриттів можна значно підвищити, застосовуючи після наплавлення поверхневе пластичне деформування за допомогою оснастки, яка формує сприятливу текстуру покриття. У більшості випадків підвищення зносостійкості за рахунок наплавлення високовуглецевого легованого матеріалу призводить до зниження межі витривалості відновлюваних деталей. Аналіз процесів відновлення колінчастих валів показав, що частина з них містить енергоємні операції, інша частина підвищує зносостійкість, але при цьому знижується втомна міцність. Для вирішення цієї проблеми часто використовується дороге устаткування або матеріали, що не завжди виправдані в ремонтному виробництві. Так само маловивченими є фізико-механічні властивості покриттів, що надають безпосередній вплив на експлуатаційні характеристики відновлених валів. Найбільш небезпечними є галтелі колінчастого вала - місця переходу щік в корінну шийку вала. Щоки навантажуються змінними згинаючими моментами в двох площинах, а також стискаючими і розтягуючими силами, що призводить до утворення втомних тріщин і поломки вала . Розмір і форма робочих поверхонь деталей в значній мірі впливають на технічний стан сполучень, зміна яких в процесі експлуатації призводить до підвищення інтенсивності зношування ресурсовизначаючих елементів.

Lebedev B., Uminsky S., Korolkova M., Melnik A. **Technology for the restoration of diesel crankshafts with the strengthening of necks**

The most characteristic\\typical\\ defects of the crankshafts of medium-speed marine diesel engines are wear and burrs of the necks, deformations, corrosion, etc.

Technologies for the restoration of crankshafts by applying coatings are mainly focused on ensuring the wear resistance of the necks. But at the same time the fatigue strength is decreased by 25-30%, and the resource is decreased as per norms. Sputtering is used, and the main material sprayed is chrome-nickel pow-

ders, which provide the necessary performance characteristics, but at the same time are high in cost, and the development of technology for the restoration of cast iron crankshafts by sputtering a mixture of powders that provide the necessary regulatory resource. In many cases for the restoration of steel crankshafts, surfacing is used as a more productive method of restoration. Due to the large heat input during the implementation of this method, there is a change in the axial dimensions of the shaft, which subsequently complicates the assembly of repaired engines. At present, the factors affecting the axial deformation of welded shafts are still very little studied. Technological processes, which involve the restoration of worn shafts by applying coatings to their necks, differ from the processes of manufacturing parts as it is needed to obtain repair blanks, including coating and finishing features. The choice of technological bases when processing by cutting a renewable part differs from the corresponding procedure when processing blanks from forgings and castings. In terms of obtaining high operational characteristics of restored shafts, the microstructure of the coating and its properties on the surface and in the area of connection with the base material play an important role. Surfacing (60-80%) and sputtering (6-12%) were most used in the production of repair blanks. The wear resistance and fatigue strength of deposited coatings can be significantly increased by applying post-deposit surface plastic deformation with a tool that forms a favorable texture of the coating. In most cases, the increase in wear resistance due to the deposition of a high-carbon alloy material leads to a decrease in the endurance limit of the parts being repaired. The analysis of crankshaft restoration processes showed that some of them contain energy-intensive operations, the other part increases wear resistance, but at the same time decreases fatigue strength. To solve this problem, expensive equipment or materials are often used, which are not always justified during repairs . The physico-mechanical properties of coatings, which have a direct impact on the operational characteristics of restored shafts, are also little studied. The most dangerous are the crankshaft fillets - the places where the cheeks join the root neck of the shaft. The cheeks are loaded by alternating bending moments in two planes, as well as compressive and tensile forces, which leads to the formation of fatigue cracks and shaft failure. The size and shape of the working surfaces of the parts significantly affect the technical condition of the connections, the change of which during operation leads to an increase in the intensity of wear of resource-determining elements.

Zhuravlov Yu. I., Kostyuchenko Ye. F., Povar A. I. Assessment of the thermal and stress-strain state of cylindrical surfaces of ship parts with wear-resistant coatings

The article shows that the increase in the durability of parts of STM is directly related to the wear resistance of machine parts. Thus, increasing the wear resistance of parts of STM parts is an actual direction of research. The durability

of many machines is determined by the wear resistance of parts that have internal cylindrical surfaces that work under sliding friction conditions.

It is known that the task of increasing the wear resistance of a specific product often does not involve qualitative modification of the structural composition of the used material in its entire volume, but is transferred to the modification of the surface layer of the material, since the protection of parts from wear in some cases is solved by surface strengthening. In the general case, surface strengthening means increasing the hardness of the working surface of the part, which allows to increase the wear resistance.

A large number of works are devoted to increasing the frictional mechanical characteristics, in which various strengthening methods are proposed. Prospective directions for the development of surface-strengthening technologies involve the use of new methods of obtaining wear-resistant coatings, mainly using wear-resistant materials, that is, coatings based on compounds such as oxides, nitrides, and carbides. The use of reinforcing coatings made of heterogeneous materials leads not only to the modification of the surface layer, but also to the formation, in some cases, of a fundamentally new composite material of the surface layer, which has both high strength and sufficient plasticity, as well as increased wear resistance.

Study of thermomechanical processes in coated products during their processing and operation to determine the conditions for the formation of defects in the coating peeling from the base material and their elimination, taking into account the physical and mechanical condition of the surface layer, technological parameters of the finishing treatment, and hereditary defects arising in the process application of coatings, show that during translational movement of a cutting tool in a cylinder with out-of-roundness δ (or roughness Ra) in the area (-a; a), zones of partial peeling of the coating are formed on its working surface. Under the influence of working tangential stresses, these areas can reach such values that the coating peels off from the matrix of the cylindrical surface.

Let's find out under which peeling parameters, related to the roughness of the working surface of the cylinder and its geometric error, as well as the physical and mechanical properties of the coating and the material of the cylinder, destruction of its own coating occurs.

Key words: ship technical equipment, defects of ship parts, "shaft-sliding bearing" combination, wear of surfaces.

Журавльов Ю.І, Костюченко Є.Ф., Повар О.І. **Оцінка** теплового й напружено-деформованого стану циліндричних поверхонь суднових деталей **зі зносостійкими** покриттями

В статті показано, що підвищення довговічності деталей СТЗ безпосередньо пов’язане зі зносостійкістю деталей машин. Таким чином, підвищення зносостійкості деталей деталей СТЗ є актуальним напрямком досліджень. Довговічність багатьох машин визначається зносостійкістю дета-

лей, що мають внутрішні циліндричні поверхні, що працюють в умовах тертя ковзання.

Відомо, що завдання підвищення зносостійкості конкретного виробу часто не передбачає якісної модифікації структурного складу використовуваного матеріалу в усьому його об'ємі, а переноситься на видозміну поверхневого шару матеріалу, оскільки захист деталей від зносу в ряді випадків вирішується поверхневим зміцненням. У загальному випадку під поверхневим зміцненням розуміється підвищення твердості робочої поверхні деталі, що дозволяє збільшити зносостійкість.

Підвищенню механічних характеристик, що труться, присвячена велика кількість робіт, у яких запропоновані різні способи зміцнення. Перспективні напрямки розвитку поверхнево-зміцнюючих технологій припускають використання нових методів отримання зносостійких покриттів, в основному з використанням зносостійких матеріалів, тобто покриттів на основі сполук типу оксидів, нітридів і карбідів. Використання зміцнюючих покриттів із різнорідних матеріалів призводить не тільки до модифікації поверхневого шару, але й до утворення, у ряді випадків принципово нового композиційного матеріалу поверхневого шару, що володіє як високою міцністю й достатньою пластичністю, так і підвищеною зносостійкістю.

Дослідження термомеханічних процесів у виробах із покриттям при їх обробці й експлуатації для визначення умов утворення дефектів відшарування покриттів від основного матеріалу і їх усунення з урахуванням фізико-механічного стану поверхневого шару, технологічних параметрів фінішної обробки та спадкових дефектів, що виникають у процесі нанесення покриттів, показують, що при поступальному русі різального інструменту в циліндрі, що має некруглість δ (або шорсткість R*a)* на ділянці *(-a; a),* на його робочій поверхні формуються зони часткового відшарування покриття. Ці ділянки під дією робочих дотичних напружень можуть досягати таких значень, при яких відбувається відшарування покриття від матриці циліндричної поверхні.

Знайдемо, при яких параметрах відшарування, пов'язаних із шорсткістю робочої поверхні циліндра і його геометричною похибкою, а також фізико- механічними властивостями покриття й матеріалу циліндра, відбувається руйнування власного покриття.

Ключові слова: суднові технічні засоби, дефекті суднових деталей, сполучення «вал-підшипник ковзання», зношування поверхонь.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ І ПОДАННЯ РУКОПИСІВ ДЛЯ ЗБІРНИКА «СУДНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ»

Науково-технічний збірник національного університету «Одеська морська академія» «Суднові енергетичні установки» є науковим виданням, в якому можуть публікуватись основні результати дисертаційних робіт зі спеціальностей 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» та 275 «Транспортні технології (за видами)».

Стаття повинна відповідати правилам оформлення наукових статей і містити постановку проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями, аналіз останніх досліджень і публікацій за темою статті, формулювання цілей статті (постановку завдання), виклад основного матеріалу з необхідними обґрунтуваннями, висновки та перспективи подальших досліджень.

Рукопис подається на електронному носії у форматі *.doc з паперовою копією і рефератами на українській та англійській мовах, підписаною всіма авторами, з контактною інформацією: адреси, телефони. Обсяг статті — до 0,5 авторського аркуша з урахуванням ілюстрацій, підрисункових підписів і реферату.

Реферат двома мовами – українською та англійською – наводиться наприкінці рукопису та повінен містити: ФІО авторів, назву статті, скорочений зміст та ключові слова. Обсяг реферату кожною мово ю повинен складати не менше 1800 знаків (з пробелами), включаючи ключові слова.

Формат паперу А5 (148×210) Усі поля — 16 мм. Текст - через 1 інтервал, Times New Roman, 11 пт; таблиці, заголовки таблиць, підрисункові підписи — 10 пт.

На першій сторінці рукопису повинні бути вказані наступні елементи: ФІО авторів; найменування закладу, в якому виконувалася робота; назва статті. Заголовок статті оформляти за стилем Заголовок 1, кегль 11 пт, без переносу слів, усі прописні.

При необхідності робиться перенос тексту, але не в заголовку статті.

Усі формули повинні бути набрані в Mathtype. Змінні, функції, вектори, матриці і т.п. оформляються латинським шрифтом. Змінні виконуються похилим шрифтом, вектори — напівжирним, без нахилу; грецькі символи — у всіх випадках без нахилу; індекси: латинські — з нахилом, кириличні — без нахилу. Розміри в Mathtype: основ-

ний — 11 пт, збільшений — 16,5 пт, індекс — 7 пт, субіндекс — 6 пт. Нумеруються тільки ті формули, на які є посилання в тексті. Формули відділяються від тексту рядками висотою 2 пт. Одиниці фізичних величин повинні відповідати ДСТУ 3651.0-97, ДСТУ 3651.1-97, ДСТУ 3651.2-97 "Метрологія. Одиниці фізичних величин" і мати загальноприйняті позначення.

Таблиці слід розташовувати на одній сторінці крім випадків, коли таблиця займає більше 1 сторінки. Заголовок — 10 пт, без переносу, інтервал перед — 8 пт, після — 2 пт, основний шрифт таблиці — 10 пт.

Рисунки відділяються від тексту зверху інтервалом 8 пт, від назви — 2 пт. Назва рисунку — кегль 10 пт, без переносу, інтервал після — 8 пт. На всі таблиці і рисунки повинні бути посилання в тексті статті у скороченому вигляді (рис., табл.).

Ілюстрації, які підготовлені в графічних редакторах, додаються в якості окремих файлів у вихідному форматі. Розмір написів повинен забезпечувати їхню читаність (8-10 пт).

Посилання на літературні джерела у тексті оформлюються у квадратних дужках з вказанням номера джерела.

Бібліографічний опис оформлюється з урахуванням Національного стандарту України ДСТУ 8302:2015 «Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання».

Приклад оформлення списку літератури наведено нижче:

Книги одного, двох або трьох авторів

Заблоцький Ю.В., Сагін С.В. Робочий цикл суднових двигунів внутрішнього згоряння. Теорія та розрахунок основних параметрів: навчальний посібник. Одеса: НУ «ОМА», 2018. 108 с.

Книги чотирьох і більше авторів

Колегаєв М.О., Парменова Д.Г., Мамкічев М.А., Ніколаєва Г.В., Розлуцький О.М., Роман Г.Г., Сваричевська А.П., Осадчук Д.Д. Безпека та охорона на морі: навчальний посібник. Одеса: Фенікс, 2020. 832 с.

або

Безпека та охорона на морі: навчальний посібник / М.О. Колегаєв та ін. Одеса: Фенікс, 2020. 832 с.

Стаття у періодичному виданні, розділ книги

Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів. *Суднові енергетичні установк.*

2021. Вип. 43. С. 69-80. https://doi.org/10.31653/smf343.2021.69-80.

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. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.11.015

Праці конференції

Голіков В.А., Данілов К.С., Сінюта К.О. Експлуатація і ремонт транспортних засобів морського та річкового флоту. *Науково-техн. конф. «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт»*, Одеса, 22-23 березня 2023 р. Одеса: НУ "ОМА". С. 10-13.

Дисертації

Будашко В. В. Підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів: дис. …. д-ра техн. наук: 05.22.20. Одеса, 2017. 422 с.

Законодавча та нормативна документація, стандарти

Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року (консолідований текст з манільскими поправками). К.: ВПК «Експрес-Поліграф», 2012. 568 с.

ДСТУ 7152:2010 (ISO 8:2019, NEQ; ISO 18:1981, NEQ; ISO 215:1986, NEQ). Видання. Оформлення публікацій у журналах і збірниках. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 11 с. (Інформація та документація)

Електронні ресурси

Marine Environment Protection Committee progress on GHG Strategy and next set of GHG reduction measures, adopts SOx control area. *International Maritame Organisation:* website. URL: https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC-79.aspx (date: 01.12.2023)

Про освіту: Закон України від 01.07.2014 р. № 1556-VII. Дата оновлення: 28.09.2018. URL:http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1556-18 (дата звернення: 15.11.2018).

Контактна інформація - e-mail: ivanovich1zh@gmail.com

Суднові енергетичні установки:
науково-технічний збірник.
Випуск 47.

Підписано до друку 30.11.2023. Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. 10,80. Наклад 100. Зам. № И12-12 52.

НУ «ОМА», центр „Видавінформ”
Свідчення ДК № 1292 від 20.03.2003
65029, м. Одеса, вул.. Дидрихсона, 8
тел./факс: 048-234-14-12
publish@ma.odessa.ua