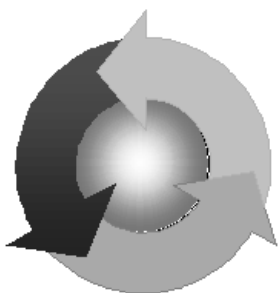


Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Суднові енергетичні установки



Науково-технічний
збірник

Випуск 50

Одеса
2025

Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник.
Вип. 50 – Одеса: НУ «ОМА», 2025. – 209 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. Сагін С.В. (науковий редактор); д-р техн. наук, проф. Афтаниук В.В.; д-р техн. наук, проф. Будашко В.В.; д-р техн. наук, проф. Гвоздева І.М.; д-р техн. наук, проф. Голіков В.А.; д-р техн. наук, проф. Горб С.І.; к-т техн. наук, доц. Журавльов Ю.І.; к-т техн. наук, доц. Заблоцький Ю.В.; д-р техн. наук, проф. Захарченко В.М.; д-р фіз.-мат. наук, проф. Козицький С.В.; к-т техн. наук, проф. Колегаєв М.О.; д-р фіз.-мат. наук, проф. Малахов О.В.; д-р техн. наук, проф. Міюсов М.В.; д-р техн. наук, проф. Онищенко О.А.; к-т техн. наук, доц. Печенюк А.В.; д-р техн. наук, проф. Суворов П.С.; д-р техн. наук, проф. Хлієва О.Я.; Doctor of Technical Sciences, Senior Lectures Class A, Bendahmane Boukhalfa (Algeria)

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

Контактні телефони редакції (067) 558-13-28

e-mail: ivanovich1zh@gmail.com

Затверджене вченою радою НУОМА, протокол № 2 від 25.09.2025.

ISSN 1815-6770 (print)

©Національний університет "Одеська морська академія", 2025

Зміст

Богач В.М., Довиденко Ю.М. Обертюр К.Л. Закономірності руху плівки мастила по дзеркалу циліндра	5
Веретеннік О.М. Сандлер А.К. Засіб підвищення енергоефективності суднових систем утилізації вторинного тепла	15
Голіков В.А., Данилов К.С., Шумілова К.В. Еколого-енергетична ефективність експлуатації контейнеровозів на міжконтинентальних перевезеннях.....	26
Колегаєв М.О., Побережний Р.В. Підвищення екологічних показників роботи дизелів морських суден	42
Куропятник О.А. Аналіз експлуатаційних режимів роботи дизелів суден морського транспорту під час використання альтернативного палива	52
Куропятник О.А. Визначення оптимальних умов експлуатації систем каталітичного відновлення випускних газів дизелів суден морського транспорту	67
Муравйов Г.М., Шумілова К.В., Мальцев А.С. Удосконалена змістовна модель планування координат переходу автономного судна в рейсовому циклі на обширному мілководді.....	80
Половинка Е.М., Мартинов С.В. Швидкісна характеристика гібридної системи впорскування палива судового середньообертового дизеля	93
Сагін С.В., Парменова Д.Г., Верпека А.О. Підвищення паливної економічності дизелів суден морського транспорту	102
Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Поповський А.Ю., Сагін А.С. Адаптація систем автоматичного регулювання частоти обертання суднових дизелів під час їх переведення на паливо з низьким вмістом сірки.....	116
Фомін О.В., Мельник О.В., Черкашин О.П., Гунько Є.В. Перспективні шляхи підвищення надійності та ефективності механізмів газорозподілу енергетичних установок.....	131

Хлієва О.Я., Константинов О. І. Аналіз ефективності установки на основі органічного циклу Ренкіна на різних робочих тілАХ для рекуперації теплоти води охолодження двигуна Wärtsilä 12V46F	141
Черемісін В.І., Сапіга В.В., Ігнатенко О.А. Підвищення термодинамічної ефективності газотурбінних двигунів морського призначення	156
Kozytskyi S.V, Bezditko A.A. Use of nanomaterials – a way to increase the resource of marine mechanisms	161
Korkh M.V., Zhuravlov Yu.I. Innovation in the development of ship system drawings and schematics	168
Реферати.....	179
Правила оформлення і подання рукописів для збірника «Суднові енергетичні установки»	206

10.31653/smf50.2025.5-14

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

Національний університет "Одеська морська академія"

ЗАКОНОМІРНОСТІ РУХУ ПЛІВКИ МАСТИЛА ПО ДЗЕРКАЛУ ЦИЛІНДРА

Кількісне дослідження будь-якого фізичного явища включає такі основні етапи: експериментальне вивчення фізичного механізму; побудову фізичної та математичної моделей; вибір методу та розв'язання рівнянь математичної моделі.

Результат рішення представляється у вигляді функціональних співвідношень, що дають кількісний опис досліджуваного явища.

Часто складність явища перешкоджає побудові коректної та повної математичної моделі. Вирішення цієї проблеми зазвичай ведеться у двох напрямках. Насамперед складне явище замінюють «ідеальним», або «елементарним», процесом. Інша можливість обходу виникаючих труднощів полягає у заміні складного різноманіття взаємопов'язаних процесів їх ідеалізованими аналогами з коректним математичним описом. Для цієї мети постулюють можливість застосування фізичних законів за певних ідеалізованих умов, або із залученням додаткових гіпотез.

Одними з найважливіших є процеси, що відбуваються в стікаючих плівках рідини. Їх характеристики залежать від параметрів течії і докорінно відрізняються для різних гідродинамічних режимів (ламінарного, хвильового, турбулентного). Зокрема, це є наслідком поверхневих явищ, що змінюють тип течії (забруднення поверхнево-активними речовинами, динамічна взаємодія з газовою фазою).

Плівковий тип течії по суті є рідиною, що стікає по гладкій твердій поверхні під дією сили тяжіння. Товщина плівки завжди виявляється значно менше її ширини, і, отже, такий плин рідини можна розглядати як двовимірний. Те саме справедливо для випадку, коли плівка стікає вниз по викривленій поверхні за умови, що радіус кривизни набагато більше товщини плівки. Двовимірність течії дозволяє розглядати плівки одиничної ширини. Витрата рідини у такій плівці визначається співвідношенням ваги рідини, її в'язкості та сил, що діють на поверхні розділу газ – рідина.

Кількісний опис такої течії вважається вичерпним, якщо визначено компоненти вектора швидкості, тиск рідини і товщина плівки.

Ці характеристики можуть бути отримані за допомогою рішення основних рівнянь механіки суцільних середовищ, що включають рівняння перенесення імпульсу, нерозривності та макроскопічного балансу.

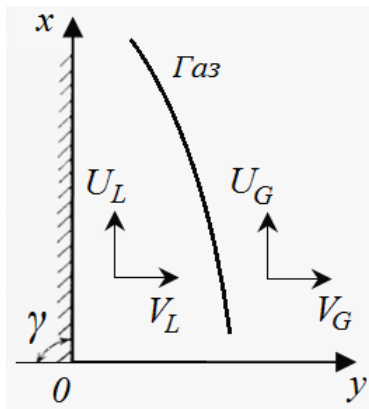


Рис. 1. Фізична модель

Математичний опис стікаючих плівок ґрунтується на фізичній моделі, зображеній на рис.1.

Плівка стікає вниз по твердій поверхні $y=0$, і математична модель течії задається системою диференціальних рівнянь, що зв'язують компоненти вектора швидкості u і v , тиск p і товщину h . Будемо вивчати плин ньютонівської рідини. У цьому випадку основними рівняннями, що описують течію, є рівняння Нав'є - Стокса, рівняння нерозривності та рівняння макроскопічного балансу [1]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \sin \gamma, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \cos \gamma, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u dy = 0. \quad (4)$$

тут ρ - щільність рідини, ν - її кінематична в'язкість, g - прискорення сили тяжіння і γ - кут нахилу поверхні до горизонту. Далі вивчати- мемо вертикальні плівки ($\gamma = 90^\circ$). Умови однозначності рішення системи (1) - (4) представлені чотирнадцятьма початковими та граничними умовами. Оскільки розглядатимуться лише стаціонарні чи стійкі періодичні течії, три початкові умови для u , v і h стають непотрібними. Те ж саме можна сказати про одну з граничних умов для

тиску p , оскільки розподіл p в повздовжньому напрямку завжди визначається з точністю до довільної постійної.

Оскільки довжина плівки значно більша, ніж її товщина ($l > h$), істотно важливі лише асимптотичні рішення при $x \rightarrow \infty$ і, таким чином, граничні умови по повздовжній координаті стають непотрібними. Крім того, зазначена особливість рідких плівок призводить до спрощення системи визначальних рівнянь (1) - (4). Отже, для вирішення завдання потрібно задати лише чотири граничні умови. Вони висловлюють умову «прилипання» на твердій стінці $y=0$ та умови рівноваги сил на міжфазній поверхні газ-рідина.

$$y = 0, \quad u = v = 0, \quad (5)$$

$$y = h, \quad p_{nL} = p_{\sigma} + p_{nG}, \quad p_{\tau L} = p_{\tau G}, \quad (6)$$

$$u_{nG} = u_{nL}, \quad u_{\tau G} = u_{\tau L},$$

де:

$$p_{nL} = -p - 2\mu \frac{1-h'^2}{1+h'^2} \frac{\partial u_L}{\partial x} - 2\mu \frac{h'}{1+h'^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

$$p_{\sigma} = \frac{\sigma h''}{(1+h'^2)^{3/2}},$$

$$p_{\tau L} = \mu \frac{1-h'^2}{1+h'^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - 4\mu \frac{h'}{1+h'^2} \frac{\partial u}{\partial x}.$$

Верхній штрих тут і всюди далі означає диференціювання по x , нижній індекс G - приналежність до газової фази, L - до рідкої, σ - коефіцієнт поверхневого натягу рідини, p_n і p_{τ} - нормальна і дотична компоненти тензора напружень на міжфазній поверхні, а p_{σ} - капілярний тиск.

Експериментальні дослідження різних авторів свідчать про те, що для рідких плівок можливі три основні режими течії: ламінарний, хвильовий і турбулентний. Однак ця класифікація не зовсім точна, і режими слід швидше назвати ламінарним безхвильовим, неламінарним хвильовим і турбулентним. Області існування цих трьох основних режимів течії визначаються за допомогою критичних значень числа Рейнольдса:

$$Re = Q / \nu,$$

де Q - об'ємна витрата рідини, що припадає на одиницю ширини плівки.

Ламінарний режим плинущ спостерігається при дуже низьких числах Рейнольдса ($Re \leq 2$) [2]. Він може існувати при витратах, менших, ніж деяке критичне значення, що залежить від властивостей рідини (поверхневого натягу, в'язкості), властивостей твердої підкладки (її шорсткості), наявності поверхнево-активних речовин і т. п.

Безхвильова течія плівки малов'язких рідин може бути реалізована тільки після гідрофілізації твердої поверхні. Якщо підстилаюча тверда поверхня є полірованою то гідрофілізацію, що забезпечує добру змочуваність, можна зробити обробкою поверхні за допомогою деяких лужних агентів. Після такої обробки може бути експериментально реалізована течія з гранично низькими числами Рейнольдса нижче 0,5.

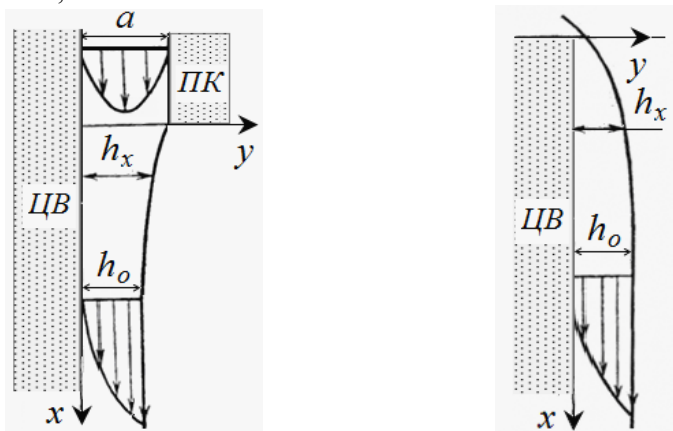


Рис.2. Типи розподільвачів рідини:

а) подача через вузьку щілину; б) подача переливом

Хвильові режими по суті також є ламінарними і для них характерно, що хвилі поширюються вздовж плівки з фазовою швидкістю, що перевищує швидкість частинок рідини на поверхні. Встановлено, що з $Re > Re_{cr}$ хвилі з'являються на поверхні плівки лише на певній відстані від розподільника рідини, яку зазвичай називають *лінією початку хвилі*.

Довжина початкової безхвильової області залежить від конструкції розподільного пристрою (рис.2) і наявності поверхнево-активних речовин. Вона зменшується зі зростанням числа Рейнольдса. Наявність забруднень із поверхнево-активними властивостями, навпаки, збільшує цю область.

Експериментальні результати [3, 6] свідчать про те, що безхвильові плівки спостерігаються аж до $Re = 6$. Значенням $Re_{cr} = 2$ може бути при недостатній довжині досліджуваних плівок, або при наявності слідів ПАР в рідині.

Ймовірно, причиною появи збурень, що призводять до розвитку системи хвиль на поверхні плівки, є сингулярна точка в місці виходу плівки з розподільника рис.2(а): у цій точці здійснюється перехід від режиму течії між двома паралельними твердими стінками до вільної поверхні.

Вважається, що верхньою межею за кількістю Рейнольдса для режиму хвильового течії є значення $Re = 250$. Однак експерименти підтверджують, що перехід до турбулентного режиму відбувається в діапазоні $250 < Re_{cr} < 500$. Це може бути пояснено недоліком суто гідродинамічного критерію переходу до турбулентного режиму або перехідною природою та властивостями поверхні хвиль.

Іноді для визначення критичного числа Рейнольдса використовують експериментальні дані з масопереносу в рідких плівках. Проте слід прийняти, що перехідний режим, безперечно, існує. Режим плівки слід розглядати як турбулентний при $Re > 500$.

Ламінарний плин плівки є по суті таким, що встановився, оскільки на її поверхні відсутні хвилі. Така течія може існувати протягом усієї довжини плівки (при досить малих числах Рейнольдса) або тільки на початковій ділянці. Математична модель цієї течії виходить із рівнянь (1) - (6) за умови, що

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial t} = 0. \quad (7)$$

Для вирішення гідродинамічної задачі необхідно сформулювати дві граничні умови за координатою x . Перше (при $x=0$), як це випливає з рис.2, залежить від конструкції вхідного розподільного пристрою.

Взагалі кажучи, прийнято розглядати два граничні випадки: однорідний вхідний профіль швидкості рис.2(б) або параболічний рис.2(а). Обидва типи умов можна записати у наступному вигляді:

$$x = 0, \quad u = u_0, \quad v = 0, \quad p = \text{const}, \quad h = h_0, \quad (8)$$

де: $u_0 = \text{const}$ або $u_0 = u_0(y)$.

Друга гранична умова виставляється на кінці плівки. Воно залежить від способу видалення рідини із поверхні. Оскільки зазвичай

довжина плівки l значно перевершує її товщину h , цю граничну умову зазвичай формують при $x \rightarrow \infty$.

Щоправда, такий розгляд не може бути наслідком апіорної фізичної передумови, а дає лише асимптотичне розв'язання задачі (1)-(6) при $x \rightarrow \infty$. Реально можна використовувати граничну умову $x = l$, але це не підвищить практичної цінності рішення.

Течія ламінарної плівки залежить від різних факторів, пов'язаних як з об'ємними (кут нахилу твердої стінки, в'язкість рідини), так і з поверхневими динамічними впливами (рух прилеглого газу, поверхнева пружність, пов'язана з адсорбцією ПАР).

Поверхня стікаючої рідкої плівки практично вільна від напружень, якщо немає динамічної взаємодії (або вона досить мала) з газом і якщо поверхневий натяг сталий уздовж всієї довжини плівки.

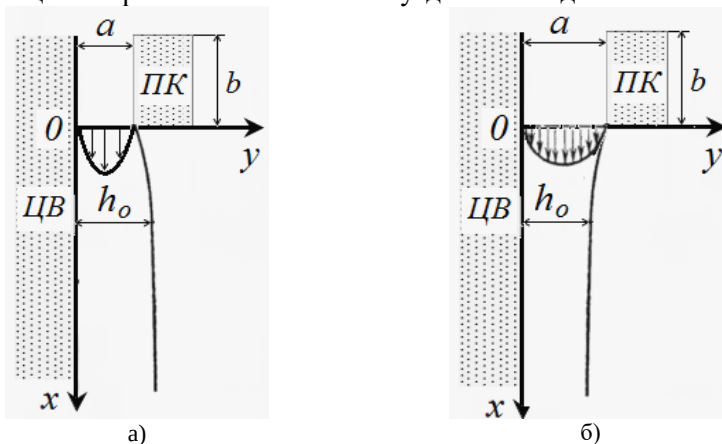


Рис.3. Типи вхідних профілей швидкості у СДВЗ

У цьому випадку гранична умова істотно спрощується внаслідок того, що:

$$p_{nG} = 0, \quad p_{\tau G} = 0. \quad (9)$$

Рух плівки з вільною поверхнею зображений на рис.3(а). Мастило проходить через щілину шириною a , і залежно від витрати Q , конструкції розподільника й довжини щілини b можуть бути реалізовані різні варіанти вхідного профілю швидкості плівки [4]. При $b > 0,08aRe$ реалізується розвинений параболічний профіль рис. 3(а), (б).

При досить довгих плівках ($l \geq h$), розподіл швидкості виходить як рішення задачі (1)-(6) із граничною умовою (8) і з урахуванням співвідношень (7) і (9). Спочатку сформульована задача представляється в безрозмірному вигляді за допомогою наступних змінних:

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{l_0}, \quad Y = \frac{y}{h_0}, \quad U = \frac{u}{\bar{u}}, \quad V = \frac{v}{\varepsilon_0 \bar{u}}, \\ P &= \frac{p}{\rho \bar{u}^2}, \quad H = \frac{h}{h_0}, \quad \varepsilon_0 = \frac{h_0}{l_0}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тут h_0 і $\bar{u} = Q / h_0$ позначають середню товщину плівки й середню по поперечному перерізі плівки швидкість рідини.

Підстановка співвідношень (7), (9) і (10) у вихідні рівняння (1)...(6) призводить до наступного крайового рівняння, сформульованого в безрозмірних змінних:

$$\varepsilon_0 \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) + \varepsilon_0 \frac{\partial P}{\partial X} = \frac{1}{Fr} + \frac{1}{Re} \left(\varepsilon_0^2 \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right), \quad (11)$$

$$\varepsilon_0^2 \left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) + \frac{\partial P}{\partial Y} = \frac{\varepsilon_0}{Re} \left(\varepsilon_0^2 \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right), \quad (12)$$

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0, \quad (13)$$

$$H' = (V / U)_{Y=H}, \quad (14)$$

$$Y = 0, \quad U = V = 0, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} Y = H, \quad P + \frac{\varepsilon_0^2 H''}{We(1 + \varepsilon_0^2 H'^2)^{3/2}} + \frac{2\varepsilon_0}{Re} \frac{1 - \varepsilon_0^2 H'^2}{1 + \varepsilon_0^2 H'^2} \frac{\partial U}{\partial X} \\ + \frac{2\varepsilon_0}{Re} \frac{H'}{1 + \varepsilon_0^2 H'^2} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \varepsilon_0^2 \frac{\partial V}{\partial X} \right) = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

$$Y = H, \quad \frac{\partial U}{\partial Y} + \varepsilon_0^2 \frac{\partial V}{\partial X} - \varepsilon_0^2 \frac{4H'}{1 - \varepsilon_0^2 H'^2} \frac{\partial U}{\partial X} = 0, \quad (17)$$

де: Re , Fr і We – числа Рейнольдса, Фруда і Вебера відповідно:

$$Re = \frac{\bar{u} h_0}{\nu} = \frac{Q}{\nu}, \quad Fr = \frac{\bar{u}^2}{gh_0}, \quad We = \frac{\rho \bar{u}^2 h_0}{\sigma}.$$

Вирішення задачі можна одержати, додаючи до зазначеної системи рівнянь граничні умови при $X=0$ і $X \rightarrow \infty$. Останнє можна уточнити, вирішуючи систему (11)...(17) у нульовому наближенні по ε_0 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} &= -\frac{\text{Re}}{\text{Fr}}, \quad \frac{\partial P}{\partial Y} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0, \\ Y &= 0, \quad U = V = 0, \\ Y &= H, \quad P = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial Y} = 0, \quad H'U - V = 0. \end{aligned}$$

Це рішення виписується безпосередньо:

$$U = \frac{\text{Re}}{\text{Fr}}(Y - Y^2/2), \quad V \equiv 0, \quad P \equiv 0, \quad H \equiv 1. \quad (18)$$

Рівняння (18) справедливе при $X \rightarrow \infty$. Цей профіль швидкості був вперше отриманий Нуссельтом за допомогою пошарового балансу гравітаційних та в'язкісних сил у припущенні постійної товщини плівки. Отриманий результат показує, що рішення Нуссельта є асимптотичним для плівки з вільною поверхнею і що сталість товщини плівки впливає з істинного рішення. Товщина плівки та відношення «поверхнева швидкість/середня швидкість рідини» можуть бути обчислені за витратою:

$$h_0 = \left(\frac{3\nu^2 \text{Re}}{g} \right)^{1/3}, \quad \frac{u_s}{\bar{u}} = \frac{3}{2}.$$

Чисельне рішення системи (11)...(17) показало, що рівняння (18) справедливо, якщо $l_0 \geq \text{Re}h_0$. Експериментальна перевірка цих результатів зазвичай здійснюється виміром поверхневої швидкості, профілю швидкості й товщини плівки. Отримані результати свідчать про задовільне узгодження теоретичних та експериментальних даних [1, 5].

За даними [2, 7] матеріал стінки та її шорсткість не мають істотного впливу на товщину плівки. Проте деякі експерименти [4] вказують на існування залежності товщини плівки від глибини шорсткості. Робилися навіть спроби теоретичного обчислення дотичних напружень за цих умов [6].

Розв'язання задачі (11) - (17) для області $0 \leq x \leq l_0$ може бути також отримано чисельно у наближенні прикордонного шару ($\varepsilon \neq 0$,

$\varepsilon_0^2=0$). Результати показують, що профіль швидкості залежить від відношення a_0/h_0 , і при $x > 100h_0$ досягається профіль Нуссельта.

У деяких теоретичних роботах [2, 3] показано, що швидкість рідини на поверхні при $x < l_0$ не залежить по суті від члена $\partial^2 u / \partial x^2$. Цей висновок підтверджується експериментальними даними для випадку $a=h_0$.

Як відмічалось раніше [6] ламінарний рух плівки звичайно асоціюється з існуванням на поверхні плівки дотичних напружень, що викликані динамічним впливом прилеглої газової фази. При відсутності вимушеного руху газу ці напруження зазвичай не беруться до уваги. Вимушений рух газу істотно впливає на рух плівки. Цей вплив зазвичай враховується в граничній умові рівноваги сил на поверхні газ-рідина (6) через величини p_{nG} і $p_{\tau G}$:

$$p_{nG} = -p_G - 2\mu_G \frac{1-h'^2}{1+h'^2} \frac{\partial u_G}{\partial x} - 2\mu_G \frac{h'}{1+h'^2} \left(\frac{\partial u_G}{\partial y} + \frac{\partial v_G}{\partial x} \right),$$

$$p_{\tau G} = \mu_G \frac{1-h'^2}{1+h'^2} \left(\frac{\partial u_G}{\partial y} + \frac{\partial v_G}{\partial x} \right) - 4\mu_G \frac{h'}{1+h'^2} \frac{\partial u_G}{\partial x}.$$

Цікавим представляється розгляд одночасного руху рідкої плівки мастила й газового потоку в тому випадку, коли останній є турбулентним. Очевидно, що режим руху в одному напрямку характеризується більш слабкою залежністю перепаду тиску від числа Рейнольдса, ніж режим зустрічного руху.

З іншого боку, рух в одному напрямку, очевидно, робить стабілізаційний вплив на двофазний рух. У цьому випадку перепад тиску починає зростати при деякому досить високому значенні числа Рейнольдса. У випадку ж зустрічного руху різке зростання перепаду тиску при певному значенні Re_L призводить в результаті до явища "захливання". Критичне значення Re_G , що відповідає режиму "захливання", зменшується зі зростанням Re_L .

Варто пам'ятати, що наведені характеристики руху рідини, не залишаються такими ж для інших умов руху – іншої геометрії, ширині зазору й т.п. Хоча ясно, що при помірних числах Рейнольдса перепад тиску буде доволі малим як у випадку однакового і зустрічного напрямків руху мастила і газів.

Ця особливість робить перспективу практичного застосування двофазного газо-рідинного плівкового руху досить привабливою, особливо у випадку однакового напрямку, коли проявляється стабілізаційний ефект.

Висновки

Розглянуто хвильові ламінарні режими руху рідини для яких характерно поширення хвиль вздовж плівки з фазовою швидкістю, що перевищує швидкість частинок рідини на поверхні.

Встановлено, що кількість мастила в плівці, що стікає по дзеркалу циліндра під дією сили тяжіння, визначається співвідношенням його ваги, в'язкості й сил, що діють на поверхні розділу газ-рідина.

Отримані аналітичні залежності вказують на той факт, що вимушений рух газу істотно впливає на рух плівки, при цьому однаковий напрямок руху газу й мастила (період руху поршня до н.м.т.) робить на двофазний рух стабілізаційний вплив.

Приведені результати досліджень свідчать про задовільне узгодження теоретичних та експериментальних даних.

Перелік використаних джерел

1. Гусак О. Г., Шарапов С. О., Ратушний О. В. Гідрогазодинаміка: навчальний посібник / Суми: Сумський державний університет. 2022. 296 с.

2. Богач В.М., Парменова Д.Г., Обертюр К.Л. Математична модель руху мастила по дзеркалу циліндра // Суднові енергетичні установки. Вип. 48. Одеса: НУ «ОМА», 2024. С.5-17.

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

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

5. Богач В.М., Шебанов А.М., Довіденко Ю.М., Єлінський І.Е. Вплив газу на рух мастила по дзеркалу циліндра // Суднові енергетичні установки. Вип. 43. Одеса: НУ «ОМА», 2021. С.126-139.

6. Вамболь С.О., Міщенко І.В., Кондратенко О.М. Технічна механіка рідини і газу: підручник. Харків: НУЦЗУ, 2016. 300 с.

7. Дяченко В.Г. Двигуни внутрішнього згоряння. за ред. А. П. Марченка. Харків: НТУ "ХПІ", 2008. 488 с.

10.31653/smf50.2025.15-25

Веретеннік О. М.¹, Сандлер А. К.²¹Національний університет "Одеська морська академія"²Дунайський інститут Національного університету
"Одеська морська академія"

ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ СИСТЕМ УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННОГО ТЕПЛА

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасні суднові енергетичні установки зустрічаються з гострою необхідністю підвищення енергоефективності. Це вимагає не тільки поліпшення тепло-технічних параметрів, але й впровадження більш досконалих систем теплового регулювання. Завдання підвищення надійності та довговічності роботи встаткування також стоїть на першому плані. Ефективне управління тепловими потоками є ключовим чинником у досягненні цих цілей.

Один з найпоширеніших викликів – це виділення надлишкового тепла в процесі роботи різних енергетичних об'єктів. У переважній більшості випадків це тепло є побічним продуктом, не що бере участь у корисній роботі. Напроти, його накопичення приводить до порушення теплових режимів і може привести до ушкодження встаткування. Тому відвід та утилізація надлишкового тепла є критично важливим завданням. В інших випадках, навпаки, необхідно забезпечити підведення тепла до об'єкта для підтримки його працездатності. Складність завдання багаторазово зростає при роботі в екстремальних умовах. До них ставляться, наприклад, мінімальна різниця температур між джерелом тепла й навколишнім середовищем (тепlostоком), жорсткі вимоги до надійності та терміну служби встаткування, а також обмеження по масі й габаритам.

У таких ситуаціях традиційні методи теплообміну виявляються недостатньо ефективними.

Одним з перспективних розв'язків даної проблеми є застосування систем терморегулювання на основі теплопередаючих пристроїв з капілярним прокачуванням теплоносія. Особлива увагу заслуговують теплові труби (ТТ), які являють собою замкнені системи, що працюють по випарно-конденсаційному циклу. В основі принципу роботи лежить капілярний тиск, що забезпечує циркуляцію теплоносія усередині труби без використання зовнішніх насосів. Ключова перевага

ТТ – їх висока ефективна теплопровідність. Відсутність частин, які механічно рухаються, робить їх винятково надійними й довговічними. Вони не споживають додаткової енергії на прокачування теплоносія, що суттєво знижує енергоспоживання всієї системи. Компактність і мала вага ТТ дозволяють використовувати їх в обмежених просторах. На відміну від інших методів теплопередачі, ТТ характеризуються значно більш високою теплопередаючою здатністю і адаптивністю до різноманітних умов експлуатації. Вони демонструють меншу чутливість до зміни орієнтації в просторі в порівнянні з іншими системами.

Найважливішою властивістю ТТ є їхня здатність до саморегулювання. Це означає, що інтенсивність процесів тепло- і масопереносу усередині труби автоматично підбудовується під мінливі зовнішні умови без необхідності зовнішнього управління. Це суттєво спрощує конструкцію й експлуатацію системи. Автоматичне регулювання забезпечує стабільну роботу теплової труби в широкому діапазоні змін зовнішніх факторів. Серед найбільш істотних факторів, що впливають на роботу теплової труби, можна виділити теплове навантаження на випарник та його стабільність, температуру навколишнього середовища, умови охолодження конденсатора, а також орієнтацію пристрою в просторі. Здатність адаптуватися до цих змін робить теплові труби незамінними в різних додатках.

ТТ відкривають широкі перспективи застосування в самих різних областях. Вони особливо ефективні при утилізації низкопотенційного тепла, тобто тепла з низькою температурою, яке звичайно губиться. Крім того, ТТ можуть бути використані для нагрівання й охолодження різних об'єктів, забезпечуючи точний контроль температурного режиму. Можливості використання ТТ постійно розширюються у зв'язку зі зростаючими вимогами до енергоефективності та надійності роботи енергетичних систем і інших технічних об'єктів. Їхнє застосування дозволяє значно вдосконалити теплотехнічні характеристики встаткування, знизити енергоспоживання, підвищити надійність і збільшити термін служби. Це робить ТТ одним з найбільш перспективних напрямків розвитку сучасних технологій терморегулювання. Постійні дослідження й розробки в цій області спрямовані на розширення діапазону робочих температур, підвищення ефективності теплопередачі й створення нових типів ТТ, адаптованих до специфічних умов експлуатації в різних галузях суднової енергетики [1 - 5].

Постановка завдання. Мета дослідження – вдосконалення теплоенергетичного суднового обладнання в напрямку підвищення його енергоефективності, зменшення вартість та габаритів та одночасного збереження простоти та надійності відомих систем.

Викладення матеріалу дослідження. Для пошуків вдосконалення проаналізовані найбільш поширені конструкції ТТ, які застосовуються в енергетиці.

Відомою є ТТ, яка виконана у вигляді окремого металевого корпусу, що відрізняється тим, що в металевий корпус, виконаний з нержавіючої сталі з відшліфованою внутрішньою поверхнею й герметично запаяний по обидва боки, у якості теплопровідника заповнена під вакуумом теплопровідна незамерзаюча рідина етанол або метанол з температурним діапазоном $-40 \dots 150^{\circ}\text{C}$ (рис. 1) [6].

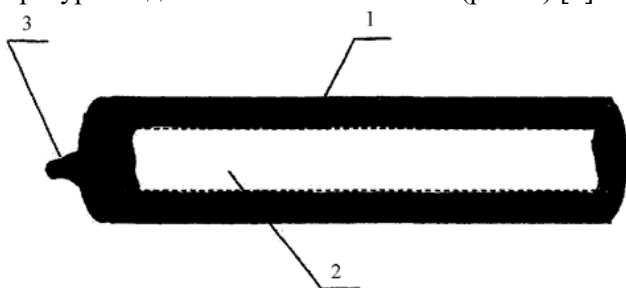


Рис. 1. Теплова труба: 1 – корпус; 2 – незамерзаюча рідина; 3 – місце герметизації

Досвід експлуатації ТТ такої схеми виявив ряд недоліків, які суттєво обмежують потенційні можливості при застосуванні у суднових енергетичних установках:

- використання у якості робочої рідини метанолу – небезпечної для людини речовини;
- відсутність системи "гніт", що знижує рівномірність розігріву труби по зонах;
- порушення режиму теплопередачі на перехідних неусталених режимах роботи первинного джерела теплоти.

Найбільш вільною від перелічених недоліків є тепла труба, яка складається з робочого корпуса з полірованою внутрішньою поверхнею, яка відрізняється тим, що система капілярних каналів виконана у вигляді перфорованої отворами пластини, що має ширину більше довжини діаметра отвору корпуса, і пластина розташована в корпусі,

у перетині поперек довжини корпусу, у серповидном виді. Причому кінці пластини щільно прилягають до стінок корпусу й мають кут між стінкою корпусу та пластини до 1° , а корпус має з одного кінця загальну заглушку в нероз'ємнім з'єднанні, а с іншої сторони корпусу розташований клапан у вигляді гвинтової пари для заливання рідини. До складу зазначеної рідини входять: етиловий ефір – 20%, етиловий технічний спирт – 60%, ацетон – 20% [7].

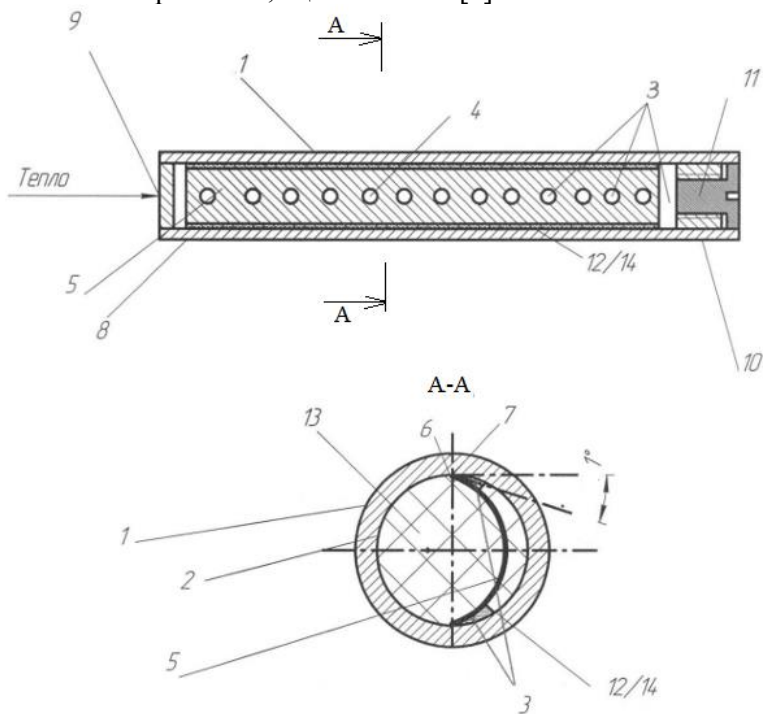


Рис. 2. Теплова труба з пластиною: 1 – корпус 2 – внутрішня поверхня; 3 – капілярний канал 4 – отвір 5 – пластина 6 – кінець пластини 7 – стінка 8 – один кінець 9 – заглушка 10 – інша сторона корпусу 11 – клапан 12 – рідина 13 – пара 14 – конденсат

В умовах застосування у суднових енергетичних установках, які характеризуються великою кількістю теплових неусталених перехідних процесів, зазначена конструкція не завжди дозволяє ефективно застосовувати її у системах глибокої утилізації тепла. Це обумовлено такими факторами як:

використанням у якості компонента робочої рідини ацетону – пожежонебезпечної речовини;

порушенням режиму теплопередачі на перехідних неусталених режимах роботи первинного джерела теплоти.

У реаліях, що склалися, доцільним та актуальним є створення теплової труби з підтримкою стабільності режиму теплопередачі на перехідних неусталених режимах роботи зовнішнього джерела теплоти.

Поставлена задача вирішується тим, що теплова труба з акумулюванням теплоти, що складається з робочого корпусу з полірованою внутрішньою поверхнею, системи капілярних каналів, виконаної у вигляді перфорованої отворами пластини, розташованої у перетині поперек довжини корпусу з кінцями, які щільно прилягають до стінок корпусу та мають кут між стінкою корпусу й пластини до 1° , та яка має ширину більше довжини діаметра отвору корпусу, загальної заглушки та клапана.

Основна відмінність запропонованої конструкції полягає у тому, що навколо робочого корпусу, коаксіально до нього, розташований вторинний корпус, а у зазорі між робочим та вторинним корпусом містяться мідна сітка та термоакумулюючий матеріал на основі фазового переходу, у якості робочої рідини у робочому корпусі застосовано рідину з низькою температурою кипіння флуорінол-85, робочий та вторинний корпуси обладнані мідними заглушками, а зазор між корпусами обладнано клапаном для поповнення термоакумулюючого матеріалу.

Суть схемотехнічного рішення пояснюється кресленням (рис. 3).

ТТ складається з робочого корпусу 1 з полірованою внутрішньою поверхнею та вторинного корпусу 2, які сполучені загальною заглушкою 5. Окрім того, протилежні кінці робочого та вторинного корпусів обладнано мідними заглушками 3 та 4 відповідно. У робочому корпусі міститься система капілярних каналів, яка виконана у вигляді перфорованої отворами пластини 8, що має ширину більше діаметра отвору робочого корпусу (рис. 4), розташованої у перетині поперек довжини корпусу, у серповидному вигляді, причому кінці пластини щільно прилягають до стінок робочого корпусу і мають кут між стінкою робочого корпусу і пластини в межах до 1° градуса.

У місці сполучення перфорованої отворами пластини і робочого корпусу утворюється капілярний канал 11. Робочий та вторинний корпуси мають клапани 6 та 7 відповідно для поповнення робочої

рідини 12 з низькою температурою кипіння та термоакумулюючого матеріалу 10 на основі фазового переходу.

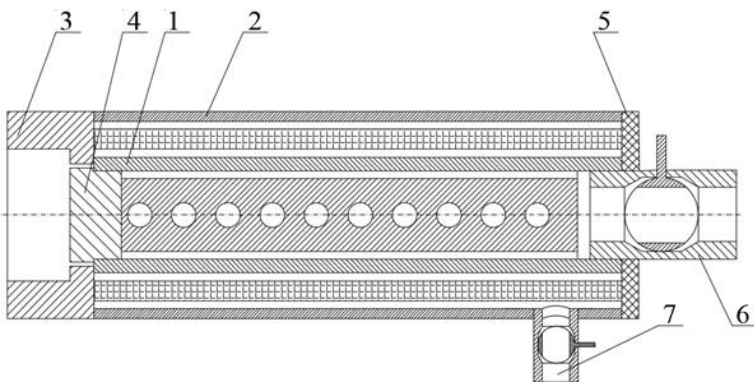


Рис. 3. Теплова труба з акумулюванням теплоти: 1 – робочий корпус; 2 – вторинний корпус; 3 – мідна заглушка вторинного корпусу; 4 – мідна заглушка робочого корпусу; 5 – загальна заглушка теплової труби; 6 – клапан поповнення робочої рідини; 7 – клапан поповнення рідини з низькою температурою кипіння

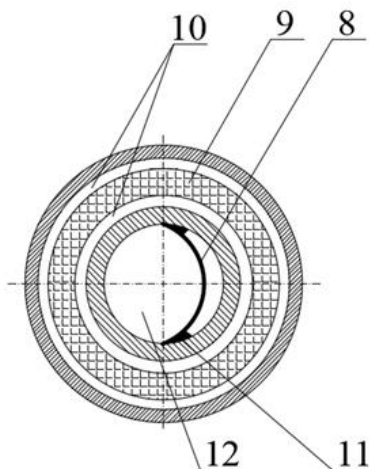


Рис. 4. Теплова труба з акумулюванням теплоти: 8 – перфорована отворами пластина; 9 – мідна сітка; 10 – термоакумулюючий матеріал на основі фазового переходу; 11 – капілярний канал; 12 – рідина з низькою температурою кипіння

У зазорі між робочим та вторинним корпусами міститься мідна сітка 9.

У статичному режимі з зовнішнім джерелом тепла сполучена тільки мідна заглушка вторинного корпусу. Таким чином тепло сприяє підтримці у робочому стані термоакумуляючого матеріалу на основі фазового переходу. Мідна сітка застосовується для протидії осаджування матеріалу у нижній частині вторинного корпусу.

У динамічному режимі з зовнішнім джерелом тепла сполучається мідна заглушка робочого корпусу та відбувається випар робочої рідини з низькою температурою кипіння. Ця пара переміщається по робочому корпусу і конденсується на холодній частині корпусу. Відбувається виділення теплової енергії. Щільно притиснуті кінці серповидно зігнутої перфорованої отворами пластини до стінки корпусу з кутом менше 1 градуса створюють, як мінімум, два капілярні канали, по яких конденсат переміщається в зону нагрівання. Її склад забезпечує екологічну безпеку, більш низький по температурі початок кипіння рідини, чим у відомих аналогів. Вторинний корпус з розігрітим термоакумуляючим матеріалом на основі фазового переходу використовується як демпфер коливань температурного режиму зовнішнього джерела тепла [8 - 10].

У той же час існує критична проблема контролю технічного стану ТТ, які експлуатуються у агресивному морському середовищі. Це середовище, у комбінації зі специфічними характеристиками самого встаткування, приводить до поступового накопичення незворотних дефектів. Комплексі дефектів, якщо його вчасно не виявити та не усунути, може привести до виходу з ладу енергетичного встаткування судна, що, у свою чергу, чревате катастрофами і загрожує безпеці судноплавства.

Сучасні підходи до експлуатації технічних систем, такі як концепція "експлуатації до передвідмовного стану", вимагають точної й своєчасної діагностики. Ця концепція припускає прогнозування технічного стану встаткування на основі виявлення дефектів і ушкоджень, ще на початковій стадії їх розвитку. Однак, практична реалізація подібної концепції сполучена із про значними труднощами. Вона вимагає впровадження новітніх, високоефективних, зручних у використанні автоматизованих засобів технічної діагностики й прогнозування. Процедури діагностування при цьому суттєво ускладнюються.

Існуючі системи діагностики ТТ зустрічаються із серйозними проблемами, обумовленими специфікою морської експлуатації. Потужне, компактно розташоване суднове енергетичне встаткування створює інтенсивні вібрації та потужні термічні поля, які значно спотворюють результати діагностики й перешкоджають її ефективному проведенню. Ці дестабілізуючі фактори знижують точність вимірів і утрудняють прогнозування технічного стану. Таким чином, засоби, що існують, не завжди відповідають сучасним вимогам експлуатації, та не забезпечують необхідної точності й надійності прогнозів.

Аналіз існуючих рішень показує гостру необхідність у розробці нових засобів діагностики й прогнозування, здатних працювати в умовах екстремальних навантажень і не підданих впливу дестабілізуючих факторів. Оптимальним варіантом у цій ситуації представляється використання волоконно-оптичних вимірювальних пристроїв. Волоконній оптиці притаманний ряд переваг, таких як висока стійкість до електромагнітних перешкод, вібрацій і екстремальним температурам. Це робить її ідеальним інструментом для діагностики ТТ в умовах суднової енергетики. Впровадження волоконно-оптичних датчиків у комбінації з удосконаленими алгоритмами обробки даних може значно підвищити ефективність діагностики. Застосування принципів часткової інваріантності дозволить мінімізувати вплив дестабілізуючих факторів на результати вимірювань, забезпечуючи більш точний і надійний прогноз технічного стану. Це, у свою чергу, дозволить перейти до більш ефективного планування технічного обслуговування, скоротивши число аварійних ситуацій і підвищивши загальну надійність і ефективність експлуатації ТТ.

Таким чином, рішення проблеми зводиться до розробки й впровадженню інтегрованої системи діагностики, заснованої на волоконно-оптичних технологіях [12 - 20].

Ця система здатна надійно працювати в жорстких умовах морської експлуатації. Впровадження волоконно-оптичної інформаційно-вимірювальної системи дозволить перейти до принципів превентивної діагностики, вчасно виявляючи потенційні несправності і запобігати аварійним ситуаціям, тим самим гарантуючи безпеку судноплавства та ефективність використання ТТ протягом усього її життєвого циклу. Це забезпечить не тільки економію ресурсів за рахунок зниження числа позапланових ремонтів, але й приведе до істотного підвищення рівня безпеки й енергоефективності суден.

Пристрій є простим у виготовленні та застосуванні, бо для його створення застосовуються освоєні промисловістю компоненти та елементи. Техніко-економічні показники значно вище прототипу, тому що дотримуються екологічні норми й не потрібні додаткові засоби захисту від витоків рідини та втрати тепла [11].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Технічний результат досягається завдяки тому, що застосування вторинного корпусу з термоакумулюючим матеріалом та робочою рідиною з низькою температурою кипіння забезпечить:

- можливість стабільності режиму теплопередачі на перехідних неусталених режимах роботи первинного джерела теплоти;
- можливість застосування низькопотенційних джерел теплоти;
- підвищену захищеність елементів;
- високий рівень швидкодії.

Перелік використаних джерел

1. Веретеннік О. М., Сандлер А. К. Технічне діагностування об'єктів суднових енергетичних установок: довідник. Одеса: Фенікс, 2019. 167 с.

2. Дмитрин В. И., Майданик Ю. Ф., Чернышѐва М. А. Контурная тепловая труба с бинарным теплоносителем // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5, № 3. С. 131-135.

3. 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. Одеса: НУ "ОМА". 2019. С. 27 – 33. [dx.doi.org/10.31653/2706-7874](https://doi.org/10.31653/2706-7874).

4. Косторнов А. Г., Шаповал А. А., Мороз А. Л., Фролов Г. А., Шаповал И. В. Тепловые трубы с капиллярными структурами на основе композиционных градиентных материалов для теплообменных систем космического и авиационного назначения // Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15, № 2. С. 69 - 79.

5. Сандлер А. К. Застосування альтернативних скломатеріалів для датчиків деформації та вібрації елементів пропульсивного комплексу. Автоматизація суднових технічних засобів. 2023. Вып. 28. Одеса: НУ "ОМА". С. 79 – 89. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-79-89.

6. Патент України № 146258. МПК (2006) G01M 11/08 (2006.01), G02B 6/00. Волоконно-оптичний датчик зношування. А.К. Сандлер,

М.О. Опришко, Г.О. Кузнецова. заявник та володар патенту Національний університет "Одеська морська академія". u202005716. заявл. 04.09.2020. опубл. 03.02.2021. бюл. № 5/2021. 3 с.

7. Патент України № 78611, МПК (2011) G01M 11/02 (2006.1). Волоконно-оптичний газоаналізатор. Заявники та володарі патенту: Сандлер А.К., Цюпко Ю.М. u201210906. заявл. 18.09.2012. опубл. 25.03.2013, бюл. № 6. 3 с.

8. Сандлер А. К., Бондаренко А. В. Системи глибокої утилізації тепла – альтернативний шлях вдосконалення // Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, Cambridge, May 9, 2025. Cambridge-Vinnitsia: P.C. 2025. P. 269 - 276. DOI 10.36074/logos-09.05.2025.055.

9. Sandler A., Budashko V. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. №. 5 (119). P. 25 - 33.

10. Jain M. I., Demirgian J. C., Cole R. L. Organic Rankine-Cycle Power Systems Working Fluids Study: Topical Report No, 1 – Fluorinol 85. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1097062>.

11. Сандлер А. К., Шестопапов К. О., Єрін В. О. Глибока утилізація вторинних енергоресурсів суднових компресорних установок // Суднові енергетичні установки. 2023. Вип. 47. Одеса: НУОМА. – С. 191-196. DOI: 10.31653/smf47.2023. 191 - 196.

12. 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, 2021. 20 с.

13. Данчук Д. П., Долманжи 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. Одеса: НУ "ОМА". 2022. С. 160 - 164. DOI: 10.31653/2706-7874.SEEEA-2022.11.1-203.

14. Сандлер А. К., Будашко В. В., Карпілов О. Ю. Волоконно-оптичний засіб визначення теплоти згоряння газу який застосовується в суднових енергетичних установках // Automation of Technological

and Business Processes. 2025. № 17 (1). P. 53 - 59. DOI <https://doi.org/10.15673/atbp.v17i1.3019>.

15. Сандлер А. К., Макарьчук Є. В. Схемотехнічне рішення високотемпературного датчику тиску // XI міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 23.11.2021 - 24.11.2021 р. Одеса: НУ"ОМА". 2021. С. 90 - 194. DOI: 10.31653/2706-7874.SEEEA-2021.11.1-238.

16. Сандлер А. К., Опрышко М. О. Волоконно-оптический датчик контроля состояния технических жидкостей и газов // X міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 24.11.2020 - 25.11.2020 р. Одеса: НУ "ОМА". 2020. С. 63 - 68. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2020.11.1-245.

17. Sandler A., Budashko V., Khniunin S., Bogach V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 5. №. 5(125). P. 24 – 31. DOI: 10.15587/1729-4061. 2023. 289773.

18. Сандлер А. К., Сандлер А. А. Волоконно-оптический датчик давления для высокотемпературных систем топливоподготовки // Судовые энергетические установки. 2009. Вып. 23. Одесса: ОНМА. С. 17 - 22.

19. Сандлер А. К., Батинський А. І. Волоконно-оптичний пристрій контролю рівня для високотемпературних систем паливопідготовки // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2020. Т. 12, №. 2. Одеса: ОНАХТ. С. 9 - 13.

20. Сандлер А. К., Логишев И. В. Разработка волоконно-оптических устройств для систем контроля и управления СЭУ // Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. Одеса: ОНМА. 2012. С. 19 - 22.

10.31653/smf50.2025.26-41

Голіков В.А., Данилов К.С., Шумілова К.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

**ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНТЕЙНЕРОВИЗІВ НА
МІЖКОНТИНЕНТАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ****Постановка проблеми в загальному вигляді.**

Система Silverstream® – це система повітряного змащення. Вона складається з комплексу компресорів, які подають повітря до набору блоків випуску повітря (ARU), зазвичай встановлених у плоскому низу корпусу через трубопровідну мережу з дистанційно керованими клапанами. Вимоги до повітряного потоку блоків ARU залежать від осадки та швидкості судна. Тиск, який повітря має подолати, приблизно дорівнює гідростатичному тиску води під корпусом, з додатковим запасом для подолання втрат на тертя в трубопровідній системі. Система Silverstream® налаштована на автоматичний запуск, коли судно досягає специфічної мінімальної швидкості, за якої її застосування є вигідним. Система автоматично зупиняється, як тільки швидкість падає нижче цього порогу.

Запит практики: необхідність оптимізації руху судна для зниження загального опору корпусу, зменшення потужності енергетичної установки (ЕУ) та підтримання заданої швидкості на маршруті для безпечного керування судном.

Об'єкт дослідження – процес руху судна морськими шляхами.

Предмет дослідження – параметри руху судна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Ефективність використання технології повітряного змащення Silverstream підтверджено такими відомими компаніями, як Grimaldi Group, Carnival Corporation, а також Shell Trading, які повідомляють про скорочення викидів, витрат на паливо та енергоефективність флоту [1].

Система Silverstream змінює взаємодію між хвилею та судном і створює килим з мікро-пухирців, який покриває днище судна, в результаті чого зменшується опір тертя, що значно знижує витрату палива та пов'язані з цим викиди. Таке інноваційне рішення використовує силу повітря [2].

В джерелі [3] представлено унікальні особливості системи повітряного змащення, а саме: 5-10% чистої економії палива та викидів; зниження опору тертя (плоского дна); зсув рідини (унікальна особливість); зниження потужності валу + збільшення швидкості судна; паливо-агностичне рішення (економія енергії незалежно від типу палива); проста установка; нове будівництво та модернізація в звичайному сухому доці; міцні та елегантні (в т.ч. запатентовані ARU); управління та автоматизація в залежності від швидкості судна/осадки.

Актуальність проблеми скорочення викидів парникових газів розглянуто в дослідженні [4]. Проаналізовано потенційну економію енергії завдяки застосуванню технології повітряного змащення на торгових судах. В роботі запропоновано спрощену емпіричну модель, яка охоплює три різні технології повітряного змащення, на основі експериментальних результатів і припущень, прийнятих в існуючих дослідженнях. Зазначено, що площа поверхні днища судна, покрита повітрям, важлива для ефективності системи повітряного змащення, згідно з аналізом чутливості.

Розробка суден з повітряним змащенням для скорочення викидів парникових газів, економії витрат на пальне, за рахунок зниження опору тертя, пов'язана з високими цінами на нафту і глобальним потеплінням [5]. В великому водному тунелі SSMB було експериментально досліджено зниження опору тертя завдяки повітряному змащенню з повітряними шарами, генерованими на нижній поверхні плоскої пластини; вимірювались зміни локального опору тертя за різних витрат повітря, що нагнітається. Результати показали, що повітряне мастило з повітряними шарами може бути корисним для зниження опору тертя за певних умов нагнітання повітря. Також були проведені випробування опору і самохідності для балкера 66 тис. DWT в буксирувальному танкері SSMB для оцінки очікуваної чистої економії енергії.

Відповідно до вимог, встановлених Міжнародною морською організацією (ІМО) щодо нульового чистого викиду газів в атмосферу з морських суден до 2050 року в джерелі [6] розглянуто один з перспективних методів підвищення ефективності суден – впорскування повітря, який створює мастильну плівку між корпусом і водою, знижуючи загальний опір. У дослідженні використовувалося програмне забезпечення OpenFOAM для аналізу методу впорскування повітря в корпусі Duisburg Test Case (DTC), контейнеровоза в масштабі 1:59.

Оптимальна конфігурація досягла 14,13% чистої економії енергії, тоді як найгірша конфігурація замість цього збільшила споживання енергії. Дисперсійний аналіз (ANOVA) підтвердив зв'язок між параметрами та ефективністю, а результати показали важливість коригування параметрів методу.

Зниження опору тертя шляхом впорскування повітря в роботі [7] зосереджено на судні внутрішнього плавання, яке випробовували як у масштабі моделі, так і в натуральну величину, з повітряним мастилом та без нього. В дослідженні не було виявлено помітного впливу повітряно-бульбашкового змащення під час випробувань опору тертя ні в модельному варіанті, ні в натуральну величину, і не вдалося визначити істотного впливу повітряно-бульбашкового змащення на випробування маневреності та морехідності моделі.

Натепер, незважаючи на ефективність процесу впорскування повітря, спостерігається відсутність досліджень, що визначають кореляцію між ключовими параметрами (товщина повітряного шару, кут впорскування, швидкість судна та координати на етапі планування маршруту). Тому дане дослідження спрямоване на пошук методу оптимізації руху судна з урахуванням шляхових обмежень для підвищення енергоефективності флоту.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Метою дослідження є підвищення інформаційного забезпечення процесу управління судном на маршруті під дією зовнішніх збурень шляхом включення до складу системи управління навігаційних пристроїв для оперативного розрахунку параметрів руху судна.

Наукова гіпотеза – гарантовано точне та безпечне управління на маршруті досягається динамічним позиціонуванням судна на лінії шляху у просторі та площині засобами активного управління при наявності збурень й шляхових обмежень.

Робочі гіпотези наукового дослідження:

завантаження та стискання вхідних навігаційних даних у скалярній та векторній формах для автоматичної обробки досягається при активній участі людини;

графоаналітична ідентифікація процесів судноводіння досягається з урахуванням внутрішніх та зовнішніх впливів;

логістична формалізація законів стабілізації судна досягається при широтному відхиленні від заданого курсу на площині.

Наукове положення: безпека процесу управління судном на маршруті забезпечується розробкою та застосуванням інноваційних

підходів до оптимізації руху судна. Це охоплює вивчення та аналіз елементів руху на різних етапах плавання, включаючи планування маршруту, обсервацію та зміну швидкості. Шляхом розробки алгоритмів стабілізації та вибору оптимальної швидкості з урахуванням різних факторів, таких як збурення та шляхові обмеження, забезпечується ефективне та безпечне керування судном.

Наукова значимість: розширення теоретичного та методологічного розуміння прямолінійного поступального рівномірного руху судна та його впливу на сучасне морське транспортне сполучення.

Практична цінність: можливість використання розробленого алгоритму для оптимізації маршрутів судноплавства, підвищення точності прогнозування руху суден та зменшення ризику аварійної ситуації на морі. Це сприяє підвищенню ефективності та безпеки морських перевезень, що є критичним для розвитку та функціонування світової торгівлі та економіки.

Методи дослідження: в дослідженні використано методику графо-аналітичного розрахунку початкових параметрів руху судна на основі застосування векторного аналізу з візуалізацією на картографічній основі; способи динамічного вибору оптимальної швидкості ходу судна та стабілізації руху судна із застосуванням системного (комплексного) підходу до врахування впливу факторів навколишнього середовища на процес судноводіння.

Питання, які розглядаються в дослідженні наступні:

- Як працює система?
- Як безпечно експлуатувати установку в нормальних умовах роботи?
- Вимоги з обслуговування.

Згідно з технологією система Silverstream® створює «килимок» з мікро-бульбашок по всій площі плоского днища судна. Цей килимок з мікро-бульбашок значно зменшує опір тертя цієї частини корпусу.

Внаслідок зниження загального опору корпусу зменшується потужність валу ЕУ, необхідна для підтримання заданої швидкості у порівнянні з тими ж умовами експлуатації судна, коли система Silverstream® не працює.

Чисте зниження споживання енергії (тобто зменшення потужності валу ЕУ, яке компенсується додатковою допоміжною потужністю, потрібною для роботи системи Silverstream®) веде до зменшення споживання палива та загальної потужності в кіловатах, що в

свою чергу дозволяє знизити експлуатаційні енергетичні витрати та кількість шкідливих викидів [8].

Система Silverstream® складається з наступних основних компонентів, які можуть відрізнятися за кількістю та конфігурацією, залежно від конкретної установки:

- ARU (блоки випуску повітря), інтегровані в нижню обшивку корпусу.

- Компресори з інтегрованими приводами з регульованою швидкістю (VSD).

- Керуюча шафа, розташована в компресорній кімнаті, з можливістю підключення віддалених робочих місць та відповідною кабельною системою.

- Повітряний розподільчий трубопровід, клапани ALS та Y-образні з'єднання (рис. 1). Далі наведено опис основних апаратних компонентів системи Silverstream®.

Робота системи полягає у наступному: після увімкнення системи Silverstream® її стан відображається за допомогою візуальних інтерфейсів (mimics) на доступних робочих місцях (рис. 2).

Стан системи характеризується наступним чином:

1. **Вимкнено (Powered Off):** коли живлення CMS відключено, реле безпеки у шафі CMS забезпечує аварійну зупинку всіх компресорів, а клапани ALS не можуть бути відчинені дистанційно.

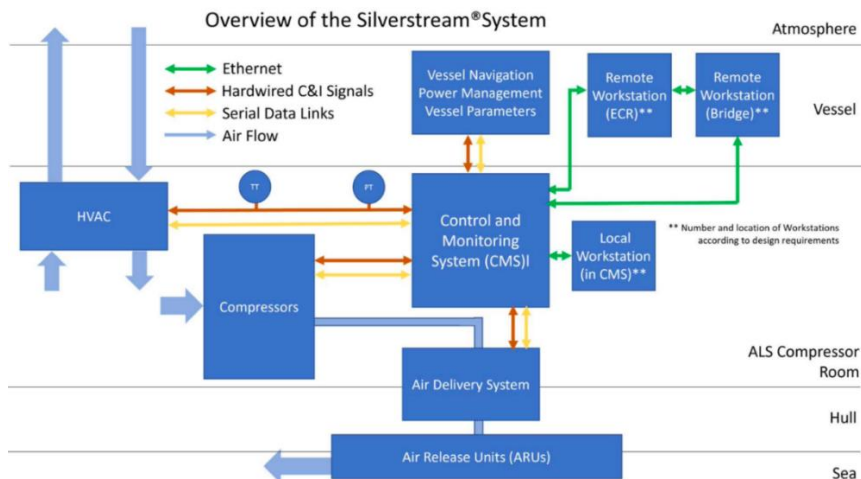


Рис. 1. Структурна система ALS Silverstream®

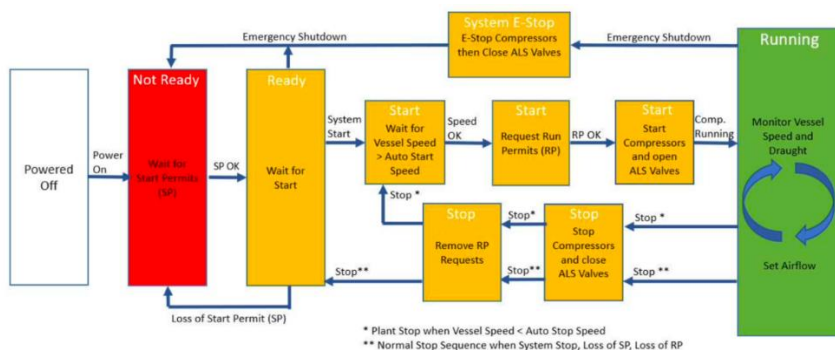


Рис. 2. Функціональна схема системи

2. **Не готово (Not Ready):** система увімкнена, але не може працювати, поки не виконані всі вимоги для старту (StartPermits), наприклад, поки не скасовано всі умови аварійної зупинки (E-Stops).

3. **Система готова (System Ready):** всі вимоги для старту (SP) виконані, але установка не буде запущена, поки на одному з робочих місць керування не буде натиснуто кнопку «Старт».

4. **Запуск системи (System Start):** після натискання кнопки «Старт» або отримання команди на запуск від віддаленої системи керування (наприклад, IAS) система переходить у звичайну послідовність запуску. Система очікує, поки швидкість судна не перевищить поріг автоматичного запуску. Після цього CMS запитує дозволу на роботу (RunPermits) від відповідних систем (PMS та HVAC). Після отримання цих дозволів компресори запускаються згідно з послідовністю запуску, тобто компресори запускаються парами з інтервалами у 10 секунд, щоб не перевантажувати систему живлення або систему керування клапанами, а клапани ALS відкриваються.

5. **Система працює (System Running):** після запуску компресорів і відкриття клапанів ALS система регулює подачу повітря відповідно до осадки та швидкості судна.

6. **Автоматична зупинка (Auto Stop):** звичайна зупинка може статися, коли швидкість судна опускається нижче порогу автоматичної зупинки, а кнопка «Стоп» не натиснута. У цьому випадку система зупиняється згідно з описаною послідовністю, і вона чекатиме на підвищення швидкості вище порогу автоматичного запуску, після чого система знову запуститься.

7. **Зупинка системи (System Stop):** під час звичайної зупинки установка вимикається, якщо:

- 1) натиснуто кнопку «Стоп» або отримано команду на зупинку від віддаленої системи керування (наприклад, IAS);
- 2) втрачається принаймні один дозвіл на старт;
- 3) втрачається принаймні один дозвіл на роботу.

8. **Аварійне відключення системи (System Emergency Shutdown):** при активації аварійного відключення активуються контури аварійної зупинки компресорів (E-Stop), клапани ALS закриваються, і система переводиться у стан «Не готово». Після усунення аварійної ситуації систему необхідно знову запустити згідно із звичайною процедурою (кроки 1-5).

Експериментальне випробування системи повітряного змащення проведено під час плавання у січні 2024 року на контейнеровозі «MSC ANITA» (16616 TEU) з характеристиками: довжина (L_{OA}) – 365,98 м; ширина (B) – 51 м; висота (D) – 72,5 м; осадка у вантажі (d) – 14,5/17,0 м; водотоннажність (Δ) – 131215 т / 171251 т; головний двигун (WINGO 9x92B, LLT, Tier III HR SCR) – 45300kWx72RPM; гвинт фіксованого кроку типу CPP діаметром (D_p) – 9,736 м; швидкість ходи (v) – 22 вузли.

Для оцінки ефекту енергозбереження в процесі обслуговування ALS здійснено випробування швидкості судна при різних режимах подачі повітря. Розрахунок витрати повітря (1) проводився з використанням еквівалентної товщини повітряного шару за наступною формулою [9, 10]:

$$t(b) = Q_{(a)} / B_{(a)} \cdot v \cdot 10^3, \quad (1)$$

де $t(b)$ – еквівалентна товщина повітряного шару на днищі судна, мм; $Q_{(a)}$ – витрата повітря, м³/с; $B_{(a)}$ – ширина області, покритої бульбашками, м; v – швидкість судна відносно води, м/с.

Розрахунки та результати випробувань показали, що ефективність енергозбереження, отримана за допомогою повітряного змащення в залежності від повітряного шару від 3-х до 8-ми мм лінійно підвищується від 8% до 12 %. Причому, умови лінійності спостерігаються у зв'язку зі збільшенням потужності споживання

повітряних компресорів та зниженням потужності головного двигуна судна.

Нормування остійності.

Встановлення норм, яким повинна відповідати остійність судна для забезпечення достатнього ступеня безпеки його експлуатації, перш за все у відношенні перекидання, є однією з вузлових проблем остійності.

Для оцінки здібності судна протистояти одночасному впливу на нього хвилювання та вітру розглядається ***критерій погоди***, який відображає умови неперекидання судна, що відчуває хитавицю на хвилюванні, при динамічному впливі вітру, прикладеного в момент найбільшого накреслення судна на підвітряний борт [11]. Такий випадок впливу шквалу є найбільш небезпечним. Умови неперекидання судна буде виконано, якщо кренувальний момент від вітру M_v буде не більше, ніж момент, що перекидає $M_c = g \cdot D \cdot l_c$.

Чисельне значення критерія погоди (2) виражається відношенням:

$$K = \frac{M_c}{M_v}. \quad (2)$$

Остійність судна вважається достатньою, якщо $K \geq 1$ при найгірших у відношенні остійності варіантах навантаження.

Розрахунок моменту (3), який кренить судно від тиску вітру за Правилами Регістра здійснюється за формулою [11]:

$$M_v = 0,001 \cdot \rho_v \cdot A_v \cdot z, \quad (3)$$

де ρ_v – тиск вітру в Па, приймається за табл. 1, в залежності від району плавання судна і плеча парусності; A_v – площа парусності, m^2 ; z – плече парусності, визначається як відстань в метрах від центру парусності до площини діючої ватерлінії в прямому положенні судна.

$$\rho_v = 708 \cdot z^{0,28} \text{ при } \delta_{\max} \leq 1\%,$$

де $\delta_{\max}$ – максимальний коефіцієнт повноти водотоннажності.

При проміжних значеннях тиск z визначається лінійною інтерполяцією. Для суден з обмеженим районом плавання тиск вітру прий-

мається: для суден з обмеженням $\delta = 0,567$ від вказаного в таблиці 1. Детально обмеження районів плавання визначені в Правилах Регістра, частина 1, «Класифікація».

Таблиця 1. Тиск вітру для суден необмеженого плавання

z , м	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0 та більше
ρ_v , Па	708	793	859	915	963	1005	1049	1079	1111	1141	1169	1196	2221

При розрахунку площі A_v до неї включається вся площа проекції на діаметральну площину бокового виду судна, розташована вище ватерлінії, зі всіма пристроями та палубним вантажом. Несуцільні площі (рангоут, такелаж, леєра та ін.) враховуються або з коефіцієнтом, або з загальною відсотковою надбавкою, які приведені в Правилах. Якщо площа парусності та її статичний момент відносно площини ватерлінії відомі для мінімальної та літньої осадок, то їх значення для проміжних осадок допускається визначати лінійною інтерполяцією. Якщо площа та плече парусності відомі тільки для однієї осадки, то для інших вони можуть бути визначені перерахунком. Нехай A і z – площа і плече парусності при осадці T , тоді для осадки $T_1 = T + \delta T$ відповідні значення A (4) та z_1 (5) визначаються за формулами [11]:

$$A_1 = A - L_{cp} \cdot \delta T; \quad (4)$$

$$z_1 = \frac{A \cdot (z - \delta T) + 0,5 L_{cp} \cdot (\delta T)^2}{A_1}, \quad (5)$$

δT – зміна середньої осадки; L_{cp} – середня довжина судна між довжинами для осадок T і T_1 .

Для визначення найбільшого динамічного кренувального моменту (6), що витримується судном при хитавиці (за термінологією Регістра – найменшого моменту, що перекидає), амплітуду хитавиці судна без врахування впливу скулових кілей Регістр задає за формулою [11]:

$$\theta_{1r} = X_1 \cdot X_2 \cdot Y. \quad (6)$$

Безрозмірний множник X_1 приймається за табл. 2 в залежності від відношення ширини судна B до осадки T .

$$X_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{при } B/T \leq 2,4; \\ 1,437 - 0,182 \cdot B/T & \text{при } 2,4 < B/T < 2,5; \\ 0,8 & \text{при } B/T \geq 3,5. \end{cases}$$

Таблиця 2. Множник X_1

B/T	2,4 та менше	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5 та більше
x_1	1,0	0,98	0,96	0,95	0,93	0,91	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80

Безрозмірний множник X_2 приймається за табл. 3 в залежності від коефіцієнта загальної повноти судна δ .

Таблиця 3. Множник X_2

δ	0,45 та менше	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7 та більше
X_2	0,75	0,82	0,89	0,95	0,97	1,0

$$X_2 = \begin{cases} 0,75 & \text{при } \delta \leq 0,45; \\ 1,33 \cdot \delta + 0,1521 & \text{при } \delta < 0,6; \\ 0,5 \cdot \delta + 0,65 & \text{при } 0,6 \leq \delta \leq 0,7 \\ 1,0 & \text{при } \delta > 0,7. \end{cases}$$

Множник Y (градуси) приймається за табл. 4 в залежності від району плавання судна та відношення $\sqrt{\frac{h_0}{B}}$.

Необмежений
район
плавання

$$Y_1 = \begin{cases} 24 & \text{при } X \leq 0,04; \\ 973,15 \cdot X (1 + 19,34 \cdot X) & \text{при } 0,9 < X \leq 0,13; \\ 36 & \text{при } X > 0,13. \end{cases}$$

Обмежений
район
плавання

$$Y_2 = \begin{cases} 16 \text{ при } X \leq 0,04; \\ 70,58 + 17,97 \cdot \ln X \text{ при } 0,04 < X \leq 0,1; \\ 56,8 + 12 \cdot \ln X \text{ при } 0,01 < X < 0,13; \\ 32 \text{ при } X > 0,13. \end{cases}$$

Таблиця 4. Множник Y

Район плавання судна	$\sqrt{h_0} / B$									
	0,04 та менше	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13 та більше
Необмежений	24,0	25,0	27,0	29,0	30,7	32,0	33,4	34,4	35,3	36,0
Обмежений I та II	16,0	17,0	19,7	22,8	25,4	27,6	29,2	30,5	31,4	32,0

При проміжних значеннях аргументів таблиць множники визначаються лінійною інтерполяцією.

Якщо судно має скулові кілі, амплітуда хитавиці (7) визначається за формулою [11]:

$$\theta_{2r} = \kappa_1 \cdot \theta_{1r}, \quad (7)$$

де κ приймається за табл. 5 в залежності від відношення $A_k / L \cdot B$,

де A_k – сумарна габаритна площа скулових кілей в м².

Таблиця 5. Коефіцієнт κ

$A_k/LB, \%$	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0 та більше
κ	1,00	0,98	0,95	0,88	0,79	0,74	0,72	0,70

$$\kappa = \begin{cases} 1 - 0,0157 \cdot (X - 1) \cdot X^2 \text{ при } X \leq 2,2; \\ 0,7 + 0,04 \cdot (4 - X)^2 \text{ при } 2,2 < X \leq 4; \\ 0,7 \text{ при } X > 4. \end{cases}$$

Діаграма статичної остійності.

У відношенні елементів діаграми статичної остійності визначено наступні вимоги:

1) максимальне плече $l_{\max}$ повинно бути не менше 0,25 м для суден довжиною $L \leq 80$ м і не менше 0,20 для суден довжиною

$L \leq 105$ м, а для проміжних довжин визначається лінійною інтерполяцією;

- 2) кут максимуму діаграми θ_m повинен бути не менше 30° ;
- 3) кут нахилу діаграми θ_y повинен бути не менше 60° .

Врахування обмерзання.

Для суден, плаваючих в зимовий час та в зимових сезонних зонах, Правила Регістра вимагають виконувати перевірку остійності з врахуванням обмерзання. При розрахунку повинно враховуватись збільшення водотоннажності, підвищення центру тяжіння та площі парусності. Розрахунок остійності при обмерзанні здійснюється для найгіршого у відношенні остійності розрахункового варіанта навантаження.

Маса льоду на квадратний метр площі парусності приймається 15 кг, площа та піднесення центру парусності при цьому визначаються для осадки $T_{\min}$. В інших районах зимової сезонної зони, а також для суден, плаваючих в зимовий час в районах Чорного та Азовського морів північніше паралелі $44^\circ 00'N$, норми обмерзання приймаються вдвічі менше крім районів, в яких, за узгодженням з Регістром, обмерзання може не враховуватись.

Додаткові вимоги до остійності.

Для контейнеровозів остійність повинна бути перевірена для варіанта навантаження з контейнерами на палубі за кутом крену на циркуляції від кренувального моменту, визначеного за формулою (8), а також при постійному боковому вітрі з кренувальним моментом, визначеним за формулою (3) при тиску вітра, рівному 0,6 від вказаного в табл. 1 для суден необмеженого району плавання.

$$M_{\psi} = \frac{0,037 \cdot D \cdot v_s^2}{L} - \frac{T}{2} \cdot \left(z_g - \frac{T}{2} \right). \quad (8)$$

В кожному з таких випадків кут крену повинен бути не більше половини кута входу верхньої палуби в воду та не більше 15° . Виправлена початкова метацентрична висота, при розрахунку якої центр тяжіння кожного контейнеровозу приймається розташованим на середині його висоти, повинна бути не менше 0,15 м.

$$\delta = \begin{cases} 0,1 \text{ при } T_\theta \leq 6; \\ 0,121 - 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_\theta \text{ при } 6 < T_\theta \leq 8; \\ 0,1465 - 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_\theta \text{ при } 8 < T_\theta \leq 14; \\ 0,116 - 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_\theta \text{ при } 14 < T_\theta \leq 16. \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0,092 - 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_\theta \text{ при } 16 < T_\theta \leq 18; \\ 0,065 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_\theta \text{ при } 18 < T_\theta \leq 20; \\ 0,035 \text{ при } T_\theta > 20. \end{cases}$$

Опір води при русі судна.

При русі судна з постійною швидкістю воно вносить своє збурення в рідину та деформує її вільну поверхню, внаслідок чого змінюються тиски по всій змоченій поверхні і крім того з'являються торкальні напруги, обумовлені в'язкістю рідини.

Опір тертя судна розраховується як опір еквівалентної пластини, тобто пластини, яка має площу рівновелику площі змоченої поверхні судна та довжину, рівну довжині судна за діючою ватерлінією, з введенням поправок на вплив кривизни і шорсткості поверхні судна. Тоді опір тертя (9) з врахуванням сили, діючою на тіло в потоці рідини розраховується за формулою [11]:

$$R_f = \left(\kappa \cdot c_f + c_w \right) \frac{\rho}{2} \cdot \Omega \cdot v^2, \quad (9)$$

де c_f – коефіцієнт опору тертя пласкої гладкої пластини; κ – коефіцієнт, враховуючий кривизну поверхні судна; c_w – надбавка на шорсткість поверхні; Ω – площа змоченої поверхні судна.

Коефіцієнт c_f залежить від характеру (режиму) руху рідини в прикордонному шарі. При малих числах Рейнольдса (R_e) спостерігається ламінарний рух, тобто рух шару, при якому відсутнє перемішування частинок між шарами рідини.

При русі суден практично за всією довжиною обтікання має турбулентний характер і величина c_f (R_e), яка отримана експериментально (10), за добре апроксимованою функцією буде наступною:

$$c_f = \frac{3,913}{(\ln R_e)^{2,58}}, \quad (10)$$

де $R_e = \frac{\nu L}{\nu}$ – число Рейнольдса; L – довжина судна; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$ (при $t = 15^\circ\text{C}$ він дорівнює $\nu = 1,187 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$); Ω – площа змоченої поверхні судна, яка визначається за теоретичним кресленням або за приблизною формулою:

$$\Omega = L \cdot T \left(2 + 1,37 \cdot (0,7 - 0,274) \cdot \frac{B}{T} \right) \text{ при } \delta < 0,45;$$

κ – коефіцієнт, враховуючий вплив кривизни суднової поверхні на тертя ($\kappa = 1,02$ при $L/B = 10$; $\kappa = 1,08$ при $L/B = 6$);

$$\kappa = 1,17 - 0,015 \cdot L/B;$$

C_{ui} – надбавка на шорсткість поверхні судна, яка для свіжопофарбованої поверхні приймається рівною $C_{ui} = 0,4 \cdot 10^{-3}$.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Метод поверхневого змащення зменшив опір поверхневого тертя на $10 \pm 2 \%$, що знизило навантаження на рушії судна.

Подальше підвищення ефективності енергозбереження планується збільшити шляхом повторного регулювання посадки судна та глибини занурення рушіїв головного двигуна, а також засобів вимірювання та контролю елементів гідропульсивного комплексу контейнеровоза.

Удосконалена процедура оптимізації руху судна на маршруті, яка ґрунтується на балансі рухомих сил та сил опору з урахуванням динамічних змін зовнішніх факторів та відрізняється від відомих процедур застосуванням комплексних й інноваційних підходів при стабілізації положення судна у просторі та на площині у реальному часі.

Удосконалено адаптивний алгоритм корекції траєкторії судна для повернення на задану лінію шляху, який відрізняється врахуванням поточних даних про модуль та напрямок дії збурюючих чинників, таких як вітрові, хвильові та течійні ефекти.

Набула подальшого розвитку методика графо-аналітичного розрахунку початкових параметрів руху судна (курсу, швидкості, координат на етапі планування маршруту), яка відрізняється застосуванням векторного аналізу та візуалізації на картографічній основі.

Набули подальшого розвитку розрахункові моделі навігаційних розрахунків, які відрізняються застосуванням способу динамічного вибору оптимальної швидкості ходу судна для безпечного відновлення руху по траєкторії маршруту.

Набув подальшого розвитку ефективний спосіб стабілізації руху судна та уникнення загроз безпеці мореплавства, який відрізняється застосуванням системного (комплексного) підходу до врахування впливу факторів навколишнього середовища [12] на процес судноводіння.

Перелік використаних джерел

1. The silverstream system: Market-leading. Air lubrication for the shipping industry. *Silverstream technologies*: website. URL: <https://www.silverstream-tech.com/> (date: 07.06.2025)

2. What is air lubrication? *Silverstream technologies*: website. URL: <https://www.silverstream-tech.com/what-is-air-lubrication/> (date: 23.07.2025)

3. The Silverstream System – Air Lubrication. The smart, verifiable, high impact efficiency technology. *PowerPoint Presentation*. *Silverstream technologies*: website. URL: <https://surl.lu/ejvilg> (date: 15.08.2025)

4. Kim Y-R., Steen, S. Potential energy savings of air lubrication technology on merchant ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2023. Vol. 15. 100530. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100530>.

5. Janho J., Choi S. H., Ahn S-M., Kim B., Seo J. S. Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2014. Vol. 6(2). P. 363-379. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0185>.

6. Chillemi M., Raffaele M., Sfravara F. A review of advanced air lubrication strategies for resistance reduction in the naval sector. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(13). 5888. <https://doi.org/10.3390/app14135888>.

7. Kawakita C. A Hydrodynamic design method of ship applying the air lubrication system. *Paper presented at the The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Sapporo, Japan, June 2018.

8. Skajem C. PEM fuel cell retrofit solutions for marine industry. *Conference: ADIPEC*, Abu Dhabi, UAE, October 2023. doi: <https://doi.org/10.2118/217036-MS>.

9. Dong-Young Kim, Ji-Yeon Ha, Kwang-Jun Paik. Numerical study on the extrapolation method for predicting the full-scale resistance of a ship with an air lubrication system. *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2020. Vol. 34(6). P. 387-393. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2020.008>.

10. Arakawa D., Kawasima H., Kawakita C. Numerical estimation of self-propulsion factors for ship with air lubrication. *Paper presented at the The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Sapporo, Japan, June 2018.

11. Сізов В. Г. Теорія корабля: навчальний посібник. Одеса: Фенікс, 2004. 284 с.

12. 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. Vol. 4(3 (72)). P. 33-42.

10.31653/smf50.2025.42-51

Колегаєв М.О., Побережний Р.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ДИЗЕЛІВ МОРСЬКИХ СУДЕН

Постановка проблеми в загальному вигляді. Дизельні двигуни внутрішнього згоряння, які знайшли широке застосування як суднові енергетичні установки, за наявності безперечних переваг потребують постійної модернізації у зв'язку з підвищенням вимог до запобігання забруднення атмосфери з суден шляхом скорочення концентрації шкідливих речовин у випускних газах, зниженням витрати палива та підвищенням питомої енергоозброєності [1-3]. Проблемою мінімізації вмісту токсичних складових у випускних газах судових дизелів (як найбільш розповсюдженого на суднах морського та внутрішнього водного транспорту теплового двигуна, що споживає велику кількість палива нафтового походження) займалися і займаються багато організацій та науково-дослідних інститутів. Різні аспекти цієї проблеми вивчені досить повно для того, щоб зробити висновок щодо її складності та необхідності внесення значних фінансових витрат на встановлення додаткового обладнання, що забезпечує очищення випускних газів [4-6]. Можливість скорочення емісії шкідливих домішок з випускними газами за рахунок удосконалення характеристик робочого процесу дизелів практично вичерпана [7-9].

Практикою та науковими дослідженнями багаторазово доведено транзитивність понять «робочий процес дизеля» та «утворення оксидів азоту NO_x ». Саме оксиди азоту є тієї складової випускних газів, значення якої суворо регламентується з боку Міжнародної морської організації [10, 11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час пропонується широкий спектр розв'язання завдання підвищення екологічних показників роботи судових дизелів, проте ступінь їхньої ефективності неоднозначний. Virізняють кілька напрямків:

- 1) підвищення якості організації робочого процесу [12-14];
- 2) підвищення якості традиційних видів палива, використання присадок, водопаливних емульсій та застосування альтернативних видів палива [15-17];

3) застосування систем очищення випускних газів судових дизелів [18-20].

Відомо, що оксиди азоту утворюються із суміші азоту з киснем під час досягнення температури в зоні горіння 1200...1300 °С. У той же час, цепна реакція утворення NO_x (відповідно до всіма визнаною теорії Зельдовича) виникає за температурою більш за 1500 °С. З цих значень температури починається некерований процес утворення оксидів азоту, що виявляється в збільшенні їх емісії в довкілля. Саме тому всі технологічні способи, що спрямовані на зменшення емісії оксидів азоту, пов'язані зі зниженням температури під час згоряння палива в циліндрі дизеля [21-23]. На це спрямовані «первинні» способи зниження емісії NO_x – тобто такі, що діють на процес згоряння палива (рис. 1) [24, 25].

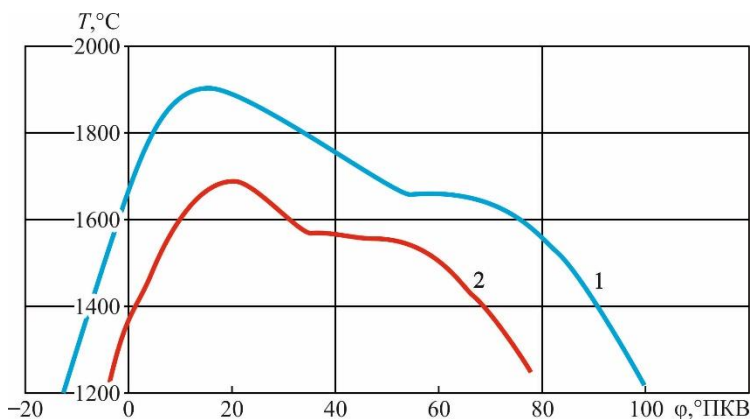


Рис. 1. Зміна температури в циліндрі дизеля під час згоряння палива:

- 1 – без використання первинних способів зменшення емісії NO_x ;
- 2 – з використанням первинних способів зменшення емісії NO_x

Високий ступінь очищення випускних газів судових дизелів (до 90...95 %) від NO_x досягається за допомогою каталітичних генераторів (SCR-реакторів), що встановлюються у випускному колекторі. Цей варіант очищення відноситься до «вторинних» способів зниження емісії NO_x – таких, дія яких спрямована безпосередньо на випускні гази [26, 27]. Використання технології селективного каталітичного поновлення (Selective Catalytic Reduction – SCR) потребує значних додаткових витрат, які за різними оцінками досягають 40...70 \$ США на 1 кВт потужності дизеля [28, 29]. Тобто додаткові витрати на одне судно середньої водотоннажності з сумарною поту-

жністю енергетичної установки (головного двигуна 8000...8500 кВт та допоміжних двигунів потужністю 1200...1500 кВт) становлять 370...700 тис. \$ США [30, 31].

Альтернативою зазначеним способам скорочення емісії шкідливих домішок з газами, що йдуть, може служити використання водопаливних емульсій [32, 33].

Фінська фірма «Wartsila» пропонує застосовувати в дизелях емульговане паливо на базі високов'язкого палива та додавання до 30 % водної фази та 0,5 % спеціальної присадки, що використовується для інтенсифікації горіння та підвищення стабільності утвореної емульсії.

Корпорація MAN-B&W у встановлених на круїзних судах середньообертових дизелях нового покоління L48/60 і L58/64 використовує водопаливну емульсію з 15 % водомісткістю, що готується на базі високов'язкого палива та додатково змішується гідродинамічними ультразвуковими пристроями. Зміст NO_x у випускних газах дизелів йдуть, знизився до 6,7 г/(кВт·год). Відповідно до наведеної на рис. 2 діаграмою, що визначає послідовність введення в дію обмежень викидів NO_x згідно з розробленим ІМО технічним кодексом, використання MAN-B&W водопаливної емульсії забезпечує емісію NO_x з випускними газами практично вдвічі нижче нормативів ІМО.

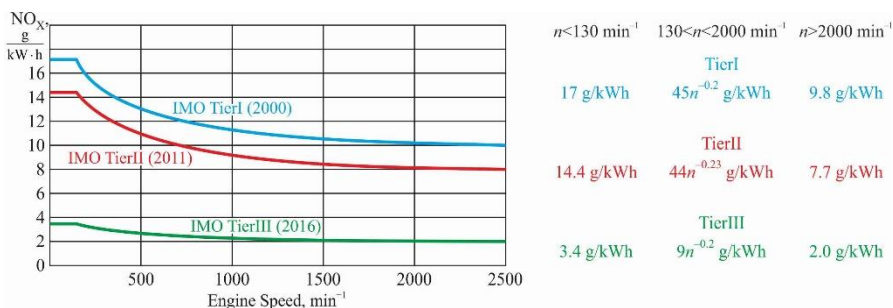


Рис. 2. Вимоги щодо емісії оксидів азоту з випускними газами суднових дизелів

Слід також визначити, що більшість суден морського та внутрішнього водного транспорту, які на теперішній час знаходяться в експлуатації, відноситься до рівнів IMO Tier I та IMO Tier II, тобто ці судна спущені на воду в період 2000...2011 рр. та до 2011...2016 рр. відповідно. За різними оцінками кількість таких суден складає

75...80 % від загального тоннажу всіх суден, що на теперішній час знаходяться в експлуатації. Також необхідно зазначати, що кількість суден, які побудовані після 2016 р. постійно зростає, та їх число відносно загальної кількості суден збільшується рік від року. Забезпечення вимог Tier I щодо емісії оксидів азоту можливо шляхом оптимізації робочого процесу та вдосконаленням конструкційних та експлуатаційних характеристик паливної апаратури високого тиску. Досягнення вимог Tier II та Tier III можливо лише шляхом додаткових методів, до одного з яких відноситься використання водопаливних емульсій.

Постановка завдання. З урахуванням вищевикладеного, завданням дослідження було визначення впливу водопаливних емульсій на емісію оксидів азоту суднових дизелів та оцінка доцільності використання цього способу для підвищення екологічних показників роботи суднових дизелів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Методики та пристрої приготування водопаливних емульсій та прямого впорскування води в циліндри суднових дизелів розробляються, апробуються та впроваджуються давно, але можуть виявлятися малопридатними для роботи дизелів на маневрових режимах, що виконуються зазвичай на прибережних акваторіях та безпосередньо в морських та річкових портах, розташованих, як правило, у межах великих міст. Порівняно легко ця проблема розв'язується застосуванням розробленої фірмою Wartsila системи автоматизованого приготування водопаливної емульсії, за умови чіткого визначення допустимого вмісту води в складі емульсії для кожного режиму роботи дизеля. Логічно припустити, що вплив величини вмісту вологи в емульсії далеко не однаково впливає на концентрацію різних компонентів, що входять до складу випускних газів. Тому вивчення співвідношення вмісту вологи в водопаливної емульсії та основні компонентів шкідливих викидів випускних газів суднових двигунів внутрішнього згоряння вимагає додаткового та ретельного вивчення. Перш за все це пов'язано з фізичними властивостями як палива, також й води, які вдвох відносяться до нестисливих рідин. В зв'язку з цим додавання води до певного об'єму палива збільшує загальний об'єм їх суміші. Нестисливість цього об'єму призводить до підвищення часу, яких необхідний для впорскування цієї суміші до циліндра дизеля. Це змушує змінювати закон подачі водопаливної емульсії у порівнянні з подачею лише палива. Найбільш розповсюджений способів розв'язання цього завдання – збі-

льшення кута випередження впорскування палива. Проте критичне збільшення цього значення на часткових навантаженнях дизеля може призвести до зменшення температури у циліндрі у момент впорскування палива, що може стати причиною порушення самозаймання.

Комплексні дослідження можливостей переведення судових дизелів на водопаливну емульсію широкого типорозмірного ряду виконувалось фірмою Wartsila на чотиритактних дизелях серії R. Результати деякої частини цих випробувань, що виконувались на дизелі 6R32E, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Вміст шкідливих речовин у випускних газах судового дизеля 6R32E на режимі номінального навантаження під час використання водопаливної емульсії

Показник	Сорт палива	
	DMA30 (вміст сірки S=0,07 %)	RMG380 (вміст сірки S=0,46 %)
Емісія оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год)	12,8	10,9
Емісія оксиду вуглецю CO , г/(кВт·год)	8,7	7,6
Емісія незгорілих вуглеводнів CH , г/(кВт·год)	0,76	0,96
Емісія оксидів сірки SO_x , г/(кВт·год)	3,22	11,41

Аналізуючи результати досліджень, можна відзначити підвищення екологічних показників роботи дизеля під час його експлуатації на водопаливної емульсії.

До недоліків роботи дизелів на водопаливної емульсії слід віднести обмеження їх потужності до рівня не вище 75 % від номінального значення, через недостатню продуктивність паливних насосів. Це пов'язано з необхідністю збільшення циклової подачі водопаливної емульсії відносно циклової подачі чистого палива пропорційно вмісту води в емульсії.

Окремо визначимо результати, щодо визначення питомої витрати палива b_e та емісії оксидів азоту NO_x судового дизеля 6R32E під час використання водопаливної емульсії (комплекс відповідних випробувань на яких вміст води в водопаливної емульсії коливався в діапазоні 0...30 % виконувався на 75 % навантаженні дизеля). Результати досліджень наведені на рис. 3

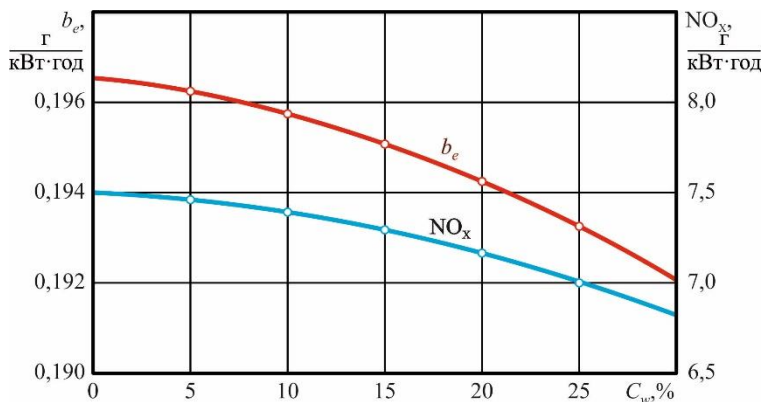


Рис. 3. Залежність питомої витрати палива b_e та емісії оксидів азоту NO_x суднового дизеля 6R32E на режимі 75 % навантаження під час використання водопаливної емульсії

Аналіз результатів, що наведені на рис. 3, свідчить, що додавання води до палива сприяє не лише підвищенню екологічних показників роботи суднових дизелів, але також покращує їх економічність.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Під час розв'язання питання щодо переведення дизельної установки судна на водопаливну емульсію доцільно враховувати ступінь форсування двигунів, сорт палива та умови експлуатації судна. Оптимальна концентрація води у водопаливній емульсії для двигунів із середнім ефективним тиском до 1,5 МПа, як правило, не рекомендується вище за 15...20 %. Для більш форсованих двигунів, з середнім ефективним тиском до 2,0 МПа вона може сягати 30...40 % залежно від вимог, які висуваються до вмісту шкідливих речовин в випускних газах та до економічності двигуна.

Емульсія може готуватися безпосередньо перед використанням палива в двигуні, також і шляхом заповнення витратної цистерни паливом та водою та їх якісного змішування. Визначальними в цьому випадку є властивості палив, що використовуються, та наявність емульгуючих присадок. Таким чином, варіюючи концентрацію води та присадки у водопаливній емульсії, можливості паливної апаратури можна розробити рекомендації щодо застосування водопаливної емульсії у будь-яких умовах експлуатації кожного конкретного суднового дизеля.

Перелік використаних джерел

1. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. Одеса: НУ «ОМА». С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
2. Kolegaev M., Brazhnik I. Improvement of the process of preparing cargo tanks of crude oil tankers for cargo operations // Technology Audit and Production Reserves. 2024. № 6(1(80)). С. 36–40. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.318534>.
3. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
4. Petrychenko O. Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. 2023. № 41. Р. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-

технічний збірник. 2022. Вип. 44. Одеса: НУ «ОМА». С. 132-141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.

11. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз ефективності використання в суднових дизелях палив різного фракційного та структурного складу // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 45. Одеса: НУ «ОМА». С. 132-141. doi: 10.31653/smf45.2022.132-141.

12. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. 2012. № 4. Одесса: ОНМУ. С. 68-81.

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

14. Двудіт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. 2021. № 3 (1). С. 1-12. <http://doi.org/10.23939/smeu2021.01.001>.

15. 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>.

16. Сагін С.В., Побережний Р.В. Метод управління факторами ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації пропульсивних комплексів засобів водного транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 46. Одеса: НУ «ОМА». С. 110-117. doi: 10.31653/smf46.2023.110-117.

17. 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>.

18. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2024. Вип. 2(40). С. 173-185. doi: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16>.

19. 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.

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

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.

22. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 40. С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

23. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

24. Колегаєв М.О., Бражнік І.Д. Забезпечення процесу вентиляції вантажних трюмів танкерів за допомогою системи інертних газів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2024. Вип. 48. Одеса: НУ «ОМА». С. 46-53. doi: 10.31653/smf48.2024.46-53.

25. 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>.

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

27. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт:

Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.

28. 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. С.116-125.

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

30. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport Systems and Technologies. 2024. Vol. 43. P. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2

31. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

32. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.

33. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

10.31653/smf50.2025.52-66

Куропятник О.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА

Постановка проблеми в загальному вигляді. Судна морського транспорту є невід'ємною складовою інфраструктури багатьох країн, що пов'язані з іншими водними шляхами [1-3]. Основним джерелом енергії, що забезпечує рух суден, а також функціонування суднових систем, механізмів, палубного та навігаційного обладнання є дизелі. Отримання ефективної потужності суднових дизелів неможливо без використання палива нафтового походження, природні запаси якого щорічно знижуються, динаміка його вартості постійно змінюється, умови постачання між портами та країнами знаходяться в залежності від політичних ситуацій [4-6]. Одночасно з цим посилюються вимоги, що висуваються до екологічних показників роботи енергетичних установок суден морського і річкового транспорту [7-9]. Це обумовлює розвиток та впровадження в суднову енергетику альтернативних видів палива, джерело походження яких може знаходитися в країні, яка не має власного виробництва палива нафтового походження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання альтернативного палива на судах морського транспорту обмежується наступними причинами: автономністю плавання та неможливістю безперешкодного відновлення його запасів палива [10-13]; високою потужністю суднової енергетичної установки та відповідно високими витратами палива [14-16]; необхідністю в узгодженні всіх робіт із удосконалення паливної системи з кваліфікаційними товариствами, що здійснюють технічний контроль над судном [17-19].

Також необхідно визначити, що використання деякі сорти альтернативного палива (таки як спирти та ефіри, а також паливні суміші до яких вони входять) неефективне для забезпечення робочого циклу суднового дизеля [20-23]. Перш за все це пов'язане з більш низькою теплотворною здатністю подібних палива, а також їх меншою густиною та в'язкістю [24-26]. Перше призводить до збільшення циклової подачі палива, друге – сприяє порушенню роботи прецизійних пар паливної апаратури високого тиску [27-29]. Одночасно

з цим існують альтернативні палива, які за своїми функціональними характеристиками збігаються з паливом нафтового походження [30-33]. Це дозволяє використовувати паливні суміші, до складу яких разом з нафтовим паливом входять альтернативні палива [34-36]. Найбільшим збігом експлуатаційних властивостей з нафтовими палива характеризуються палива біологічного походження [37-40]. До другого покоління таких палив відноситься гідроване рослинне мастило (HVO – Hydrotreated Vegetable Oil) [41-44]. Використання цього палива вже має позитивний досвід у стаціонарній енергетиці, але відносно енергетичних установок суден морського транспорту дослідження щодо ефективності HVO мають поодинокі випадки та не мають системного підходу до визначення раціональних режимів його використання.

Постановка завдання. Завданням дослідження був аналіз експлуатаційних режимів роботи судових дизелів під час використання палива біологічного походження – гідрованого рослинного мастила. При цьому аналіз цих режимів виконувався за економічними (питомою витратою палива) та екологічними (емісією оксидів азоту та діоксиду вуглецю) показниками роботи дизелів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на трьох однотипних судових дизелях 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries.

Як основне паливо під час експлуатації дизеля що використовувалось суднове моторне паливо RME180, як альтернативне – паливо HVO. Основні характеристики палив RME180 та HVO наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Основні характеристики палив RME180 та HVO

Характеристика	RME180	HVO
Густина при 20°C, кг/м ³	863	834
В'язкість при 40°C, мм ² /с	164	9,6
Температура спалаху, °C	128	82
Вміст, %		
вуглецю	83,33	84,63
водню	10,43	13,42
кисню	1,75	0
сірки	0,46	0
вологі	2,93	1,95
азоту	1,1	0
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	40888,2	45593,4

Збіг основних характеристик альтернативного палива біологічного походження HVO та палива нафтового походження RME180 дозволяв використовувати паливо HVO для забезпечення функціонування суднових дизелів 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries з метою визначення впливу палива HVO на експлуатаційні характеристики дизелів утворювались паливні суміші, до яких входило паливо RME180, а також 10 %, 20 %, 30 % та 40 % палива HVO. Утворення сумішей виконувалось безпосередньо в паливній системі, принципова схема якої наведена на рис. 1.

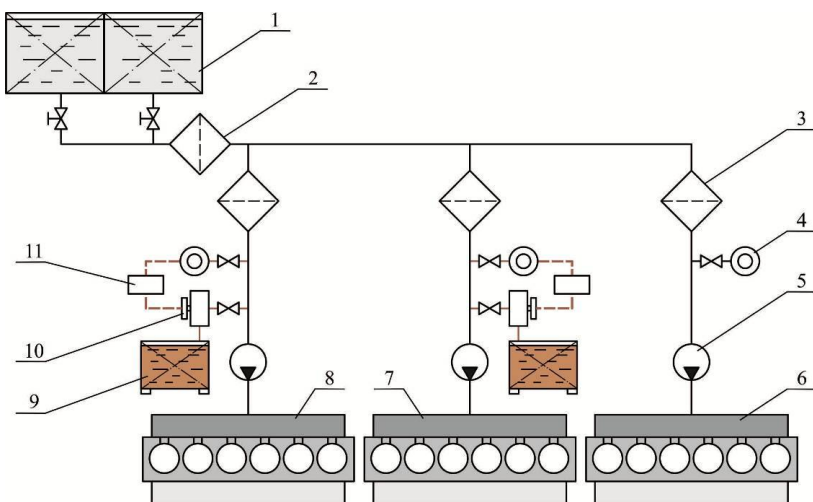


Рис. 1. Принципова схема паливної системи суднових дизелів 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries:

- 1 – витратна цистерна палива нафтового походження RME180;
- 2 – фільтр попереднього очищення палива; 3 – фільтр тонкого очищення;
- 4 – витратомір; 5 – паливний насос, що підкачує паливо; 6, 7, 8 – суднові дизелі;
- 9 – витратна цистерна біологічного походження HVO;
- 10 – дозерна установка; 11 – програмований контролер

До складу паливної системи входило наступне обладнання: витратна цистерна дизельного палива 1, загальний паливний фільтр грубого очищення 2, окремий для кожного дизеля паливний фільтр тонкого очищення 3, окремий для кожного дизеля електронний витратомір 4, окремий для кожного дизеля насос подачі палива 5, безпосередньо дизелі 6, 7, 8.

Функціонування паливної системи відбувалося в такий спосіб. З витратної цистерни палива нафтового походження 1 паливо RME180 через фільтр попереднього очищення 2 та паливний фільтр тонкого очищення 3 (який входив до контуру кожного з дизелів 6, 7, 8) надходило до паливних насосів 5, що підкачують паливо, які далі спрямовували паливо до форсунок дизелів. Кількість палива, що спрямовувалось до дизелів 6, 7, 8, визначалася за допомогою витратомірів 4 (які встановлювались у контурі кожного дизеля). Контур подачі палива до дизеля 6 не залишався без змін, та цей дизель експлуатувався з використанням палива RME180. Контури дизелів 7 та 8 переобладнувались з метою використання палива біологічного походження HVO. При цьому в них додатково встановлювались витратна цистерна палива біологічного походження 9 та дозерна установка 10, яка забезпечувала подачу палива та HVO до загального потоку палива RME180. Кількість палива біологічного походження HVO, що додавалась до палива RME180, регулювалась за допомогою програмований контролер 11. Це забезпечувало утворення паливних сумішей з заданим співвідношенням палив RME180 та HVO.

Дослідження виконувались на експлуатаційних режимах, що відповідали 50 %, 60 % 70 % та 80 % від номінального навантаження на суднові дизелі 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries – 0,5Неном, 0,6Неном, 0,7Неном, 0,8Неном. Під час досліджень один з дизелів (позиція 6 на рис. 1) експлуатувався виключно на паливі RME180, два інших (позиції 7 та 8 на рис. 1) – з використанням паливних сумішей палива нафтового походження RME180 та палива біологічного походження HVO. Вміст палива HVO у паливній суміші регулювався за допомогою дозерної установки та програмованого контролера (позиції 10 та 11 на рис. 1) та складав 10 %, 20 %, 30% та 40 % на різних етапах дослідження.

Основними показниками, що були обрані для аналізу експлуатаційних режимів роботи дизелів 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries під час використання палива біологічного походження HVO, приймалися питома витрата палива, а також концентрації оксидів азоту та діоксиду вуглецю у випускних газах. Зміна цих показників для різних режимів експлуатації дизелів та різного складу паливних сумішей (до яких входили палива RME180 та HVO) наведені у таблицях 2-4.

Таблиця 2. Питома ефективна витрата палива, b_e , г/(кВт·год), для палива RME180 та для паливних сумішей різного складу

Режим роботи	RME180	Співвідношення RME180 / HVO у суміші, % / %			
		90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
0,5N _{енорм}	212	204	203	198	195
0,6N _{енорм}	206	198	196	195	193
0,7N _{енорм}	202	197	195	193	188
0,8N _{енорм}	196	192	191	189	187

Таблиця 3. Концентрація оксидів азоту у випускних газах, NO_x, г/(кВт·год), для палива RME180 та для паливних сумішей різного складу

Режим роботи	RME180	Співвідношення RME180 / HVO у суміші, % / %			
		90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
0,5N _{енорм}	6,85	5,68	5,48	5,07	7,18
0,6N _{енорм}	6,91	5,83	5,78	5,15	7,41
0,7N _{енорм}	7,76	6,32	6,18	5,21	8,26
0,8N _{енорм}	8,34	7,32	6,41	5,22	8,87

Таблиця 4. Об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах, CO₂, %, для палива RME180 та для паливних сумішей різного складу

Режим роботи	RME180	Співвідношення RME180 / HVO у суміші, % / %			
		90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
0,5N _{енорм}	7,12	5,51	4,81	4,63	4,47
0,6N _{енорм}	7,31	5,73	5,42	5,08	4,83
0,7N _{енорм}	7,75	6,28	5,84	5,72	5,06
0,8N _{енорм}	8,36	7,12	6,68	6,18	5,08

Значення, що наведені у таблицях 2-4, є усередненими від масиву експериментальних значень, що були отримані під час постійного моніторингу вказаних величин на протязі 7...10 хвилин. При цьому під час проведення моніторингу дизелі експлуатувались на сталому навантаженні та за умовою однакових режимів навантаження та охолодження. Під час дослідження також виконувався моніторинг всіх основних показників роботи дизеля.

За результатами експериментів побудовані діаграми, що відображають зміни питомої ефективної витрати палива (рис. 2, а), емісії оксидів азоту NO_x (рис. 2, б) та об'ємної концентрації діоксиду вуглецю CO₂ в випускних газах (рис. 2, в) для різних умов експлуатації суднового дизеля 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries.

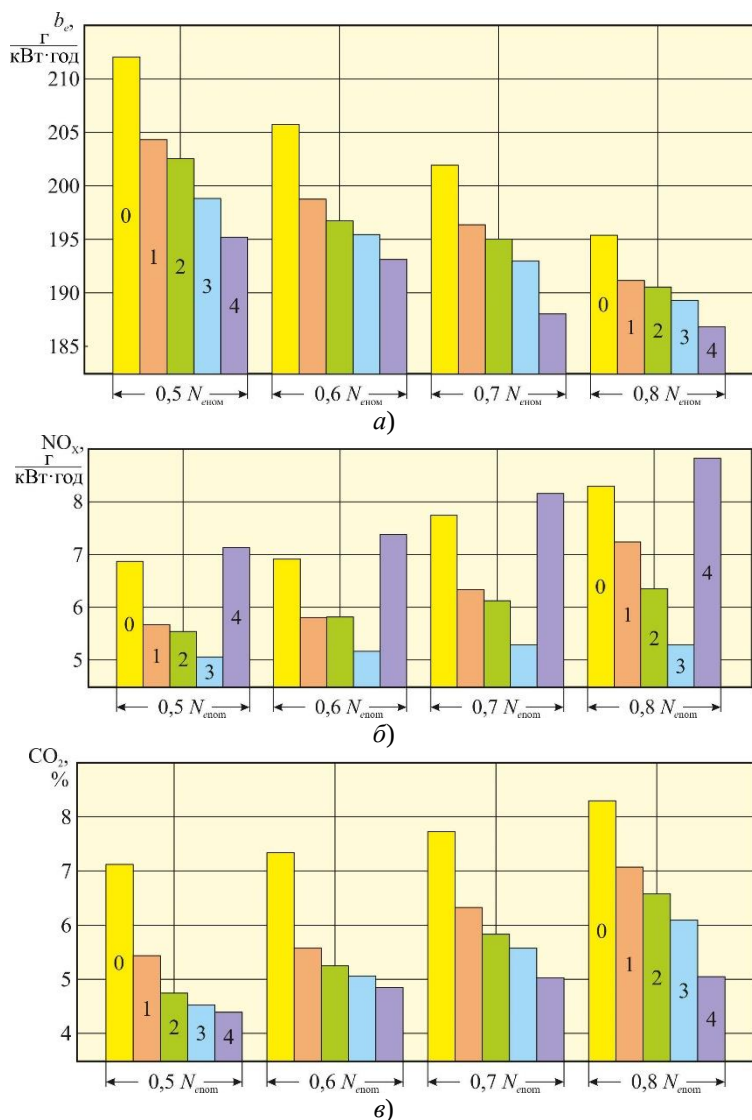


Рис. 2. Залежності показників роботи дизеля 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries від навантаження під час використання палива RME180 та паливних сумішей різного складу 0 – 100 % RME180;
 1 – 90 % RME180 + 10 % HVO; 2 – 80 % RME180 + 20 % HVO;
 3 – 70 % RME180 + 30 % HVO; 4 – 60 % RME180 + 40 % HVO;
 а – питома витрата палива; б – емісія оксидів азоту; в – об'ємний вміст діоксиду вуглецю в випускних газах

Відносні зміни концентрації оксидів азоту ΔNO_x та об'ємного вмісту оксиду вуглецю ΔCO_2 в випускних газах, а також питомої ефективної витрати палива Δb_e розраховувались за виразами

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{\text{RME}} - b_e^{\text{HVO}}}{b_e^{\text{RME}}} \cdot 100\%, \quad \Delta\text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^{\text{RME}} - \text{NO}_x^{\text{HVO}}}{\text{NO}_x^{\text{RME}}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2^{\text{RME}} - \text{CO}_2^{\text{HVO}}}{\text{CO}_2^{\text{RME}}} \cdot 100\%,$$

де $b_e^{\text{RME}}, b_e^{\text{HVO}}$ – питома ефективна витрата палива під час використання палива нафтового походження RME180 та паливних сумішей, до складу яких входили паливо нафтового походження RME180 та паливо біологічного походження HVO у різному відсотковому співвідношенні, г/(кВт·год);

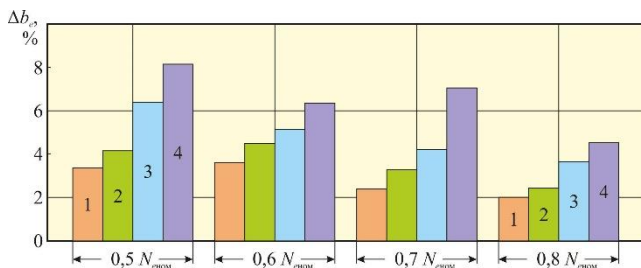
$\text{NO}_x^{\text{RME}}, \text{NO}_x^{\text{HVO}}$ – концентрація оксиду азоту в випускних газах під час використання палива нафтового походження RME180 та паливних сумішей, до складу яких входили паливо нафтового походження RME180 та паливо біологічного походження HVO у різному відсотковому співвідношенні, г/(кВт·год);

$\text{CO}_2^{\text{RME}}, \text{CO}_2^{\text{HVO}}$ – об'ємний вміст діоксиду вуглецю в випускних газах під час використання палива нафтового походження RME180 та паливних сумішей, до складу яких входили паливо нафтового походження RME180 та паливо біологічного походження HVO у різному відсотковому співвідношенні, %.

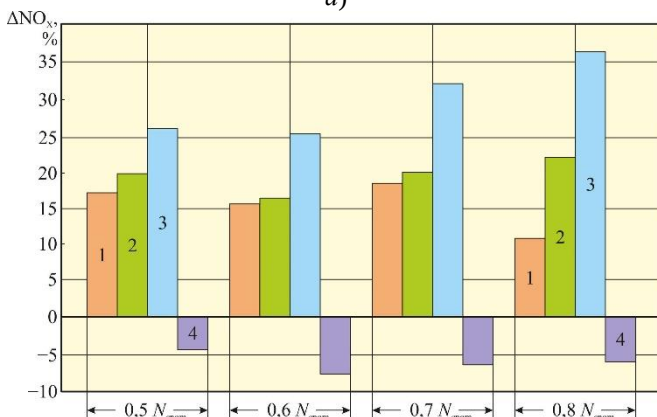
Отримані значення узагальнені у таблицях 5-7, а також відображені на діаграмах, наведених на рис. 3.

Таблиця 5. Відносне зменшення питомої ефективної витрати палива, Δb_e , %, для паливних сумішей різного складу

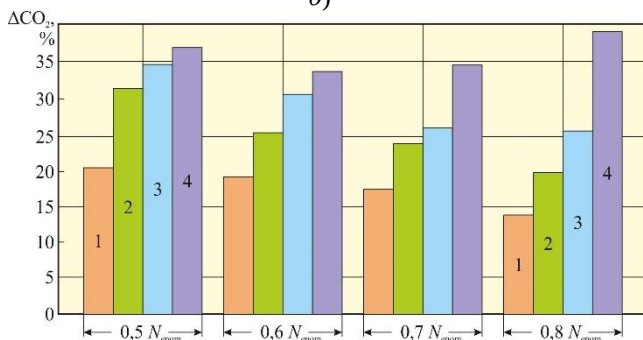
Режим роботи	Співвідношення RME180 / HVO у суміші, % / %			
	90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
$0,5N_{\text{еном}}$	3,77	4,25	6,60	8,02
$0,6N_{\text{еном}}$	3,88	4,85	5,34	6,31
$0,7N_{\text{еном}}$	2,48	3,47	4,46	6,93
$0,8N_{\text{еном}}$	2,04	2,55	3,57	4,59



а)



б)



в)

Рис. 3. Відносна зміна показників роботи дизеля 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries від навантаження під час використання паливних сумішей різного складу:

1 – 90 % RME180 + 10 % HVO; 2 – 80 % RME180 + 20 % HVO;

3 – 70 % RME180 + 30 % HVO; 4 – 60 % RME180 + 40 % HVO;

а – збільшення питомої витрати палива; б – зменшення емісії оксидів азоту;

в – зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах

Таблиця 6. Відносна зміна концентрації оксидів азоту у випускних газах, ΔNO_x , %, для паливних сумішей різного складу

Режим роботи	Співвідношення RME180 / HVO у суміші, % / %			
	90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
$0,5N_{\text{ном}}$	17,08	20,00	25,99	-4,82
$0,6N_{\text{ном}}$	15,63	16,35	25,47	-7,24
$0,7N_{\text{ном}}$	18,56	20,36	32,86	-6,44
$0,8N_{\text{ном}}$	12,23	23,14	37,41	-6,35

Таблиця 7. Відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах, ΔCO_2 , %, для паливних сумішей різного складу

Режим роботи	Співвідношення RME180 / HVO у суміші, % / %			
	90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40
$0,5N_{\text{ном}}$	22,61	32,44	34,97	37,22
$0,6N_{\text{ном}}$	21,61	25,85	30,51	33,93
$0,7N_{\text{ном}}$	18,97	24,65	26,19	34,71
$0,8N_{\text{ном}}$	14,83	20,10	26,08	39,23

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

1. Поступово скорочення природних запасів нафти, коливання цін на нафтопродукти (у тому числі на паливо нафтового походження, що використовується під час експлуатації дизелів суден морського транспорту) та тенденції постійного зростаючих вимог щодо захисту довкілля від емісії шкідливих речовин, що входять до складу випускних газів судових дизелів сприяють розвитку та впровадження в судову енергетику альтернативних видів палива. Одним з розповсюджених видів якого є паливо біологічного походження, основою якого є гідроване рослинне мастило, або Hydrotreated Vegetable Oil (HVO).

2. Збіг основних функціональних характеристик палива біологічного походження HVO (перш за все в'язкості, густини, температури спалаху та нижчої теплотворної здатності) та судового моторного палива нафтового дозволяє утворювати суміші цих палив з різним вмістом палива HVO.

3. Дослідження, що виконувались на судових 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries в діапазоні їх експлуатаційних навантажень 50 ... 80 % та під час використання паливних сумішей різного складу (зі вмістом 60...90 % палива нафтового походження RME180

та 40...10 % палива біологічного походження HVO) встановили наступне:

а) збільшення у складі паливної суміші вмісту палива біологічного походження HVO на всіх експлуатаційних режимах роботи дизелів призводить до зменшення питомої витрати палива; при цьому відносне зменшення питомої ефективної витрати палива знаходиться у діапазоні:

3,77...8,02 % під час навантаження 50 %;

3,88...6,31 % під час навантаження 60 %;

2,48...6,93 % під час навантаження 70 %;

2,04...4,59 % під час навантаження 80 %;

б) зміна концентрації оксидів азоту у випускних газах має різноспрямований характер та для всього діапазону навантажень зменшується на 12,23...37,41 % під час використання паливних сумішей до складу яких входить 10...30 % палива біологічного походження HVO та збільшується на 4,82...6,35 % під час використання паливної суміші до складу якої входить 40 % палива біологічного походження HVO;

в) збільшення у складі паливної суміші вмісту палива біологічного походження HVO на всіх експлуатаційних режимах роботи дизелів призводить до зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах; при цьому відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах знаходиться у діапазоні:

22,61...37,22 % під час навантаження 50 %;

21,61...33,93 % під час навантаження 60 %;

18,97...34,71 % під час навантаження 70 %;

14,83...39,23 % під час навантаження 80 %.

4. Наведені дані свідчать про наявність оптимальної концентрації палива біологічного походження HVO у складі її суміші з нафтовим паливом. Це концентрація забезпечує максимальне підвищення економичності роботи судових дизелів (яка визначається питомою витратою палива) з одночасним максимальним рівнем екологічності (який визначається емісією оксидів азоту та діоксиду вуглецю).

5. Оптимальна концентрація палива біологічного походження HVO у складі її суміші з нафтовим паливом визначається експериментально та може змінюватися залежно від навантаження на судові дизелі.

Перелік використаних джерел

1. Двуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. 2021. № 3 (1). С. 1-12.
2. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 26. С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
3. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
4. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport Systems and Technologies. 2024. Vol. 43. P. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2
5. Заблоцкий Ю.В., Солодовников В.Г. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. 2013. № 3. С. 46-56.
6. Goolak S.; Riabov I.; Petrychenko O.; Kyrychenko M.; Pohosov O. The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel // Advances in Mechanical Engineering. 2025. Vol. 17(2). doi:10.1177/16878132251320236.
7. 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. 2021. № 7-8. P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
8. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
9. Petrychenko O. Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. 2023. № 41. P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.

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

11. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 40. С. 12-16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.

12. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. 2020. Вип. 41. С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.

13. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

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

15. 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. С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

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

17. 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. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

18. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2018. № 7-8. P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.

19. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // Вісник Одеського національного морсь-

кого університету: зб. наук. праць. 2020. № 2(62). С. 106-119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.

20. Заблоцький Ю. В. Зниження теплової напруженості судових дизелів за рахунок використання присадок до палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. 2018. Вип. 38. С. 76-87.

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

22. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 41. С. 20-25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.

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

24. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення судових двигунів внутрішнього згоряння // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 23-31. doi: 10.31653/smf47.2023.23-31.

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

26. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 41. С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.

27. 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. P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

28. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. Наук. праць. 2019. Вип. 1(58). С. 89-100.

29. 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. С.109-118.

30. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

31. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

32. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2024. Вип. 2(40). С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.

33. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. Одеса: НУ «ОМА». С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120

34. Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи судового малообертового двигуна в умовах сучасної тенденції щодо зниження експлуатаційної швидкості суден. // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2022. Вип. 2(36). С. 1-13. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.06.

35. Kuropyatnyk O.A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). P. 203-211. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52992

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

37. Levinskyi M.V., Shapo V.F. Adaptive control for technological type control objects // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1231. P. 565–575. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0_47.

38. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity Optimisation of a Main Marine Diesel Engine Electronic Speed Governor // *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24(11). P. 9-19. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).

39. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // *International Journal of GEOMATE*. 2023. Vol. 25. № 109. P. 125-132. DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312>.

40. 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>.

41. Petrychenko, O.; Levinskyi, M.; Goolak, S.; Lukoševičius, V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.

42. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2025. Вип. 1(42). С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.

43. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides // *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. №4(1(84)). P. 72–79. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.

44. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

10.31653/smf50.2025.67-79

Куропятник О.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
СИСТЕМ КАТАЛІТИЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ВИПУСКНИХ
ГАЗІВ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРЬСЬКОГО ТРАНСПОРТУ**

Постановка проблеми в загальному вигляді. Експлуатація суден морського транспорту пов'язана не лише з транспортуванням вантажів але також з виконанням міжнародних вимог щодо попередження забруднення довкілля випускними газами судових дизелів. Екологічні вимоги, що висуваються до судових дизелів, перш за все регламентуються Міжнародною конвенцією МАРПОЛ. Додаток VI цієї конвенції спрямовано на зниження потрапляння в атмосферу оксидів сірки SO_x та NO_x [1-3]. При цьому основним критерієм, за яким обмежується емісія SO_x , є відсотковий вміст сірки в паливі. Кількість NO_x , що знаходиться у випускних газах, визначається в $гNO_x/(кВт \cdot год)$ потужності дизеля та залежить від його частоти обертання, а також року побудови судна [4-6].

Найбільш суворі вимоги Додатку VI МАРПОЛ в районах спеціального екологічного контролю викидів – Emission Control Areas (ECAs). Кількість подібних районів та їх площа постійно збільшується. Це пов'язано з високою щільністю трафіку морських суден в цих акваторіях, а також с особливості їх природних та метеорологічних умов. В найближчий час за погодженням з Міжнародною морською організацією (International Maritime Organization – IMO) визначається нова зону контролю викидів у північно-східній частині Атлантичного океану (North-East Atlantic Ocean ECA), яка з'єднає існуючі ECA у Балтійському морі (Baltic Sea ECA), Північному морі (North Sea ECA) та Ла-Манші (English Channel ECA) з тими, що нещодавно були створені у Середземному морі (Mediterranean Sea ECA), Норвезькому морі (Norwegian Sea ECA) та канадських арктичних водах (Canadian Arctic ECA). При цьому слід визначити, що Середземне море відноситься до спеціального екологічного району, в якому регламентується викиді оксидів сірки, тобто SO_x -ECA); Канадська Арктика, Норвезьке море та північно-східна частина Атлантичного океану – до районів контролю викидів оксидів сірки та окси-

дів азоту – NO_x -ECA та SO_x -ECA [7-9]. Візуалізація цих акваторій надана на рис. 1.

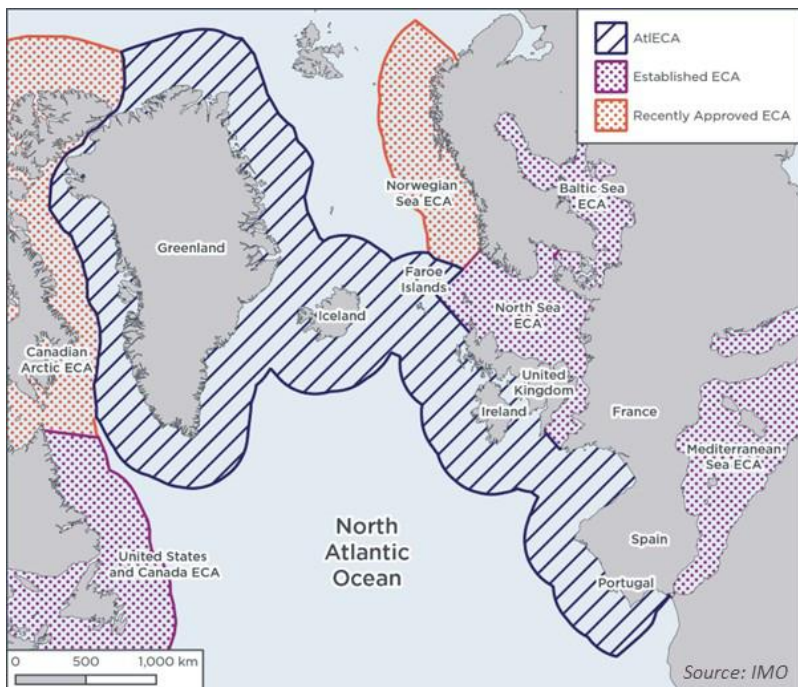


Рис. 1. Спеціальні екологічні райони акваторій Північної Європи та Північної Америки

Вимоги Додатку VI МАРПОЛ відносно емісії оксидів сірки забезпечуються через використання в районах SO_x -ECA палива, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 % [10-12]. Значення концентрації оксидів азоту у випускних газах під час знаходження морських суден у районах NO_x -ECA лімітується вимогами Tier III Додатку VI МАРПОЛ, відповідно до якого емісія NO_x не повинна перевищувати:

- 3,4 г NO_x /(кВт·год) в разі, коли частота обертання дизеля не перевищує 130 об/хв;
- величини, що визначається за виразом $9n^{-0,2}$ (де n – частота обертання дизеля) в разі, коли частота обертання дизеля знаходиться у діапазоні $130 < n < 2000$ об/хв;
- 2,0 г NO_x /(кВт·год) в разі, коли частота обертання дизеля більш за 2000 об/хв. [13-15].

Виконання вимог Tier III Додатку VI МАРПОЛ можливо виключно за рахунок використання додаткових технологій очищення випускних газів, найбільш ефективною з яких є система селективного каталітичного відновлення випускних газів (Selective Catalytic Reduction – SCR) [16-18]. Основною складовою цих систем є спеціальний реактор (SCR-реактор) в якому за рахунок використання спеціального реагенту відбуваються хімічні реакції, результатом яких становиться перетворення оксидів азоту NO_x до атомарного азоту N_2 . Кількість суден морського транспорту, головні та допоміжні двигуни яких обладнані системою SCR, щорічно збільшується [19-21]. При цьому постійно виникають завдання з визначення найбільш раціональних режимів експлуатації систем SCR.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В дослідженнях, що були присвячені використанню системи SCR на суднах морського транспорту, визначались якісні та кількісні показники процесу очищення випускних газів від оксидів сірки [22-24]. Це дозволило визначити рівень зниження емісії NO_x , який в залежності від умов експлуатації системи SCR знаходиться в межах 80...85 % та перебільшує аналогічний показники для інших систем, що сприяють видаленню оксидів азоту з потоку випускних газів [25-27].

Частина досліджень була присвячена визначенню впливу реагенту, що використовується в контурі SCR-реактору на ефективність процесу очищення випускних газів від з'єднань, що містять азот. При цьому було запропоновано ранжування реагентів за рівнем зниження емісії оксидів азоту [28, 29].

В деяких дослідженнях була визначена найбільш раціональна кількість реагенту, що подається до SCR-реактору [30, 31]. Розв'язання цього завдання сприяло організації роботи системи SCR за умовою максимального зниження емісії оксидів азоту з одночасним забезпечення утворення мінімальної кількості іншого шкідливого компоненту випускних газів – діоксиду вуглецю [32, 33].

Також існують дослідження з конструкційної оптимізації системи SCR та місця розміщення SCR-реактору в машинному відділенні судна [34, 35]. Це перш за все пов'язане зі зміною метацентричної висоти в разі використання системи SCR. Подібні питання особливо актуальні для суден середньої водотоннажності, які здійснюють океанські переходи знаходячись у баласті [36, 37]. В умовах зменшення осадки суден та відповідного збільшення висоти надводного борту в таких випадках та підвищених океанських чи морських хвилях зна-

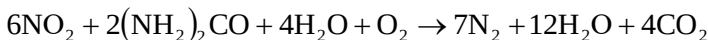
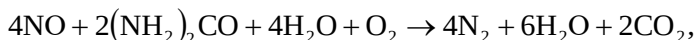
чення метацентричної висоти надає суттєвий вплив на стійкість судна [38-40].

Ефективність роботи системи SCR визначається температурою випускних газів, з якою вони потрапляють до SCR-реактору. При цьому існують лише поодинокі дослідження, що визначають взаємозв'язок між концентрацією оксидів азоту у випускних газах та їх температурою.

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення впливу температури випускних газів на ефективність системи SCR. При цьому розв'язання цього завдання здійснювалось під час знаходження судна у акваторіях спеціальних екологічних районів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на судні вантажомісткістю 106500 м³, призначеному для перевезення скраплених газів. Функції головного двигуна на судні забезпечували два однотипних дизеля 5X72DF фірми Hyundai-WinGD, функції допоміжних – три однотипних дизеля 6H35DF фірми Hyundai-HiMSEN. Кожний з дизелів (як головні, також й допоміжні) відноситься до класу «електронних» дизелів, в яких управління процесами подачі палива та випуску газів забезпечується електронною системою [41-43]. Кожний з дизелів був обладнаний окремою системою SCR. Параметри роботи системи SCR контролювалися автоматичною системою, візуалізація основних показників роботи системи SCR наведена у вигляді скрин-шоту на рис. 2.

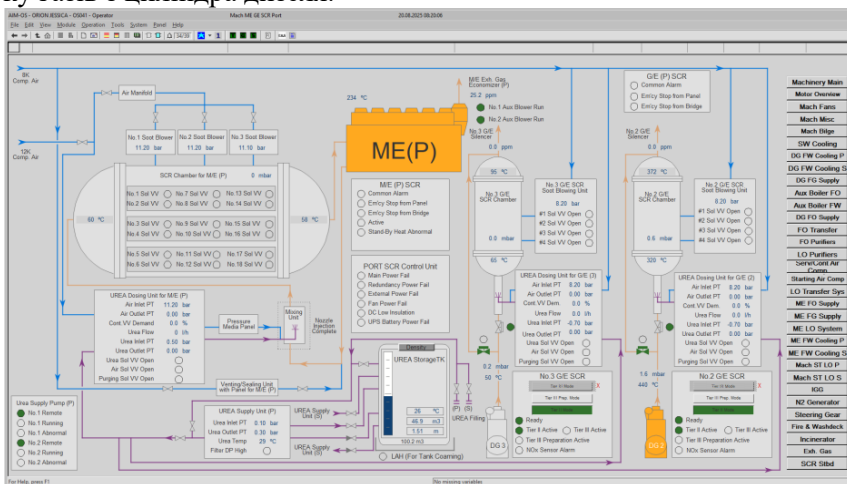
Інтенсивність хімічних реакцій перетворення оксидів азоту NO та NO₂ у атомарний азот N₂ під час їх взаємодії зі сечовиною 2(NH₂)₂CO, яка як реагент подається до SCR-реактору,



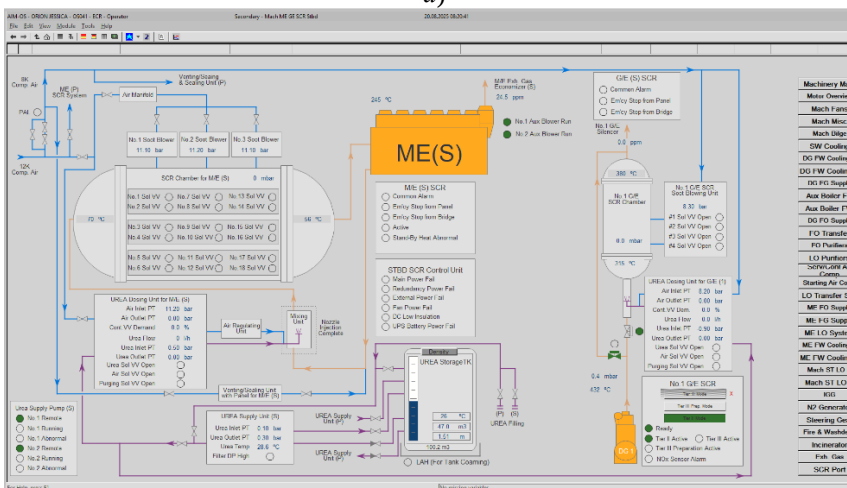
залежить від температури середовища в якому вони перебігають. Зі збільшенням температури випускних газів інтенсивність цих реакцій підвищується, що призводить до збільшення нейтралізації оксидів азоту та відповідного зменшення їх концентрації у складі випускних газів [44, 45].

Саме цим пояснюється той факт, що під час використання систем SCR на експлуатаційних режимах дизеля, що ближче до номінального, спостерігається більш зниження емісії оксидів азоту та відповідно менша їх концентрація у складі випускних газів.

Збільшення температури випускних газів, що поступають в контур SCR-реактору, можливо через організацію більш раннього випуску газів з циліндра дизеля.



а)



б)

Рис. 2. Скрин-шот параметрів роботи системи SCR суднових дизелів 5X72DF фірми Hyundai-WinGD та 6H35DF фірми Hyundai-HiMSEN:

а – обладнання лівого борту; б – обладнання правого борту

Для дизелів, обладнаних системою електронного керування процесом випуску (до яких відносяться дизелі 5X72DF фірми Hyundai-

WinGD, що використовуються на судні як головні) це досягається з центрального комп'ютеру управління (без додаткової зміни положення розподільного газовипускного механізму, як це забезпечується для дизелів з механічним управлінням процесом випуску) [46, 47]. Це принципово полегшує процес управління процесом випуску газів та дозволяє гнучко впливати на зміну їх температури. Відповідно до інструкції з експлуатації суднового дизеля 5X72DF фірми Hyundai-WinGD рекомендований діапазон зміни кута випередження випуску $\varphi_{\text{вп}}$ (саме за цим кутом відкривається випускний клапан та починається процес випуску газів з циліндрів) знаходиться в межах $\varphi_{\text{вп}}=50...75$ °пкв до НМТ (де пкв – поворот колінчатого валу, НМТ – нижня мертва точка) [48, 49]. Чим більш кут випередження випуску газів (тобто чим раніше відкривається випускний клапан та чим раніше гази виходять з циліндра дизеля) тим більша їх температура під час виходу з циліндра та, відповідно, більші температури у випускному колекторі та далі у SCR-реакторі.

Для визначення впливу температури випускних газів $t_{\text{вг}}$ (яка залежить від кута випередження випуску газів $\varphi_{\text{пв}}$) на емісію оксидів азоту NO_x виконувалось вимірювання цих параметрів в діапазоні рекомендованого інструкцією з експлуатації $\varphi_{\text{пв}}$. Зміна цих показників для різного навантаження дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD наведена в таблицях 1, 2.

Таблиця 1. Зміна температури випускних газів, $t_{\text{вг}}$, °C, суднового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD для різних кутів випередження випуску, $\varphi_{\text{пв}}$, °пкв

Навантаження на дизель, %	Кут випередження випуску, $\varphi_{\text{пв}}$, °пкв					
	50	55	60	65	70	75
50	307	312	319	332	347	365
60	309	315	322	336	351	372
70	312	318	326	340	358	381
80	315	321	331	346	367	392

Таблиця 2. Зміна концентрації оксидів азоту у випускних газах, NO_x , г/(кВт·год), суднового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD для різних кутів випередження випуску, $\varphi_{\text{пв}}$, °пкв

Навантаження на дизель, %	Кут випередження випуску, $\varphi_{\text{пв}}$, °пкв					
	50	55	60	65	70	75
50	3,28	3,25	3,18	3,11	3,02	2,92
60	3,17	3,12	3,02	2,92	2,78	2,66
70	2,90	2,78	2,64	2,48	2,35	2,19
80	2,62	2,51	2,38	2,25	2,11	1,96

Для кращої візуалізації результати, що наведені у таблицях 1, 2 подані у вигляді діаграм на рис. 3.

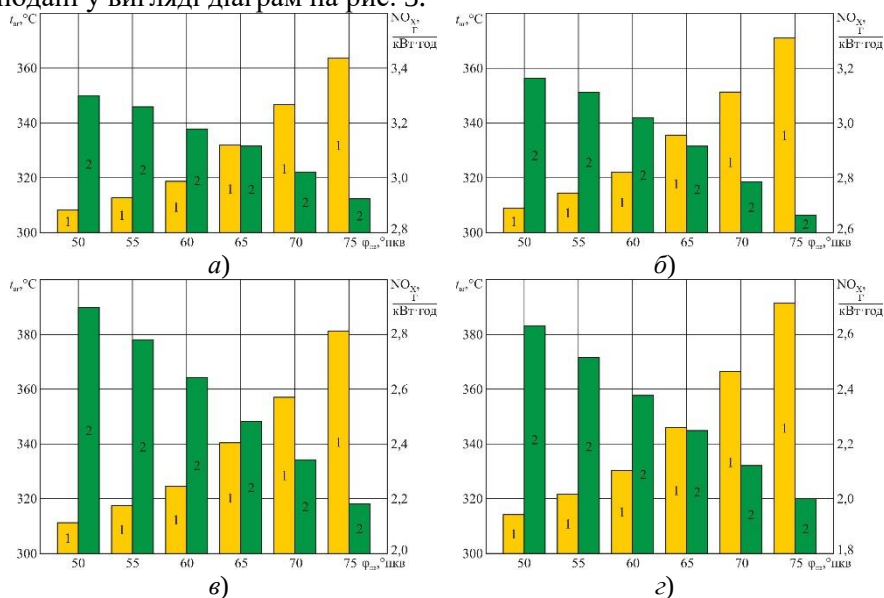


Рис. 3. Зміна температури випускних газів, $t_{вг}$, °C, та концентрації оксидів азоту у випускних газах, NO_x , г/(кВт·год), суднового дизеля 5X72DF фірми Hyundai-WinGD для різних кутів випередження випуску, $\varphi_{вг}$, °ПКВ

Під час досліджень контролювались всі необхідні показники роботи суднових дизелів та систем, що забезпечують їх функціонування, а також вимоги Міжнародних конвенцій щодо запобігання забруднення морського середовища та захисту людського життя.

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

1. Найбільшу ефективність щодо зниження емісії оксидів азоту системи SCR набувають за умовою максимально можливих температур випускних газів, що потрапляють у контур SCR-реактору. Управління температурою випускних газів суднових дизелів можливо за рахунок зміни кута випередження випуску.

2. Для суднового дизеля 5X72DF фірми Hyundai-WinGD для експлуатаційних режимів, що відповідають 50...80 % від його номінального навантаження, встановлено, що зміна кута випередження ви-

пуску у діапазоні 55...70 °Кв сприяє підвищенню температури випускних газів та через це зменшує рівень емісії оксидів азоту.

3. Досягнення мінімально можливих за умовою експлуатації суднового дизеля значень концентрації оксидів азоту у випускних газів особливо актуально під час знаходження суден у зонах спеціального екологічного контролю – морських районах, в яких діють більш суворі вимоги щодо емісії оксидів азоту та в яких з боку наглядових органів виконується постійний моніторинг екологічних показників роботи суден.

4. Подальші дослідження будуть спрямовані на комплексне визначення впливу кута випередження випуску на екологічні та енергетичні показники роботи суднових дизелів.

Перелік використаних джерел

1. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport Systems and Technologies. 2024. Vol. 43. P. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.

2. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.

3. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. 2020. Вип. 41. С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.

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

5. 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. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

6. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and

Natural Sciences. 2018. № 7-8. P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.

7. Kuropyatnyk O.A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 203-211. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52992.

8. Двуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. 2021. № 3 (1). С. 1-12.

9. Levinskyi M.V., Shapo V.F. Adaptive control for technological type control objects // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1231. P. 565–575. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0_47.

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

11. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. Наук. праць. 2019. Вип. 1(58). С. 89-100.

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

13. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб. 2020. Вип. 26. С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.

14. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.

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

16. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

17. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

18. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

19. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2024. Вип. 2(40). С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.

20. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. Одеса: НУ «ОМА». С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120

21. 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>.

22. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2020. Вип. 41. С. 20-25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.

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

24. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to

Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

25. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. 2024. Вип. 1(39). С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.

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

27. Goolak S.; Riabov I.; Petrychenko O.; Kyrychenko M.; Pohosov O. The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel // *Advances in Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 17(2). [doi:10.1177/16878132251320236](https://doi.org/10.1177/16878132251320236).

28. 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*. 2021. № 7-8. P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

29. Petrychenko O. Levynskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. 2023. № 41. P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.

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

31. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 41. – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.

32. 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. P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

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

34. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2018. Вип. 38. С. 76-87.

35. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides // *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. №4(1(84)). P. 72–79. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.

36. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity Optimisation of a Main Marine Diesel Engine Electronic Speed Governor // *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24(11). P. 9-19. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).

37. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // *International Journal of GEOMATE*. 2023. Vol. 25. № 109. P. 125-132. DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312>.

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

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

40. Petrychenko, O.; Levinskyi, M.; Goolak, S.; Lukoševičius, V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.

41. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. 2023. Вип. 47. С. 23-31. doi: 10.31653/smf47.2023.23-31.

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

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

44. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides // *Technol-*

ogy Audit and Production Reserves. 2025. Vol. 4(1(84)). P. 72–79. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.

45. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants*/ 2025. № 13. P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

46. Kučera O., Pišt'ek V., Fomin O., Kučera P., Sagin S. Measuring Device for More Precise Mistuning Identification of Integrated Bladed Discs // *Symmetry*. 2025. Vol. 17(5). P. 717. <https://doi.org/10.3390/sym17050717>.

47. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 40. С. 12-16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.

48. 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. С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

49. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

10.31653/smf50.2025.80-92

Муравйов Г.М., Шумілова К.В., Мальцев А.С.

Національний університет «Одеська морська академія»

УДОСКОНАЛЕНА ЗМІСТОВНА МОДЕЛЬ ПЛАНУВАННЯ КООРДИНАТ ПЕРЕХОДУ АВТОНОМНОГО СУДНА В РЕЙСОВОМУ ЦИКЛІ НА ОБШИРНОМУ МІЛКОВОДДІ

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Еволюція розвитку морських автономних надводних суден (MASS – marine autonomous surface ship) принесла значний прогрес у морській автоматизації перевезень вантажів, використовуючи штучний інтелект (AI – artificial intelligence) для підвищення точності планування координат маневрування в рейсовому циклі та ефективності управління його переходом.

Незважаючи на ці досягнення, складність мілководних середовищ, таких як непередбачувані коливання глибин, підводні перешкоди та підвищений гідродинамічний опір, залишається постійною проблемою. Навігація на мілководді має вирішальне значення для операцій у прибережних регіонах, внутрішніх водних шляхах і портах, де безпечне та ефективне маневрування має першорядне значення.

Автономні моделі суден переважно були оптимізовані для глибоководних умов, тому важко адаптувати їх до складних вимог мілководдя. У цих середовищах автономні судна повинні адекватно коригувати свій курс і швидкість у відповідь на непередбачувані гідродинамічні сили, близькість морського дна та наявність навігаційних небезпек, таких як піщані мілини, скелі та занурені уламки. Крім того, ці регіони часто потребують ретельного навігаційного контролю через близькість навігаційних небезпек, високу щільність руху, вузькі канали та швидку зміну факторів навколишнього середовища, таких як припливи та течії. Основною метою цього дослідження є розробка покращеної моделі планування координат переходу, яка точно відображає рейсовий цикл автономних суден на мілководді. Ця модель включає вдосконалене гідродинамічне моделювання, обробку даних у реальному часі та керовані штучним інтелектом алгоритми прийняття рішень, розроблені для оптимізації стратегій руху судна та управління ризиками в реальних сценаріях мілководдя.

Модель розглядає швидкісне просідання судна, яке збільшується на мілководді за рахунок зменшення запасу води під кілем судна та його швидкості. Враховуючи такі фактори, модель покращує маневреність судна, одночасно забезпечуючи економію палива та екологічну стійкість. Ключовою інновацією в цьому дослідженні є інтеграція методів тренажерного навчання, які дозволяють автономному судну вивчати та адаптувати свою поведінку на основі даних про навколишнє середовище, зібраних у режимі реального часу. Ця адаптивна структура дозволяє судну прогнозувати та зменшувати ризики, пов'язані з рухом на мілководді, через несподівану появу та необхідність уникнення підводних небезпек.

Використання запропонованої удосконаленої змістовної моделі планування координат для обширного мілководдя, при належному використанні автоматичної системи підтримки прийняття рішень з маневрування, дозволяє значно підвищити навігаційну безпеку переходу автономних суден на мілководді, що визначає актуальність поставленої проблеми.

Об'єкт дослідження: процес планування координат переходу в рейсовому циклі автономного судна в умовах плавання на мілководді.

Предмет дослідження: спосіб оптимізації маршруту автономного судна в режимі реального часу для планування координат руху в рейсовому циклі на обширному мілководді.

Запит практики: підвищення навігаційної безпеки переходу судна та мінімізації ризику виникнення морських аварій для забезпечення безаварійного переходу автономних морських суден в рейсовому циклі у мілководних регіонах, в тому числі при навігаційних і кібернетичних ризиках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Пошкодження програмного забезпечення електронних навігаційних систем і приладів морського судна виникає через інтенсивне зростання кібератак, які створюють міжнародні кіберзлочинці, що призводить до значних проблем в судноплаванні [1]. Такі джерела небезпеки характеризуються кількісними та якісними параметрами, які впливають не тільки на навігаційну безпеку, але й викликають передаварійний стан судна. Причиною виникнення навігаційних і кібернетичних ризиків є відсутність інформації про вірогідність їх появи, коли екіпаж судна терміново змушений перейти на аварійне управління маневруванням. Такий перехід починається із планування

координат шляху в рейсовому циклі траєкторними точками (ТТ), та визначення аварійно-небезпечних ділянок, шляхом пошуку таких, де сталися аварії в минулому або аналізу навігаційного забезпечення шляху переходу методом скріншоту.

В роботі [1] розроблено змістовну модель планування координат шляху та способи управління навігаційними ризиками. Рекомендується постійне використання розглянутої системи контролю за бічним зсувом і шириною маневреної полоси, для своєчасного коригування недопустимих значень індивідуальних навігаційних параметрів виконуваної морської операції, при компенсації відхилення від планового шляху. В той же час в роботі не розглянуто вплив мілководдя при русі судна з малим запасом води під кілем в каналах, на фарватерах, в припортових акваторіях та при заході/виході із порту, коли запас води під кілем суттєво впливає на точність планування шляху ТТ і управління маневруванням при морських операціях.

Поглиблене дослідження кіберризиків, які виникають під час рейсового циклу морського судна розглянуто в статті [2]. Такий підхід дозволяє розділити рейс на конкретні етапи: планування координат переходу ТТ; відхід із порту початку рейсового циклу; захід в порт; перехід, під час якого виконуються різноманітні морські операції, включаючи постановку на якір, розходження, рух на мілководді, рух в умовах кібернетичних атак та ін.

Аналіз роботи ММО і Великобританії з удосконалення законодавства для регулювання нормативних актів, які пов'язані з проблемами кібербезпеки морських автономних надводних суден (MASS) приведено в роботі [3]. Він підкреслює унікальні ризики, пов'язані з впровадженням суден без екіпажу і наголошує на необхідності комплексних міжнародних механізмів для захисту цих суден від кіберзагроз.

Розвиток морської кібербезпеки, на основі систематичного огляду наукової літератури представлено в роботі [4]. Встановлено причини появи впливу кіберзлочинців на процес роботи морських суден та значний вплив на суднові навігаційні прилади і зв'язок між ними.

Систематизований огляд взаємодії людини та систем штучного інтелекту, які використовуються при експлуатації автономних суден розглянуто в роботі [5]. Зазначається, що люди-оператори берегових центрів дистанційного управління і контролю за рухом суден взаємодіють із складними автономними системами, які використовуються на цих суднах. Виконано аналіз еволюції таких систем та

контроль оператором параметрів автоматичного руху та роботи систем на основі штучного інтелекту у реальному часі та управління їх помилками при необхідності.

Взаємодію при розходженні між звичайними морськими суднами з екіпажем і автономними суднами, розглянуто в роботі [6]. Показано, що вирішальне значення при взаємодії оператора дистанційного управління і капітана судна має чітке спілкування та розуміння намірів кожного із них. Прозорість експлуатації автоматичного судна забезпечується чітким дотриманням міжнародних правил плавання і розходження, що визначає його процеси та послідовність робочих етапів. Отже, виникає необхідність розробки інформаційних систем для автономних суден, які повинні повідомляти про наміри зміни параметрів маневрування у зрозумілій капітану формі, забезпечуючи безперебійну взаємодію між звичайними суднами та автономними – без екіпажу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Головне завдання: розробка удосконаленої змістовної моделі планування координат переходу автономного судна в рейсовому циклі в умовах обширного мілководдя.

Основна мета – забезпечення високого рівня планування і контролю маневрування автономного судна, навіть у випадках кібернетичних атак. Для цього вдосконалено інноваційну модель планування координат руху в рейсовому циклі траєкторними точками, яка враховує вплив мілководдя на маневрені характеристики судна, при розрахунку координат переходу. Це дозволяє забезпечити підвищення точності їх розрахунку ТТ і використовувати методи динамічного позиціонування для оперативного контролю бічного зсуву.

Мета дослідження потребує виконання наступних завдань:

- розробка ефективної моделі планування координат автономного судна в умовах мілководдя, з урахуванням кібернетичних загроз, яка вимагає системного підходу;
- удосконалення змістовної моделі планування координат ТТ, яка передбачає організацію рейсового циклу з використанням ретельного аналізу навігаційної безпеки за методом пошуку аварійно-небезпечних ділянок, в яких сталися аварійні випадки в минулому або методом скріншоту;
- використання методів оперативного переходу на обсерваційне зчислення при появі кібератак, що забезпечує аварійне управління маневруванням.

Методи дослідження.

При розрахунках координат шляху при плаванні на обширному мілководді використовувалися рівняння нерозривності Бернуллі та емпіричні моделі врахування впливу ступені мілководдя на маневрені характеристики судна, просідання та втрату швидкості.

При розрахунках вірогідної ширини маневреної полоси на постійному курсі та при криволінійних траєкторіях використовувалися дані про зону нестійкості діаграми управляємості судна, точність суднових навігаційних приладів для вимірювання навігаційних параметрів та її відповідність до радіальної середньоквадратичної похибки (СКП), згідно вимог ММО – з 95% вірогідністю і положення центру ваги та абсциси полюсу повороту, для визначення ширини маневреної полоси при криволінійному русі.

Для підтримки допустимого рівня навігаційних ризиків, перед виходом в рейсовий цикл із складними навігаційними навантаженнями на головний двигун, необхідно виконати позачерговий технічний огляд та ретельно задокументувати факт і зміст операцій його проведення в судновому та машинному журналах. Однак при цьому виникає цілий ряд проблем, включаючи точність планування координат на мілководді, значний негативний вплив мілководдя на дистанційну систему автоматичного управління, а також вплив на її роботу кібернетичних атак. Тому необхідно створити удосконалену змістовну модель, яка б враховувала зазначені вимоги. Така модель повинна враховувати наступне: ретельний вибір координат безпечних ШТ на геодезичних лініях карти або рівновіддалених від навігаційних небезпек; ширину суднохідної частини в районі ШТ, яка враховує розширення ширини маневреної полоси на повороті, приблизно на 35%; наявність аварійно-небезпечних ділянок на переході, які визначаються пошуком районів переходу, в яких сталися аварійні випадки в минулому, або аналіз навігаційного обладнання на шляху переходу для пошуку небезпечних ділянок методом скріншоту [7-9].

Після цього формується таблиця ШТ переходу, в якій розраховується: ІК із попередньої ШТ в наступну; відстань S із попередньої ШТ в наступну; координати ШТ переходу, кут повороту $\Delta\theta_i$, кут перекладки руля δ , та ступінь мілководдя H/T (відношення глибини моря під кілем H і середньої осадки T на мідель шпангоуті), які приведено в табл. 1.

Таблиця 1. Шляхові точки переходу судна «Yara Birkeland» з порту Вілмінгтон до порту Маркус Хук

№ ШТ	К°	Широта φ	Довгота λ	Відстань S , миль	Кут повороту $\Delta\theta_i$	H/T	Кут пере- кладки керма δ
0	-	39° 43.09 N	075° 31.24 W	0.00	-	1.42	-
1	104	39° 43.05 N	075° 31.05 W	0.15	2	1.42	5
2	111	39° 42.88 N	075° 30.44 W	0.5	96	1.42	15
3	017	39° 44.22 N	075° 30.07 W	1.3	60	1.42	15
4	021	39° 44.49 N	075° 29.88 W	0.3	5	1.42	5
5	031	39° 44.97 N	075° 29.55 W	0.6	15	1.42	5
6	035	39° 46.43 N	075° 28.14 W	1.8	52	1.43	10
7	041	39° 47.20 N	075° 27.22 W	1.1	35	1.43	10
8	051	39° 47.43 N	075° 26.79 W	0.4	45	1.44	10
9	057	39° 48.23 N	075° 25.09 W	1.98	0	1.45	0
10	023	39° 48.47 N	075° 24.95 W	0.00	27	1.45	5

Для досягнення поставленої мети в статті було використано систему підтримки прийняття рішень (СППР) шляхом інтеграції нових функціональних можливостей у навігаційну систему OpenCPN. Це вдосконалення враховує визначення маневрених характеристик судна для поточного стану завантаження в рейсовому циклі, геометричне розташування портової суднохідної акваторії, шляхом визначення безпечних координат ШТ, погодні умови та системи управління рухом [1].

Запропоновані рішення реалізовані через використання плагіну «Path Planning IS», інтегрованого в OpenCPN, що дозволяє автоматизувати процес розрахунку координат ТТ для планування руху в рейсовому циклі.

Для розрахунку інерційно-гальмівних характеристик було використане диференційне рівняння (1), яке при прямолінійному русі записується так:

$$(m + \lambda_{11}) \cdot \frac{dv}{dt} \cdot \cos \alpha_n + c_x \rho v^2 \cdot S_K / 2 \pm P_e = 0, \quad (1)$$

де P_e – сила упору гвинта; m – маса судна; λ_{11} – приєднані маси корпусу судна по осі X ; v – швидкість судна відносно води; α_n – кут дрейфу при повороті; c_x – безрозмірний коефіцієнт по осі X ; ρ – ма-

сова щільність води; S_K – площа проекції корпусу судна на мідель-шпангоут.

При розв'язанні рівняння (1) було введено ряд припущень, які зазвичай приймають при цьому, тому що вони спрощують розрахунок шляху і часу гальмування і забезпечують точність, яка є необхідною згідно з вимогами нормативних документів України та ММО. Основні з припущень, які будемо використовувати далі, наступні:

1. Приєднана маса води по осі X наближено дорівнює 10% від маси судна ($m_x = 1,1 \cdot D$) і залишається незмінною при маневруванні.

2. Залежність опору води і повітря від швидкості має квадратичний характер. При розрахунковому та експериментальному визначенні сили опору води другий член рівняння (1) представляють у вигляді κv^2 (2). Тоді рівняння (1) прийме вигляд:

$$m_x \cdot \frac{dv}{dt} + \kappa v^2 \pm P_e = 0 \quad (2)$$

3. Коефіцієнти опору води і повітря κ_n під час маневрування – постійні.

4. Упор гвинта в процесі активного гальмування змінюється за залежністю (3):

$$P_e = P_{\max} \cdot \left(1 - \frac{v_x^2}{v_n^2} \right), \quad (3)$$

де $P_{\max}$ – значення сили упору гвинта в момент зупинки судна;

v_x – поточна швидкість;

v_n – швидкість в момент початку обертання гвинт на задній хід.

5. При маневруванні нове призначене число обертів сягає свого значення в момент подачі команди.

До характеристик управляємості відносяться два види параметрів – стійкості і повороткості. Стійкість на курсі характеризують наступні параметри: постійна часу затримки повороту $T(\delta)$; стійкість на курсі, критерій Q ; зона нестійкості $\pm \varpi_0$, $\pm \delta_{op}$; параметри отримання повороту, час $t_0(\delta)$ і кут перекладки керма $\theta_0(\delta)$.

До характеристик повороткості відносять геометричні параметри кривої циркуляції: висув $\ell_1(\delta)$; пряме зміщення $\ell_2(\delta)$; тактичний діаметр $D_m(\delta)$; діаметр сталої циркуляції $D_y(\delta)$; період циркуляції $T_y(\nu, \delta)$.

Особливістю великотоннажних суден являється доповнення до викладеного вище, а саме – необхідність розглядати додатково ще один параметр – зворотне зміщення $\ell_3(\delta)$. Для звичайних суден його, як правило, навіть не розглядають. Причиною тому є його невелике значення, яке порівняне з точністю траєкторних вимірювань. При призначенні режиму руху судна використовують умовний розподіл всієї потужності головного двигуна (ГД) на частини, рівні 0,7; 0,5; 0,3 від потужності повного переднього ходу ГД.

Для розрахунку маневрених характеристик автономних суден була використана комп'ютерна програма «DENIS-2», яка була розроблена для одnogвинтового судна та виконує побудову графіків для всіх видів гальмування.

Підтримання безпечного запасу води під кілем (UKC – Under Keel Clearance) стає першорядним завданням, яке вимагає постійного моніторингу глибини, припливів, хвиль і власної динаміки судна. Існуючі нормативні акти, які часто зосереджуються на уникненні зіткнень у відкритій воді, можуть не відповідати належним чином конкретним ризикам посадки на мілину в цих середовищах [1]. Після того, як визначені всі необхідні дані, виконується розрахунок за програмою «DENIS-2» для стану в вантажі і баласті та глибокої води і представляється в навігаційному комп'ютері у вигляді двох таблиць.

Після цього виконується інтерполяція даних про маневрені характеристики для поточного стану судна, і розраховуються коефіцієнти мілководдя для кожного елементу повороткості [10] за формулами (4):

$$\begin{aligned}\ell_1^{H/T} &= \ell_1^{ep} \cdot \kappa_{\ell_1}; \quad \ell_2^{H/T} = \ell_2^{ep} \cdot \kappa_{\ell_2}; \\ D_T^{H/T} &= D_T^{ep} \cdot \kappa_{D_T}; \quad D_y^{H/T} = D_y^{ep} \cdot \kappa_{D_y},\end{aligned}\quad (4)$$

де $\kappa_{\ell_1}, \kappa_{\ell_2}, \kappa_{D_T}, \kappa_{D_y}$ – коефіцієнти мілководдя для кожного параметра повороткості.

Коефіцієнти мілководдя (5) представлено у вигляді лінійної регресії:

$$\kappa = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2, \quad (5)$$

де $x_1 = (T/H)$, а $x_2 = (T/H)^2$.

Результати виконаного обчислення використано у вигляді характеристик повороткості для автоматичного процесу розрахунку координат ТТ плану руху в рейсовому циклі за методом відрізків або перпендикулярів, шляхом використання плагіну «Path Planning IS» [10], інтегрованого в OpenCPN. Вони формуються у вигляді суми матриць прямолінійних і криволінійних ділянок шляху M_Σ . Після цього виконується прокладка на електронній навігаційній карті (рис. 1).

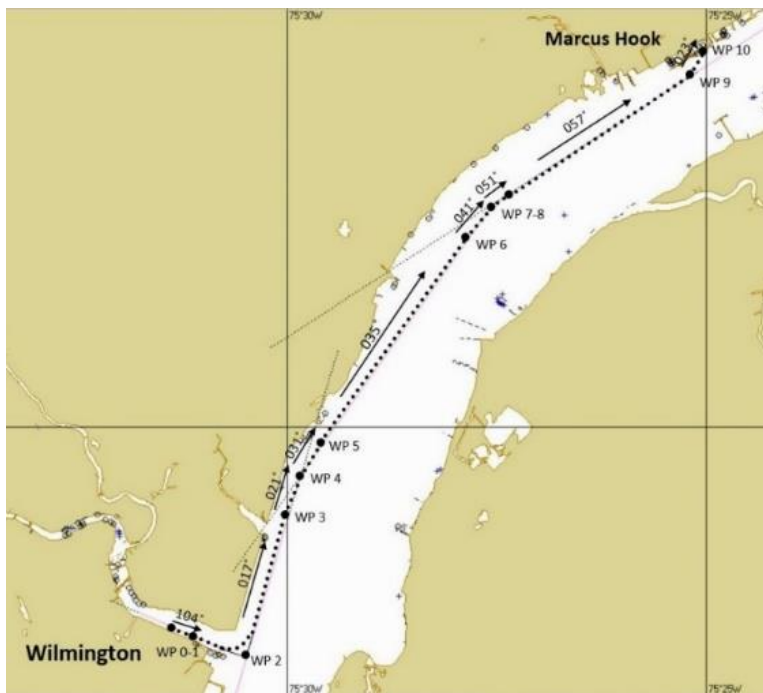


Рис. 1. Перехід судна «Yara Birkeland» з порту Вілмінгтон до порту Маркус Хук

При цьому сумарна матриця (6) координат траєкторних точок в процесі маневрування буде мати наступний вигляд:

$$M_{\Sigma} = M_{01} + M_{11} + M_{12} + M_{12} + M_{23} + M_{13} + M_{34} + M_{14} + M_{45} + M_{15} + \\ + M_{56} + M_{16} + M_{67} + M_{17} + M_{78} + M_{18} + M_{89} + M_{19} + M_{Г}. \quad (6)$$

Маневрені характеристики автономного судна т/х «Yara Birkeland» для глибокої води, які інтерпольовані на поточний стан в рейсовому циклі при відході із порту та уточнені на ступінь мілководдя, приведено в табл. 2.

Таблиця 2. Координати ШТ виходу з порту Вілмінгтон автономного судна «Yara Birkeland»

№ ШТ	К°	Широта φ	Довгота λ	Відстань S , миль	Кут повороту $\Delta\theta_i$	H/T	Кут перекладки керма δ
0	-	39° 43.09' N	075° 31.24' W	0.00	-	1.42	-
1	104	39° 43.05' N	075° 31.05' W	0.15	2	1.42	5
2	111	39° 42.88' N	075° 30.44' W	0.50	96	1.42	15

Запобігання кібернетичним загрозам передбачає ретельну підготовку резервного обладнання на містку та в машинно-котельному відділенні для оперативного використання за потреби.

Використання системи виявлення аномалій на основі штучного інтелекту, яка відстежує і аналізує дані в реальному часі, для виявлення моменту появи кібератак, дозволяє ініціювати превентивні контрзаходи для підготовки судна і операторів дистанційного контролю і управління маневруванням [11-12].

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Розробка високоточного руху траєкторними точками передбачає використання адаптивних алгоритмів для динамічного врахування факторів, таких як маневрені характеристики судна, вплив погодних умов, розташування перешкод і загрози цілеспрямованих кібератак, які можуть порушити роботу навігаційних систем. Це сприяє підтриманню допустимого рівня навігаційного та кібернетичного ризику для системи маневрування, навіть у випадках спроб порушити її функціонування [13-15].

Процес адаптації методу планування руху ТТ під час рейсового циклу потребує використання сучасних систем моніторингу параметрів навігаційної безпеки, включаючи радар, гідролокатор та багатоспектральні датчики індивідуальних параметрів навігаційних морських операцій. Ці інструменти в режимі реального часу відсте-

жують зміну параметрів руху судна та умов навколишнього середовища, таких як рельєф морського дна або поява нових підводних об'єктів та дозволяють своєчасно коригувати курс та швидкість судна, відповідно до їх впливу.

Подальші дослідження в цьому напрямі відкривають можливості для розширення використання автономних суден у мілководних регіонах з високою інтенсивністю руху, стиснених водах та при наявності ризиків кібернетичних загроз [16]. Таким чином, системний підхід до планування траєкторій для автономних суден в районах обширного мілководдя і використання систем підтримки прийняття рішень при маневруванні дозволяє забезпечити допустимий рівень навігаційної безпеки навіть у складних умовах навігаційних і кібернетичних ризиків [17].

Перелік використаних джерел

1. Шумілова К., Шумілов Д. Технологічні ризики при маневруванні морського судна в рейсовому циклі. *Primedia eLaunch*, Boston, USA. 2024. 203 p.
2. Shumilova K., Shumilov D., Maltsev A. Classification of Cyber Risks for Sea Vessel's Voyage Cycle. *Transactions on Maritime Science*. 2024. Vol. 13 (1). <https://doi.org/10.7225/toms.v13.n01.w20>.
3. Fenton A. J., Chapsos I. Ships without crews: IMO and UK responses to cybersecurity, technology, law and regulation of maritime autonomous surface ships (MASS). *Frontiers in Computer Science*. 2023. Vol. 5. 1151188.
4. Bolbot V., Kulkarni K., Brunou P., Banda O. V., Musharraf M. Developments and research directions in maritime cybersecurity: A systematic literature review and bibliometric analysis. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2022. Vol. 39. –<https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2022.100571>.
5. Veitch E., Alsos O. A. A systematic review of human-AI interaction in autonomous ship systems. *Safety science*. 2022. Vol. 152. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105778>
6. Porathe T. Interaction between Manned and Autonomous Ships: Automation Transparency. In *Proceedings of the 1st International Conference on Maritime Autonomous Surface Ships*, Busan, Korea, 8-9 November 2018.
7. Мальцев А. С., Шумілова К. В., Шумілов Д. І., Муравйов Г. М. Система управління кібербезпекою маневрування морського суд-

на при рейсовому циклі : пат. МПК G08G 3/02 (2006.01) ; № a202300014 ; заявл. 03.01.2023 ; опубл. 09.08.2023, Бюл. № 32, С. 139-140. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1722440/>.

8. Мальцев А. С. Навігаційна система гарантованого безпечного керування маневруванням суден без екіпажу. *Науковий вісник ХДМА*. 2021. №1(24). С. 38-56.

9. Шумілова К. В., Мальцев А. С. Управління індивідуальними навігаційними ризиками рейсового циклу морського судна. *Судноводіння*. 2022. Вип. 33. С. 128-142. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.33.2022.128-142>.

10. Maltsev A. S. Navigation support for the process of managing the maneuvering of a sea vessel: maneuvering booklet. *Eliva Press*. 2023. 218 p.

11. Shumilov D. Planning of motion coordinates and maneuvering control of a marine vessel when anchoring under cybernetic risk. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2025. Vol. 4(1). P. 141-156. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250401.12>.

12. Shumilov D. Collision avoidance of the sea vessels during cyber attacks in the voyage cycle. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2024. Vol. 3(4). P. 115-129. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240304.12>.

13. Maltsev A., Surinov I., Shumilova K. Selection of waypoints for planning the ship's voyage cycle. *International scientific innovations in human life. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House, Manchester, United Kingdom*. 2022. P. 230-242.

14. Шумілова К. В. Розробка способу планування навігаційних ризиків при підготовці рейсового циклу судна. *Science and Education a New Dimension*. 2022. X(34), Issue 268. P. 23-31. <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2022-268X34-05>

15. Onishchenko O., Shumilova K., Volyanskyy S., Volyanskaya Y., Volianskyi Y.: Ensuring Cyber Resilience of Ship Information Systems. *TransNav*. 2022. Vol. 16. No. 1. P. 43-50. doi:10.12716/1001.16.01.04,

16. Шумілова К. В. Реалізація стратегії кібербезпеки в системі управління безпекою судна. *Судноводіння*. 2021. Вип. 31. С. 99-107. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.31.2021.99-107>.

17. Шумілов Д. І., Шумілова К. В., Мальцев А. С. Система аварійного управління маневруванням морського судна в умовах кібернетичних атак : пат. МПК G08G3/02 ; № a202404034 ; заявл.

12.08.2024; опубл. 16.04.2025, Бюл. № 16/2025.
<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1814442>.

10.31653/smf50.2025.93-101

Половинка Е.М., Мартинов С.В.

Національний Університет «Одеська Морська академія»

ШВИДКІСНА ХАРАКТЕРИСТИКА ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА СУДОВОГО СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасні суднові дизелі вимагають значного поліпшення якості сумішоутворення, згоряння й зниження шкідливого впливу газів, що йдуть, на навколишнє середовище. Отже, необхідне вдосконалювання паливної апаратури, яке полягає в підвищенні можливості регулювання тиску впорскування залежно від режиму дизеля, керування характеристикою впорскування, організації багатофазного впорскування, впровадженні електронного керування процесом паливоподачі. Реалізувати ці вимоги дозволяє застосування акумуляторних паливних систем з електронним керуванням.

З моменту своєї появи в 1997 році акумуляторні паливні системи постійно удосконалюються. Причому рівень досконалості всієї паливної апаратури в більшості випадків оцінюють по технічному рівню застосовуваних форсунок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Можна виділити кілька напрямків удосконалювання існуючих акумуляторних систем. Одним з основних напрямків є підвищення тиску впорскування (до 220 МПа), що разом з багатофазним впорскуванням позитивно позначається на показниках двигуна [1, 2].

Перспективні є форсунки з регульованими розпилювачами CVN (Coaxial Vario Nozzle) фірми Bosch. Дві, розташовані одна в іншій голки, відкривають і закривають свій ряд розпилюваних отворів.

Ще однієї перспективною розробкою є форсунка за технологією HADI (Hydraulically Amplified Diesel Injector) фірми Bosch. Це так звані «електрогідравлічні насос - форсунки» з тиском до 250 МПа.

Ведуться роботи із удосконалювання приводу голки розпилювача - пьезоактуаторів і швидкодіючих електромагнітних клапанів [3].

У [4 - 6] подано реєстрацію процесів згоряння паливного факелу, отриману на спеціальному лабораторному двигуні. Основні результати проведеного дослідження полягають в оцінці впливу параметрів впорскування на процеси сумішоутворення та згоряння палива.

За даними візуального дослідження використання комбінації зменшених отворів розпилювача спільно з підвищеним тиском палива (до 160 МПа) системи з електронним керуванням суттєво покращує згоряння струменя важкого палива.

Застосування керованої характеристики впорскування знижує температуру полум'я аналогічно ефекту запізнення впорскування палива.

За візуальними оцінками застосування пілотного впорскування з електронним управлінням дозволяє уникнути негативних наслідків надмірної затримки самозаймання та догоряння при використанні низькоцетанових полегшених фракцій як морське паливо.

Однієї з основних областей дослідження дизелів є сумішоутворення [7], що критично визначає процес згоряння й скорочення викидів [8, 9]. Параметри паливного сумішоутворення залежать від багатьох факторів, серед інших, таких, як тиск впорскування, навантаження двигуна, геометрії розпилювача [10, 11], закону подачі.

Вплив закону подачі на характеристики згоряння й індикаторний процес на комп'ютерній (CFD) моделі досліджував також Тау [12]. Можливості такого моделювання незрівнянно ширше як в обсязі інформації, так і глибини аналізу.

Сучасний рівень розвитку технології паливоподачі дозволяє не тільки вдосконалювати сумішоутворення, але й більш точно управляти впорскуванням, створюючи передумови для нових стратегій [13 - 15] і можливостей дослідження.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка комплексу показників, що характеризують гідродинамічні процеси в гібридній системі паливоподачі. Завдання дослідження полягало у визначенні кількісних параметрів процесу впорскування й закономірностей їх зміни при роботі зі швидкісної характеристики.

Виклад основного матеріалу дослідження. Схема гібридної системи впорскування палива (ГСВП) представлена на рис.1. У якості базової системи паливоподачі (БСП) використана штатна паливна апаратура судового середньообертового двигуна 6ЧН25/34. З'єднання БСП і акумуляторного модуля (АМ) виконане золотниковим клапаном з комп'ютерним керуванням. АМ містить у собі паливний насос високого тиску (ПНВТ), акумулятор великого, малого об'єму й сполучні трубки високого тиску (ВТ). На вході в штатну систему БСП установлений золотниковий безповоротний клапан.

Система обладнана оптико-електронним датчиком обертання типу ВЕ-178, що видає 2500 імпульсів на 1 оберт вала, і опорну мітку початку відліку (МПВ) для кожного обороту вала.

Планом експерименту передбачалося одержання швидкісної характеристики ГСВП. У якості номінального призначений режим із частотою обертання розподільного вала $n_p = 250$ об/хв при виході рейки ПНВТ $m = 20$ мм. У реальних умовах експерименту діапазон $n_p = 53 - 252$ об/хв.

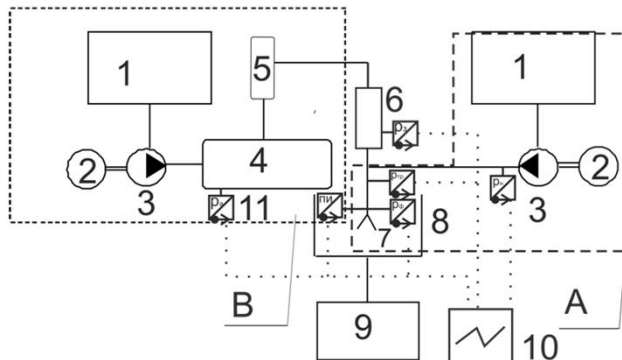


Рис. 1. Гібридна система впорскування палива: А - базова система паливоподачі; В - АМ; 1 - паливний бак; 2 - привід ПНВТ; 3 - ПНВТ; 4 - акумулятор великого обсягу; 5 - акумулятор малого обсягу; 6 - керуючий клапан - золотник; 7 - форсунка; 8 - паливний резервуар; 9 - резервуар збору палива; 10 - осцилограф; 11 - датчики тиску

Маркування знятих осцилограм прийнята: 1, 2, 3, 4 - ГСВП зі швидкостями зйомки $v_z = 0,5; 0,25; 0,5$ і $1,0$ м/с відповідно. Кожному експерименту відповідають свої постійні обороти n_p безмоторного стенда у діапазоні 53- 252 об/хв.

Кут початку подачі керуючого сигналу або кут включення $\varphi'_{\text{вкл}} = 60^\circ$ (повороту розподільного вала) ПРВ від МПВ й кут утримання $\varphi'_{\text{ут}} = 20^\circ$ ПРВ; тиск затягування пружини форсунки 115 бар; тиск в акумуляторі 125 бар. Тарировка датчиків тиску здійснювалася для кожної серії дослідів.

На рис. 2 представлена осцилограма паливоподачі ГСВП, де параметри, що описують роботу АМ, позначені штрихом «'», а величини без спеціальних міток - кількісні характеристики БСП.

Параметри, що описують роботу ГСВП, були прийняті наступні:

фазові: i'_z - кількість підйомів голки форсунки; z'_d - процентна частка підйому голки від максимального при основному упорскуванні;

$\phi'_{\text{вп}}$, $\phi_{\text{вп}}$ - загальний кут впорскування по кривій підйому голки (ПГ) при включенні акумуляторного модуля й штатної СПП відповідно; $\phi'_{\text{ф}}$ - тривалість коливання тиску на кривій $p_{\text{ф}}$ при подачі керуючого сигналу на золотник; $\phi'_{\text{зт}}$ - кут затримки зміни тиску в золотнику після подачі керуючого імпульсу - характеризує момент відкриття золотника; $\phi'_{\text{зпг}}$ - кут затримки підйому голки після подачі керуючого імпульсу; $\phi'_{\text{к}}$ - кут повороту розподільного вала між двома піками - період часу по куту повороту між двома коливаннями - підйомами голки;

тиску: $\Delta p'_{\text{ак}}$ - величина зміни тиску в акумуляторі; $\Delta p'_{\text{зол.у}}$ - усереднена величина зміни тиску в золотнику при роботі керуючого клапана; $\Delta p'_{\text{зол.нач}}$ - первісна зміна тиску в золотнику при відкритті золотникового клапана; $\Delta p'_{\text{зол.мах}}$ - максимальне значення зміни тиску в золотнику, що виникає при запиранні форсунки; $\Delta p_{\text{ф}}$, $\Delta p_{\text{тр}}$, $\Delta p_{\text{н}}$ і $\Delta p'_{\text{ф}}$, $\Delta p'_{\text{тр}}$, $\Delta p'_{\text{н}}$ - амплітуди зміни тиску форсунки, трубопроводу й насоса при основному упорскуванні й при спрацьовуванні золотника відповідно; $+\Delta p_{\text{ф}}$, $+\Delta p_{\text{тр}}$, $+\Delta p_{\text{н}}$ і $+\Delta p'_{\text{ф}}$, $+\Delta p'_{\text{тр}}$, $+\Delta p'_{\text{н}}$ - зростання тиску форсунки, трубопроводу й насоса щодо лінії залишкового тиску при основному упорскуванні й при роботі золотника відповідно; $-\Delta p_{\text{ф}}$, $-\Delta p_{\text{тр}}$, $-\Delta p_{\text{н}}$ і $-\Delta p'_{\text{ф}}$, $-\Delta p'_{\text{тр}}$, $-\Delta p'_{\text{н}}$ - падіння тиску $p_{\text{ф}}$ у форсунки, трубопроводу й насоса щодо лінії залишкового тиску при основному впорскуванні й роботі золотника відповідно.

Поряд із записом на фотопапір світлопроменевого осцилографа було проведено комп'ютерне осцилографування тиску у форсунці, що дозволило більш якісно оцінити параметри й характер зміни величини залежно від частоти обертання $n_{\text{р}}$ розподільного вала.

Комплексно розглянувши осцилограми, можна сказати, що на осцилограмах вдалося зафіксувати зміну тиску в акумуляторі, чого не можна було якісно оцінити з більш ранніх осцилограм дослідження ГСВП [16], де характер зміни тиску був хвильовою з малою амплітудою. Тут же можна побачити, що при мінімальних оборотах тиск в акумуляторі падає на ~ 11 бар і зі зростанням частоти обертання це значення зменшується до 6 бар.

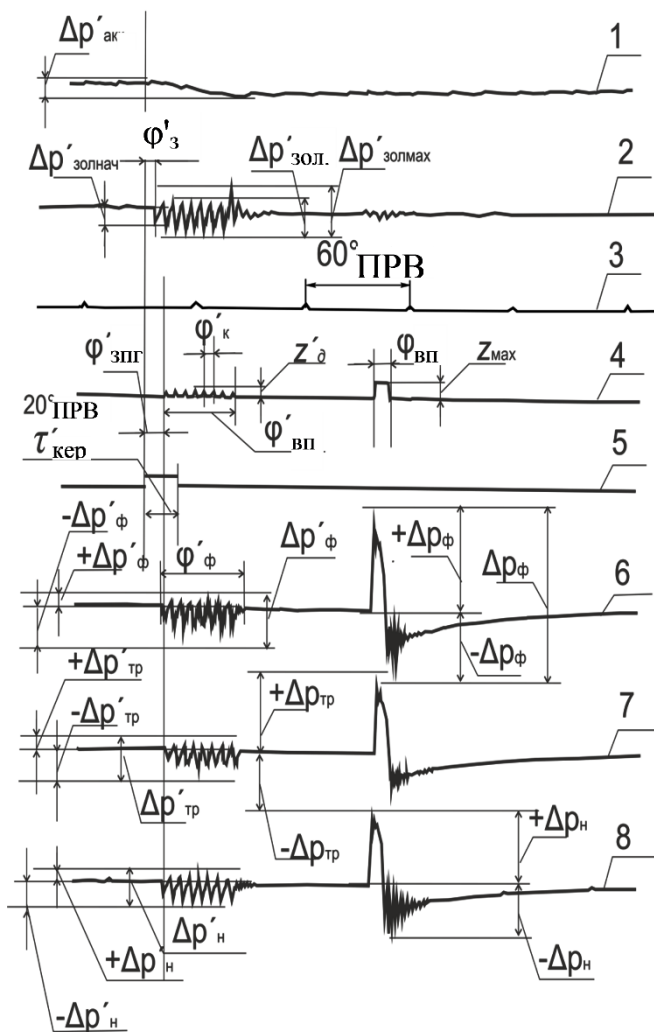


Рис. 2. Осцилограма ПП ГСВП при $n_p = 103$ об/хв.: 1 - тиск в акумуляторі $p_{ак}$, 2 - тиск у золотника $p_{зол}$, 3 - кутова оцінка 60° ПРВ ϕ_{60} , 4 - підйом голки форсунки ПГ, 5 - керуючий сигнал КЕР, 6 - тиск форсунки $p_{ф}$, 7 - тиск у трубопроводі $p_{тр}$, 8 - тиск ПНВТ БСП $p_{н}$

Залежність цих значень від числа оборотів, поряд з іншими параметрами, наведені на рис. 3.

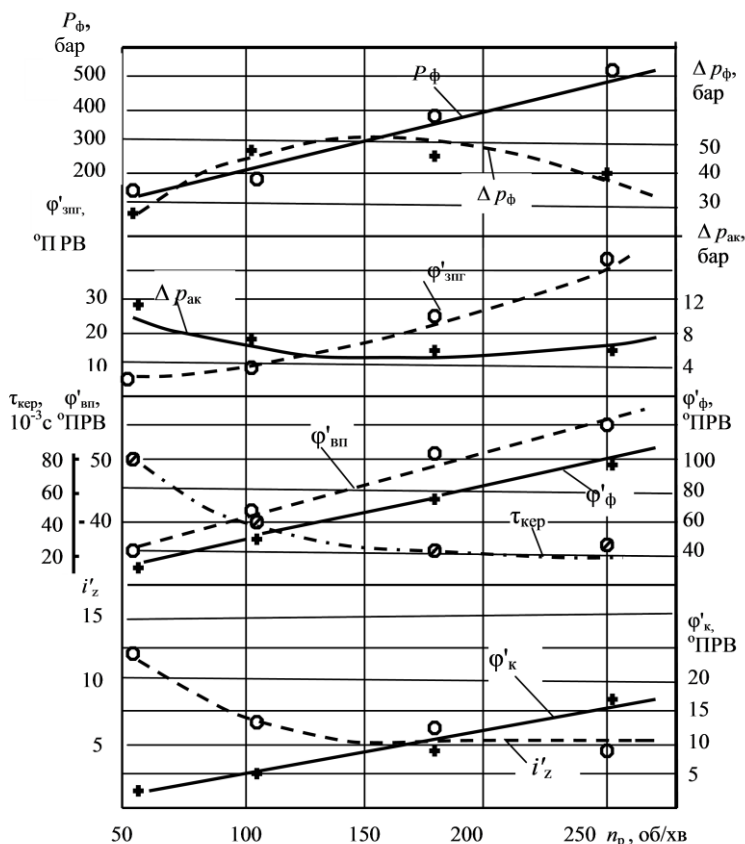


Рис. 3. Графік залежностей параметрів паливоподачі ГСВП від частоти обертання розподільного вала: $m = 20$ мм, $p_0 = 115$ бар, $p_{ак} = 125$ бар

При подачі керуючого сигналу (рис. 2) це величина знижується аж до посадки голки, і далі зростає до подачі наступного сигналу, що управляє. Зміна тиску елементах ГСВП відповідає закону переміщення голки. Так, при подачі сигналу, що управляє, золотник відкривається з деякою затримкою.

Момент відкриття золотникового клапана відповідає початку зміни тиску в елементах ГСВП.

Коли тиск у підігольчастій порожнині перевищує величину зтягування пружини, голка починає рух з кутом затримки впорскування $\phi'_{зпг}$, який зростає зі збільшенням числа обертів. Так, при максималь-

них обертах голка починає підйом із затримкою в $\varphi'_{\text{зпг}} = 44^\circ$ ПРВ (повний діапазон $\varphi'_{\text{зпг}} \sim 6-44^\circ$ ПРВ). Величина підйому голки z'_d всіх осцилограмах становить 40%.

При підйомі голки тиск в АМ знижується, що більш помітно при низьких частотах обертання розподільного вала - при $n_p = 53$ об/хв.

Тривалість впорскування $\varphi'_{\text{вп}}$ також зростає з оборотами. Кількість підйомів голки i'_z зменшується при збільшенні n_p , а тривалість коливань φ'_k збільшується за тих самих умов. По осцилограмі видно, що після останнього підйому голки на кривій тиску в золотнику є характерне коливання амплітуда якого $\Delta p'_{\text{золмах}}$ вище середнього значення, і є ознакою гідроудару в системі, що говорить про замикання системи з боку АМ. На кривій p_ϕ починається короткий період згасання коливань з великим коефіцієнтом згасання. Період зміни тиску форсунки φ'_ϕ більш тривалий у порівнянні з $\varphi'_{\text{вп}}$, через меншу затримку $\varphi'_{\text{зпг}}$.

У працюючої штатної системі підйом голки здійснюється до упору, що відрізняється від ПГ при відкритті золотника. Взявши значення ПГ при основному впорскуванні за 100%, визначаємо, що голка при спрацьовуванні золотника піднімається на 40% у всіх режимах. Характер зміни максимального тиску впорскування від оборотів відображено на графіку. При посадці голки на диференціальну поверхню тиск у БСП падає нижче залишкового $-\Delta p_\phi$. Після посадки голки характер зміни тиску у форсунці, трубопроводі й насосі має хвильовий характер із загасанням. З припиненням коливань тиск у системі росте аж до подачі на золотник керуючого сигналу. Як видно, така зміна тиску в БСП.

Висновки. Виконаний аналіз тенденцій розвитку систем паливоподачі сучасних дизелів різного призначення. Установлена перспективність систем впорскування акумуляторного типу.

Розглянуте компонування гібридної системи впорскування палива.

Проведені випробування системи на режимах швидкісної характеристики. Досліджена взаємодія акумуляторного модуля й базової системи паливоподачі при незмінних параметрах керування сполучним золотником.

При відкритті золотника впорскування палива має дробовий характер із частковим підйомом голки, що становлять 0,4 від повного ходу.

Кут затримки відкриття золотника є функцією частоти обертання, який зростає зі збільшенням числа обертів, а з ним й затримка підйому голки форсунки $\phi'_{\text{зпг}}$. Так, при максимальних оборотах голка починає підйом із затримкою в $\phi'_{\text{зпг}} = 44^\circ$ ПРВ (повний діапазон $\phi'_{\text{зпг}} \sim 6-44^\circ$ ПРВ).

Перелік використаних джерел

1. Stegemann J., Meyer S., Rölle T. Merker Einspritzsystem für eine vollvariable Verlaufsformung. *MTZ: Motortechnische Zeitschrift*. 2004. Vol. 65. № 2. P. 114-121.
2. Bauder R. Die Zukunft der Dieselmotoren-Technologie. *MTZ: Motortechnische Zeitschrift*. 1998. Vol. 59. № 7/8. P. 11-18.
3. Bartsch C. Common Rail oder Pumpedüse? Dieseleinspritzung auf neuen Wegen. *MTZ: Motortechnische Zeitschrift*. 2005. Vol. 66. № 4. S. 254-258.
4. Okazaki K., Takasaki K., Tajima H. Effects of Electronically Controlled Fuel Injection System (EFI) for Marine Diesel Engines. *Journal of the JIME*. 2010. Vol. 45. P. 38 - 43.
5. Takasaki K. Visual study of combustion characteristics of heavy fuel in diesel engines. *MTZ*. 1999. Vol. 60. N. 1. P. 62 – 67.
6. Tajima H. Diagnosis of combustion with water injection using high-speed visualization and CFD. *Proc. Thermo-and-fluid dynamic processes in Diesel Engines: THIESEL*. 2004. P. 341 – 352.
7. Payri R. Measurements of the mass allocation for multiple injection strategies using the rate of injection and momentum flux signals. *International Journal of Engine Research*. 2020. № 6. P. 33. DOI: 10.1177/1468087419894854.
8. Musculus M.P., Miles P.C., Pickett. Conceptual models for partially premixed Low temperature diesel combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2013. № 39. P. 246 - 283. DOI:10.1016/j.peccs.2012.09.001.
9. Han S., Kim J., Bae C. Effect of air-fuel mixing quality on characteristics of conventional and low temperature diesel combustion. *Applied Energy*. 2014. Vol. 119. P. 454 - 466. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.12.045.
10. Payri R., De La Morena, Monsalve - Serrano . Impact of counter-bore nozzle on the combustion process and exhaust emissions for light-duty diesel engine application. *International Journal of Engine Research*. 2019. Vol. 20. P. 46 - 57. DOI:10.1177/1468087418819250.

11. Kim J., Jeong S. Effects of different piezoacting mechanism on two-stage fuel injection and CI combustion in a CRDi engine. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016. Vol. 30 P. 5727 – 5737. DOI:10.1007/s12206-016-1143-0.
12. Tay K.L., Yang W., Zhao F. Effects of triangular and ramp injection rate-shapes on the performance and emissions of a kerosene - diesel fueled direct injection compression ignition engine: A numerical study. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 110. - p.1401 - 1410 DOI:10.1016/j.applthermaleng. 2016.09.072.
13. Payri R., Gimeno J., Mart'ı-Aldarav'ı P. A new approach to compute temperature in a liquid - gas mixture. Application to study the effect of wall nozzle temperature on a Diesel injector . *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2017. Vol. 68. P. 79 - 86. DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow. 2016.12.008.
14. Schoppe D., Stahl C., Kruger G. Servo-Driven Piezo Common Rail Diesel Injection System. *ATZ Autotechnology*. 2012. Vol. 12. P. 42 – 47. DOI:10.1365/s35595 - 012 - 0107 - y.
15. Kazdani Y., Amani E., Naderan H. Multi-objective optimizations of the boot injection strategy for reactivity controlled compression ignition engines. *International Journal of Engine Research*. 2019. Vol. 20. P.889 – 910. DOI:10.1177/1468087418795599.
16. Половинка Э.М., Мартынов С.В., Москалец А.Р. Развитие систем топливоподачи судовых дизелей. *Матеріали науково-технічної конференції “Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт”*, 21.03.2012 - 23.03. 2012. Частина 1. Одеса: ОНМА, 2012. С. 49 – 57.

10.31653/smf50.2025.102-115

Сагін С.В., Парменова Д.Г., Верпека А.О.

Національний університет «Одеська морська академія»

ПІДВИЩЕННЯ ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ ДИЗЕЛІВ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Постановка проблеми в загальному вигляді. В останні роки на транспортних судах морського та внутрішнього водного транспорту для забезпечення роботи середньообертових дизелів (СОД) використовуються важкі сорти палива високої в'язкості, що мають більш низьку вартість [1-3].

В даний час якість судового моторного палива регламентує стандарт на палива DIS DP-8217, що був розроблений та затверджений міжнародною організацією зі стандартизації ISO у 1987 році там переглядається кожні 5 років. Він призначений як керівництво для поставальників палива, судового обладнання та судовласників. Цей стандарт встановлює значення фізико-хімічних показників, що визначають якість палива, таких як фракційний склад, кінематична в'язкість, температура застигання, помутніння, спалахи, масова частка сірки, вміст водорозчинних кислот і лугів, концентрація смол, кислотність, зольність та інші [4-6]. Для забезпечення необхідних значень окремих фізико-хімічних показників на завершальній стадії виробництва палива у суміш дистилятної газойлевої фракції та продуктів, отриманих в результаті каталітичного крекінгу та гідрокрекінгу, вводяться присадки, що покращують одне або декілька властивостей палива [7-9].

Згідно з вимогами таких провідних фірм, що будують дизелі, як Wartsila-Sulzer, MAN Diesel & Turbo судові СОД повинні надійно експлуатуватися на всіх режимах (в тому числі на пускових і перехідних) під час використання палив з в'язкістю до $700 \text{ мм}^2/\text{с}$. Перспективи розвитку транспортного суднобудування із застосуванням СОД в світовій практиці тісно пов'язані з використанням подібних видів палива [10-12]. При цьому слід зазначити, що важкі сорти палива використовуються для роботи як головних СОД, що передають свою потужність на рушій, так і допоміжних, які є приводом електричних генераторів [13-15]. Крім того, в судову практику чітко простежується тенденція використання важких сортів палива не тільки для сучасних моделей СОД, а також переведення СОД попередніх моде-

лей (спроектованих з умовою їхньої роботи на легких сортах палива) на експлуатацію на паливі з підвищеною в'язкістю [16, 17].

Використання в суднових дизелях палив підвищеної в'язкості перш за все пов'язано зі намаганням зменшити експлуатаційні витрати на придбання рідкого палива [18, 19]. Одночасно з цим підвищення економічності роботи суднових дизелів сприяє не лише вартість палива, але також визначення оптимальних режимів його використання, а також впровадження сучасних технологій, що підвищують якість його збереження, транспортування та згорання. До однієї з технологій, яка спрямована на підвищення економічності роботи дизелів морських суден, відноситься використання паливних присадок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Посилення вимог до експлуатаційних показників суднових енергетичних установок при одночасному збереженні вимог стандарту DIS DP-8217 обумовлює необхідність підвищувати якість палива шляхом використання присадок не тільки в процесі виробництва палив, а й у процесі експлуатації дизелів. Саме тому продовжуються активні дослідження з розробки сучасних присадок до палива. Присадки для палива поділяються на такі групи: депресорно-диспергуючі; депресорні; диспергатори парафінів; протизносні (змащувальні); активатори займання; активатори горіння; багатофункціональні [20, 21].

Механізм дії присадок «активаторів займання» полягає у легкому гомолітичному розпаді їх молекул по зв'язках O-O або O-N, у прискоренні передполум'яних реакцій, здатних до розгалуження окисних ланцюгів та утворення нових реакційних центрів. Присадки діють лише на початкових стадіях процесу горіння. В результаті збільшується здатність вуглеводнів до більш повного окислення (згорання), та реакція протікає в умовах, близьких до ідеальних [22, 23].

На відміну від «активаторів займання», «активатори (каталізатори) горіння» сприяють виникненню сил вільного переходу, послабленню міжмолекулярних зв'язків та спрощенню просторової структури вуглеводнів. Структура палива стає більш однорідною, з рівномірним просторовим розташуванням вуглеводнів у всьому займаному обсязі [24, 25].

Аналіз науково-технічної та патентної літератури свідчить, що розробленню присадок до палива приділяється велика увага як науково-дослідними, так і виробничими організаціями. Як присадки «активатори займання» рекомендовані наступні хімічні речовини та їх композиції: алкіл-(C₃-C₂₀)-нітрат, полімер етилену або його со-

полімер з альфа-олефіном C_3-C_4 ; ненасичені жирні кислоти (група олеїнової, лінолевої, ліноленової кислот) або їх аміди; алкіл- (C_1-C_{25}) -сукцинімід, сополімер вищих ефірів C_6-C_{27} акрилової або метакрилової кислоти з етиленонасиченим мономером; окис пропілену; окси-пропілований жирний спирт C_6-C_{16} ; сульфонат лужного та земельного металу, наприклад кальцію, барію, магнію тощо; нітрат аліфатичного спирту C_3-C_{18} ; парафінові вуглеводні нормальної будови із групи C_9-C_{20} [26, 27].

На відміну від опису присадок у науково-технічній та патентній літературі, інформація про товарні присадки (вітчизняних або імпортних), не містить даних щодо їх хімічного складу та фізико-хімічного механізму впливу на процес згоряння палива та інші експлуатаційні показники дизелів. Тому визначення оптимальної концентрації присадки у палива та режимів, та експлуатаційних режимів, на яких більш доцільно їх використання, виконується дослідницьким шляхом [28, 29].

Присадки до суднових палив в даний час набули досить широкого поширення на суднах, однак результат їх застосування не завжди отримує однозначну оцінку [30, 31]. Це пов'язано з різними причинами, які, перш за все, залежать від характеристик суднового дизеля та елементів його паливної системи, а також від забезпечення правильної технології використання присадок [32-34].

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

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження проводили на спеціалізованому морському судні, призначеному для транспортування 8600 TEU. Исследования проводились на специализированном морском судне, предназначенном для транспортировки 8820 TEU. Експерименти виконували під час навігаційного переходу Амстердам (Голландія) – Осло (Норвегія) – Сальвадор (Бразилія) – Сантос (Бразилія) – Мар-дель-Плата (Аргентина). До складу допоміжної енергетичної установки судна входили чотири однотипні суднові середньооборотові дизелі Wartsila 6L32. Основні характеристики дизелів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Основні характеристики суднових дизелів Wartsila 6L32

Показник	Значення
Тип	Чотиритактний, тронковий
Діаметр циліндра, м	0,32
Хід поршня, м	0,40
Частота обертання, хв ⁻¹	750
Кількість циліндрів	6
Потужність, кВт	3480

Експлуатація дизелів проводилася на двох видах палива – DMA10 (під час навігаційних переходів судна, що здійснювались у районах спеціального екологічного контролю – Sulfur Emission Control Areas, SECAs)) та RMG500 (під час навігаційних переходів поза районами SECAs). Основні характеристики палив DMA10 та RMG500 наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Характеристики моторних палив

Характеристика	DMA10	RMG500
Густина при 20°C, кг/м ³	882	968
В'язкість при 40°C, мм ² /с	9,4	482
Вміст сірки, %	0,063	0,47
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	43310	39120

Принципова схема паливної системи дизелів наведена на рис. 1.

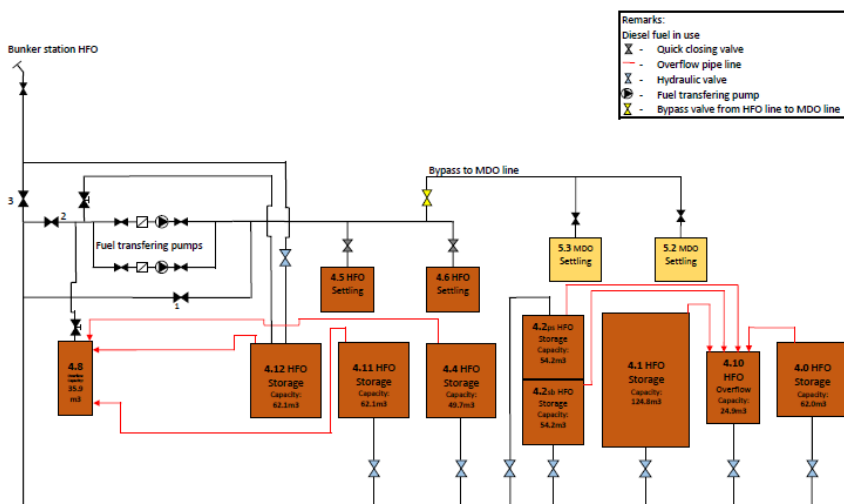


Рис. 1. Принципова схема паливної системи дизелів Wartsila 6L32F

Паливна система кожного з дизелів передбачала дозування до загального потоку палива, що прямує до паливних насосів високого тиску, паливної присадки. Це забезпечувалось за допомогою дозерної установки, що встановлювалась на лінії подачі палива.

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

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

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

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

Метою першого етапу дослідження було визначення з вказаних присадок такої, яка сприяє найкращої економічності роботи дизеля – а саме забезпечує мінімальну питому витрату палива. Технологія випробувань полягала в наступному. Один з чотирьох дизелів (перший) експлуатувався на паливі без додавання паливної присадки. Три з чотирьох дизелів використовували під час роботи паливну присадку: другий – Amergy XLS, третій – Amergy 1000, четвертий – Amergize. Схожі рекомендовані значення дозування присадок дозволяли їх використання в кожному з дизелів з однаковою концентрацією, за яку була прийнята 1 літр присадки на 4 тонни палива. З метою забезпечення коректності проведення досліджень на кожному з чотирьох дизелів та можливості подальшого порівняння результатів експерименту, створювались умови, що забезпечували однакове навантаження на дизелі, а також однаковий час експлуатації дизелів. Експерименту виконувались експлуатаційних режимах, що відповідали 50 %, 60 %, 70%, 80 % та 90 % на навантаженню на дизелі.

Питома ефективна витрата палива b_e , кг/(кВт·год), розраховувалась судновою системою діагностики та контролю ЕЕ (Energies & Engines) за виразом:

$$b_e = B_{\text{год}} / N_e ;$$

де $B_{\text{год}}$ – годинна витрата палива, кг/год;

N_e – експлуатаційна потужність дизеля, кВт;

з урахуванням попередньо визначених значень витрати палива (такого, що спрямовується до дизеля та такого, що повертається відсичною магістраллю) та навантаження на дизель.

Результати з визначення питомої витрати палива для різних умов експлуатації дизелів наведені у таблиці 3.

Таблиця 3. Питома витрати палива b_e , г/(кВт·год), для різних умов експлуатації судових дизелів Wartsila 6L32F

Навантаження на дизель, %	Дизель № 1, робота без паливної присадки	Дизель № 2, паливна присадка Amergy XLS	Дизель № 3, паливна присадка Amergy 1000	Дизель № 4, паливна присадка Amergize
50	197,4	192,5	195,3	194,4
60	196,2	190,1	192,3	192,1
70	193,7	188,2	190,0	190,6
80	192,1	186,8	188,7	187,8
90	191,8	186,7	189,6	189,7

Визначення значень, що наведені у таблиці 3, виконувались на протязі 1,5...2,0 годин експлуатації дизелів на відповідному навантаженні з інтервалом фіксації значень 10 хв. У таблиці 3 наведені усереднені результати цих вимірювань. Для кращої візуалізації, результати, що наведені у таблиці 3, оформлені у вигляді діаграм та надані на рис. 2.

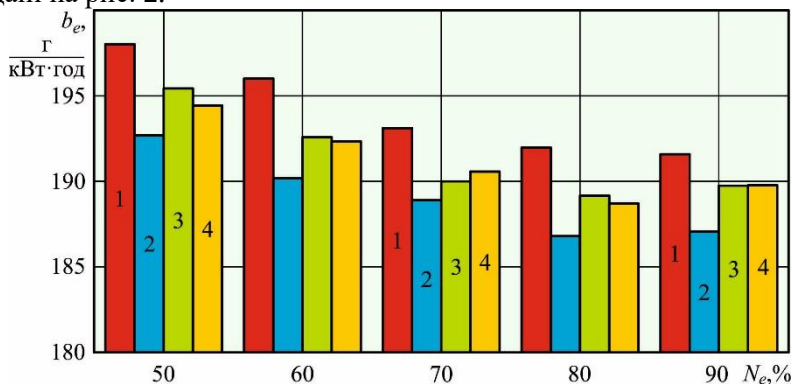


Рис. 2. Питома витрата палива на різних навантаженнях судового дизеля Wartsila 6L32F: 1 – робота дизеля без використання паливної присадки; 2, 3, 4 – робота з використанням паливних присадок Amergy XLS, Amergy 1000, Amergize відповідно

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

Метою другого етапу досліджень було визначення оптимальної концентрації паливної присадки Amergy XLS – експериментальне визначення такої її концентрації, яка призводить до мінімальної витрати палива дизелем Wartsila 6L32F. Під час цього етапу досліджень використовувалась лише паливна присадка Amergy XLS, при цьому її концентрація в загальному обсязі палива складала 1 / 2000, 1 / 3000, 1 / 4000, 1 / 5000, 1 / 6000. Процедура вимірювання витрати палива та фіксації результатів відповідала процедурі визначення витрати палива під час експлуатації дизеля на різних присадках.

Результати досліджень наведені у таблиці 4 та проілюстровані на рис. 3.

Таблиця 4. Питома витрати палива b_e , г/(кВт·год), для різної концентрації присадки Amergy XLS в загальному обсязі палива

Навантаження на дизель, %	Концентрація присадки в загальному обсязі палива				
	1 / 2000	1 / 3000	1 / 4000	1 / 5000	1 / 6000
50	196,2	190,1	192,7	191,1	194,2
60	193,7	188,2	190,2	188,7	192,2
70	191,9	185,8	188,9	187,1	190,3
80	190,2	183,0	187,2	184,1	190,0
90	189,2	182,4	186,9	183,1	187,8

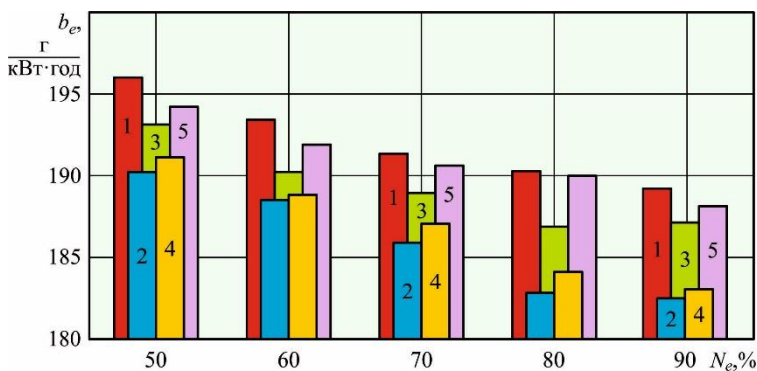


Рис. 3. Питома витрата палива на різних навантаженнях суднового дизеля Wartsila 6L32F для різної концентрації паливної присадки Amergy XLS: 1 – 1 / 2000, 2 – 1 / 3000, 3 – 1 / 4000, 4 – 1 / 5000, 5 – 1 / 6000

Витрата палива (годинна або питома) характеризує паливну економічність дизеля. Збільшення витрати палива знижує паливну економічність дизеля та призводить до підвищення фінансових витрат на експлуатацію судна. При цьому з урахуванням сучасного розвитку Світової економіки, яка у тому числі характеризується постійними коливаннями цін на енергоресурсі, зниження витрата палива у більшому ступені актуальне не лише з точки зору економічних заощаджень, але з також й з позиції забезпечення живучості та збільшення автономності роботи судна. Незапланована зміна маршруту навігаційного переходу, погіршення гідрометеорологічних умов та пов'язане з цим підвищення опору на рух судна, виникнення аварійних розливів палива під час знаходження судна у морі та інші причини можуть критично впливати на запаси палива, що зберігаються на судні та поповнення яких можливо не в кожному з портів заходу. Саме з цієї позиції повинні розглядатися питання підвищення паливної економічності.

Підвищення паливної економічності дизелів під час використання паливної присадки Amergy XLS оцінювалось за виразом

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{\text{DF}} - b_e^{\text{XLS}}}{b_e^{\text{DF}}} \cdot 100\%;$$

де b_e^{DF} – питома витрата палива під експлуатації дизеля без використання присадки, г/год;

b_e^{XLS} – питома витрата палива під експлуатації дизеля з використанням присадки Amergy XLS, г/год;

при цьому значення b_e^{DF} обираються з таблиці 3, значення b_e^{XLS} – з таблиці 4 для відповідних навантажень на дизель.

Отримані в такий спосіб величини наведені у таблиці 5.

Таблиця 5. Відносне збільшення паливної економічності Δb_e , %, суднових дизелів Wartsila 6L32F під час використання паливної присадки Amergy XLS з різною концентрацією у загальному об'ємі палива

Навантаження на дизель, %	Концентрація присадки в загальному обсязі палива				
	1 / 2000	1 / 3000	1 / 4000	1 / 5000	1 / 6000
50	0,61	3,70	2,38	3,19	1,62
60	1,27	4,08	3,06	3,82	2,04
70	0,93	4,08	2,48	3,41	1,76
80	0,99	4,74	2,55	4,16	1,09
90	1,36	4,91	2,55	4,54	2,09

За даними таблиці 5 побудовані діаграми, що наведені на рис. 4.

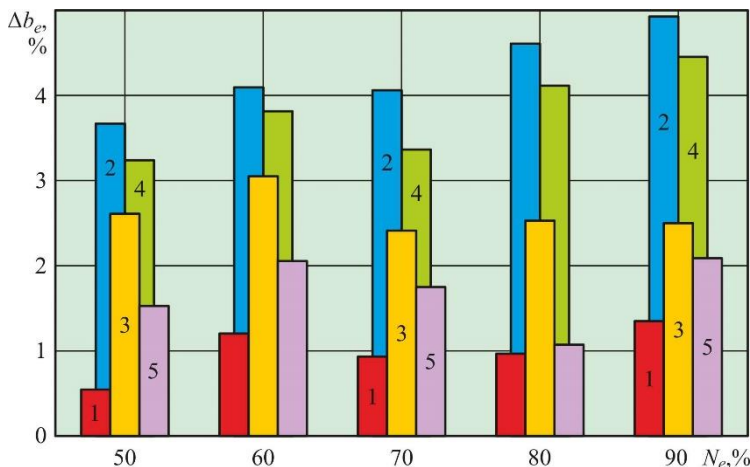


Рис. 4. Відносне збільшення паливної економічності Δb_e , %, суднових дизелів Wartsila 6L32F під час використання паливної присадки Amergy XLS з різною концентрацією у загальному об'ємі палива:
1 – 1 / 2000, 2 – 1 / 3000, 3 – 1 / 4000, 4 – 1 / 5000, 5 – 1 / 6000

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

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

2. Використання присадок до палива призводить до підвищення паливної економічності суднового дизеля. Під час використання паливних присадок на різних режимах роботи суднового дизеля Wartsila 6L32F було досягнуте зниження питомої ефективної витрати палива на 0,61...4,91 %.

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

Перелік використаних джерел

1. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport Systems and Technologies*. 2024. Vol. 43. P. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2

2. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Koskina Y., Lohinov O., Veretennik O., Stukalenko O. Fundamental Concepts of Deck Cargo Handling and Transportation Safety // *Eur. Transp.* 2024. Vol. 98. – P. 1. <https://doi.org/10.48295/ET.2024.98.1>.

3. 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>.

4. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. 2023. Вип. 47. С. 23-31. doi: 10.31653/smf47.2023.23-31.

5. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. 2024. Вип. 1(39). С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

6. Заблоцький Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* 2015. № 35. С. 83-92.

7. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2018. Вип. 38. С. 76-87.

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

9. Заблоцкий Ю.В., Куропятник А.А. Повышение топливной экономичности и экологических параметров работы судовых дизелей при использовании присадок к топливу // *Austria-science*. 2017. № 2. С. 83-88.

10. 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>.

11. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2024. Вип. 2(40). С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.

12. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2025. Вип. 1(42). С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.

13. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2025. Вип. 1(42). С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.

14. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2025. Вип. 1(42). С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

15. Budashko V., Shevchenko V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load // *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* 2021. Vol. 2(110). P. 54-70. doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

16. Petrychenko O. Levynskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. 2023. № 41. P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.

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

18. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.

19. Двуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. 2021. № 3 (1). С. 1-12. <http://doi.org/10.23939/smeu2021.01.001>.

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

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

22. 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. – С. 79-89.

23. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

24. 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. С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

25. 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>.

26. 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. С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

27. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. Одеса: НУ «ОМА». С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120

28. Заблоцкий Ю. В. Использование регулярного микрорельефа для оптимизации работы топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. 2015. № 36. С. 65-73.

29. Budashko V., Obniavko T., Onishchenko O., Dovidenko Y., Ungarov D. Main Problems of Creating Energy-efficient Positioning Systems for Multipurpose Sea Vessels // 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control. 2020. P. 106–109, doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255514.

30. Budashko V., Shevchenko V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load // East.-Eur. J. Enterp. Technol. 2021. Vol. 2(110). P. 54-70. doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

31. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O. Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment // Sci. J. Silesian Univ. Technol. 2023. Vol. 118. P. 195–206. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>.

32. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V. Integral Approach to Vulnerability Assessment of Ship's Critical Equipment and Systems // Transactions on Maritime Science. 2023. Vol. 12(1). doi:10.7225/toms.v12.n01.002.

33. 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>.

34. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity Optimisation of a Main Marine Diesel Engine Electronic Speed Governor. Scientific Horizons. 2021. Vol. 24(11). P. 9-19. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).

10.31653/smf50.2025.116-130

Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Поповський А.Ю., Сагін А.С.

Національний університет «Одеська морська академія»

**АДАПТАЦІЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ
ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ПІД ЧАС ЇХ
ПЕРЕВЕДЕННЯ НА ПАЛИВО З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ СІРКИ**

Постановка проблеми в загальному вигляді. Під час експлуатації дизелів морських суден забезпечується розв'язання завдань не лише підтримання їх ефективності та технічного стану, але також з виконання міжнародних та національних вимог з попередження забруднення довкілля [1-3]. Однією зі шкідливих речовин, що є складовою робочого циклу суднових дизелів та без якої неможливо його існування, є випускні гази [4-6]. Негативне дія випускних газів полягає у присутності в їх об'єму токсичних компонентів, концентрація деяких з них (насамперед оксидів азоту NO_x) регламентується вимогами Додатку VI МАРПОЛ. Обмеження з боку МАРПОЛ також розповсюджуються на емісію ще одного токсичного компоненту – оксидів сірки SO_x , при чому рівень цих викидів регламентується вмістом сірки у паливі [7-9].

З 01.01.2020 р. відповідно до Додату VI МАРПОЛ вміст сірки в 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 визначаються Міжнародною морською організацією (International Maritime Organization – IMO). Для країн Європи до них належать акваторії Північного, Балтійського та Середземного морів, а також введені з травня 2025 року акваторії Норвезького моря та Північної Атлантики [10-12]. Експлуатація суднових дизелів з використанням палива, вміст сірки в якому перевищує 0,5 % дозволена виключно в разі, коли їх випускні гази додатково очищуються в спеціальних системах, найбільш розповсюдженими з яких є скрубери- SO_x [13-15].

Додатково діє стандарт ISO 8217, який регламентує фізико-хімічні властивості суднового палива, включаючи в'язкість, густину, вміст води та зольність, стабільність і сумісність [16-18]. Ці характеристики визначають якість згоряння, надійність паливної апаратури та загальний ресурс суднових енергетичних установок.

Запровадження таких норм суттєво підвищує екологічну безпеку судноплавства, проте водночас створює певні технічні виклики. У першу чергу це пов'язано зі зміною динамічних характеристик процесу згоряння в судових двигунах під час їх переведення на паливо з низьким вмістом сірки [19-21]. В цих випадках змінюється повнота та рівномірність згоряння, що відображається на стабільності робочих параметрів – насамперед динамічних навантажень і миттєвої зміні частоти обертів двигуна. Ці фактори безпосередньо впливають на надійність роботи судової енергетичної установки – пропульсивної або електроенергетичної [22-24].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зниження вмісту сірки в судовому паливі чинить комплексний вплив на процес згоряння у двигунах внутрішнього згоряння. Традиційно сірка виконувала не лише роль забруднювача, але й певною мірою впливала на фізико-хімічні властивості палива, включаючи змащувальну здатність і стабільність [25, 26]. У разі зменшення її вмісту у паливі змінюються такі параметри, як в'язкість, температура займання та швидкість поширення фронту полум'я [27, 28]. Одночасно з цим підвищується вміст в паливі інших складових – вуглецю та водню, що призводить до збільшення теплотворної здатності палива та у подальшому у збільшення теплової енергії що утворюється під час згоряння палива, перетворюється на кінетичну енергію газів, створює тиск на поршень, забезпечує його поступальний рух та обертальний рух колінчатого валу [29, 30]. Основні експлуатаційні характеристики судових палив з різним вмістом сірки наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Експлуатаційні характеристики судових моторних палив

Характеристика	RME380	DMA20	DMA10	DMA10LS
Густина при 20°C, кг/м ³	892	842	822	818
В'язкість при 40°C, мм ² /с	358,3	19,6	9,8	9,6
Вміст, %				
вуглецю	83,27	84,3	84,4	84,6
водню	10,45	11,7	11,8	11,8
кисню	1,75	1,4	1,32	1,23
сірки	0,5	0,1	0,06	0,02
вологі	2,93	2	1,92	1,85
азоту	1,1	0,5	0,5	0,5
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	40897,3	42865,7	43045,6	43137,5

З теоретичної точки зору процес згоряння у дизельному двигуні складається з кількох фаз: затримки займання, швидкого тепловиділення, контрольованого горіння та догоряння. Кожна з цих фаз є чутливою до складу палива. Використання низькосірчистого палива може збільшувати період затримки займання, що призводить до нерівномірного утворення паливовітряної суміші. Унаслідок цього змінюється характер тепловиділення: частина енергії вивільняється різкіше, викликаючи підвищені коливання тиску в циліндрі й, як наслідок, зростання механічних і теплових навантажень [31, 32].

Ці зміни відображаються на динамічних характеристиках двигуна [33, 34]. Коливання тиску й температури призводять до нестабільності обертів, а система автоматичного регулювання змушена частіше втручатися у робочий процес. У сучасних суднових двигунах застосовується система автоматичного регулятора, завдання якої — підтримувати сталі оберти при зміні навантаження. Проте за умов нерівномірного згоряння зростає кількість коригувальних впливів, що підвищує зношування елементів паливної апаратури та збільшує ймовірність перевантаження системи управління. Регулювання цих змін вимагає додаткового переналаштування регулятора частоти обертання дизеля з урахуванням зміни збурюючої дії, якою у цьому випадку є вміст сірки в паливі та його теплотворна здатність [35, 36].

Таким чином, зниження вмісту сірки та зміна складу палива призводять не лише до екологічних переваг, але й до появи нових експлуатаційних ризиків. Дизель працює в більш напруженому динамічному режимі, з постійними змінами у перебігу робочого процесу. Це вимагає врахування цих факторів під час регулювання частоти обертання дизеля та врахування її миттєвого збільшення у разі введення дизеля на використання палива з низьким вмістом сірки.

Зміни у вимогах міжнародних стандартів, перш за все Додатку VI МАРПОЛ 73/78 та ISO 8217, безпосередньо впливають на експлуатацію суднових енергетичних установок. Перехід на палива з низьким вмістом сірки та використання модифікованих сортів палива підвищує екологічну безпеку судноплавства, проте водночас зумовлює необхідність враховувати нові динамічні характеристики процесу згоряння [37, 38].

Нестійкість займання, зростання коливань тиску й температури в циліндрі, а також збільшення навантаження на системи регулювання створюють додаткові експлуатаційні ризики. За таких умов надійність і ефективність роботи суднового двигуна значною мірою зале-

жать від того, наскільки грамотно організовані регулювання робочого процесу та технічне обслуговування.

Для мінімізації негативних наслідків потрібен комплексний підхід, що включає:

- адаптацію систем автоматичного регулювання обертів і навантаження до особливостей палива з низьким вмістом сірки;
- використання сучасних систем моніторингу якості палива та робочих параметрів дизеля;
- коригування режимів згоряння шляхом оптимізації подачі палива та організації процесу сумішоутворення [39-41].

Отже, урахування впливу вмісту сірки та складу палива на процес згоряння слід розглядати як один із ключових факторів в разі оцінці надійності суднових двигунів. Лише системний аналіз цих параметрів дозволяє забезпечити як відповідність міжнародним екологічним вимогам, також й стабільну, безпечну та економічну експлуатацію суднової енергетичної установки.

Постановка завдання. Завданням дослідження було вивчення зміни динамічних навантажень, що виникають під час переведення суднового дизеля на паливо з низьким вмістом сірки та адаптація систем автоматичного регулювання частоти обертання дизеля до цих умов.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження полягали у моделюванні перехідних процесів системи автоматичного регулювання частоти обертання колінчатого валу дизеля в разі зміни збурюючої дії, що пов'язана зі збільшенням теплотворної здатності палива та, відповідно, збільшенням миттєвих навантажень на поршневу групу дизеля в разі його переведення на використання палива з низьким вмістом сірки.

Як об'єкт регулювання приймався судновий дизель з частотою обертання 720 об/хв. Як регулятор розглядався електронний регулятор швидкісного режиму дизеля, що забезпечує пропорційно-інтегральний процес регулювання.

Процеси зміни регульованого параметру з часом для двигуна згідно з принципом Д'Аламбера можуть бути промодельовані як розв'язок звичайного (та у першому наближенні майже лінійного) диференційного рівняння:

$$T_o \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_o [\mu - f(t)]; \quad (1)$$

де T_O – часу розгону дизеля, як об'єкту регулювання частоти обертання, с;

k_O – коефіцієнту підсилення дизеля, як об'єкту регулювання частоти обертання, с;

φ – відносна зміна частоти обертання дизеля;

μ – відносна регулююча дія, пов'язана зі зміною циклової подачі палива;

$f(t)$ – відносна збурююча дія, пов'язана за зміною частоти навантаження на дизель;

t – час, с.

Значення характеристик об'єкту регулювання (часу розгону T_O та коефіцієнту підсилення k_O) обиралися згідно експериментальним спостереженням. Відносна збурююча дія $f(t)$ моделювалось східчато-подібною функцією із можливістю варіювання величина ступінчастого навантаження та тривалості часу зростання (яке для всіх випадків приймалось 0,1 с).

Пропорційно-інтегральний (астатичний) регулятор, що розглядався як складова системи автоматичного регулювання частоти обертання, передбачав можливість роздільного варіювання параметрів налаштування. За такі параметри приймалися коефіцієнт підсилення k_p (що визначався у відносних одиницях) та час інтегрування T_i (що вимірювалось у секундах).

Зміна з часом вихідного сигналу регулятора – відносного значення регулюючої дії, а також відносного значення регульованої величини визначалося як розв'язок диференціального рівняння:

$$\frac{d\mu}{dt} = - \left[\frac{1}{T_i} \varphi(t) + k_p \frac{d\varphi}{dt} \right] \quad (2)$$

із врахуванням при його інтегруванні ненульових початкових умов:

$$\begin{cases} \varphi(0) = v, \\ v(0) = 1/k_O, \end{cases} \quad (3)$$

де v – значення сигналу завдання (уставки регулятора)ю

Рівняння (2) розв'язувалася чисельно у середовищі комп'ютерної математики Matlab / Simulink з вибором методу чисельного інтегрування у вигляді алгоритму Рунге-Кутта із адаптованим кроком розбиття інтервалу моделювання (але з умовою того, щоб максимальне значення кроку розбиття не перевищувало 0,01 с для забезпечення

гладкості відтворюємої функції). Врахування ненульових початкових умов забезпечувалося використанням спеціальних блоків з пакету Simulink Extras [42, 43].

Схема візуального моделювання представлена на рис. 1.

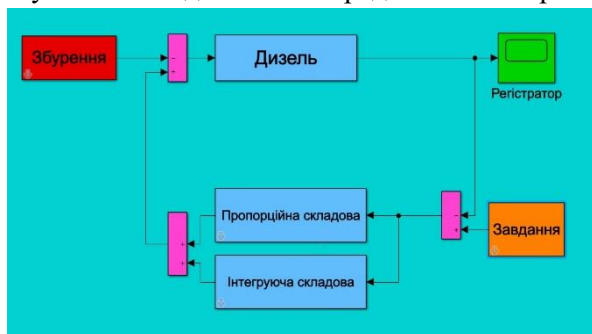


Рис. 1. Візуалізація моделі системи автоматичного регулювання частоти обертання колінчатого валу дизеля

На рис. 1 позначені наступні елементи системи автоматичного регулювання:

- збурення – джерело збурюючої дії $f(t)$, яка змінюється за східчато-подібним законом з тривалістю фронту наростання – 0,1 с і можливістю задання вихідного рівню;
- дизель – об’єкт регулювання, вихідний сигнал якого (відносне значення швидкості обертання) є $\varphi(t)$;
- пропорційна складова та інтегруюча складова – паралельно з’єднані та підключені у від’ємний зворотний зв’язок ділянки астатичного ізодромного регулятора з можливістю роздільного варіювання налаштувальних параметрів (коефіцієнту підсилення за пропорційною складовою k_p та часу інтегрування T_i);
- завдання – блок, який забезпечує значення відносної швидкості обертання двигуна (у відносних одиницях) з можливістю зміни режиму; значення уставки $v=1$ відповідає номінальному режиму роботи двигуна;
- регістратор – блок, який виконує фіксацію регульованої величини та візуалізацію її значень.

Моделювання виконувалось для трьох різних відносних навантажень – $f_0=0,4$; $f_0=0,3$; $f_0=0,2$, що відповідало переведенню дизеля з палива RME380 (зі вмістом сірки 0,5 %) на паливо DMA20 (зі вмістом сірки 0,1 %), на паливо DMA10 (зі вмістом сірки 0,06 %) та на паливо DMA10LS (зі вмістом сірки 0,02 %) відповідно.

Зміна параметрів налаштування регулятора обирались в діапазоні:

- коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою $k_p=[0,8\dots2,4]$ з кроком зміни $\Delta k_p=0,8$;
- час інтегрування $T_i=[0,1\dots0,4]$ с з кроком зміни $\Delta T_i=0,15$ с.

Налаштування режиму роботи системи автоматичного регулювання виконувалось шляхом покоординатної оптимізації, де як критерії оптимізації приймалися тривалість перехідного процесу t_p , с, та динамічне закидання σ , %. Варійованими параметрами були параметри налаштування регулятора – коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою k_p та час інтегрування T_i .

Зміни у характеру перебігу перехідного процесу для різних параметрів навантаження та зовнішнього збурення проілюстровані на рис. 2-4.

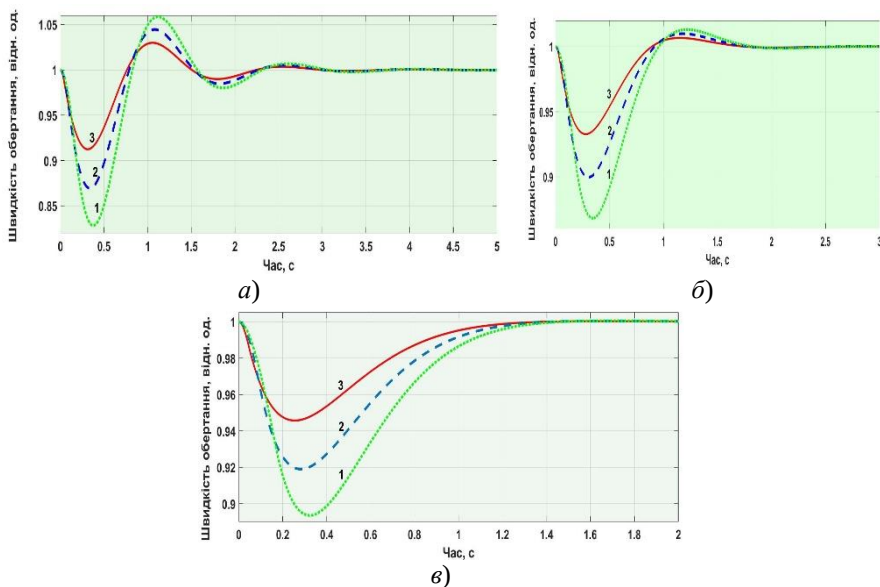


Рис. 2. Перехідні процеси в системі автоматичного регулювання частоти обертання валу дизеля за умовою: 1 – $f_0=0,4$; 2 – $f_0=0,3$; 3 – $f_0=0,1$;
а – $T_i=0,1$ с, $k_p=0,8$; б – $T_i=0,1$ с, $k_p=1,6$; в – $T_i=0,1$ с, $k_p=2,4$

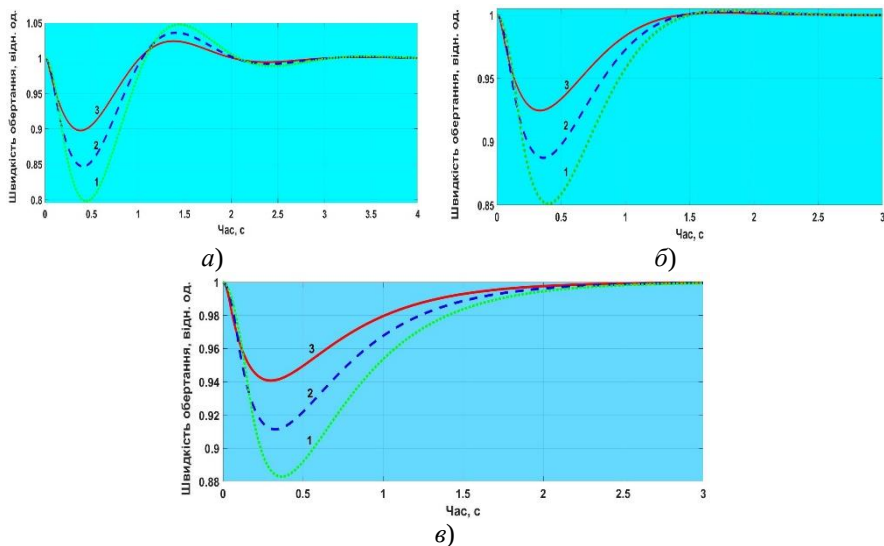


Рис. 3. Перехідні процеси в системі автоматичного регулювання частоти обертання валу дизеля за умовою: 1 – $f_0=0,4$; 2 – $f_0=0,3$; 3 – $f_0=0,1$; а – $T_i=0,25$ с, $k_p=0,8$; б – $T_i=0,25$ с, $k_p=1,6$; в – $T_i=0,25$ с, $k_p=2,4$

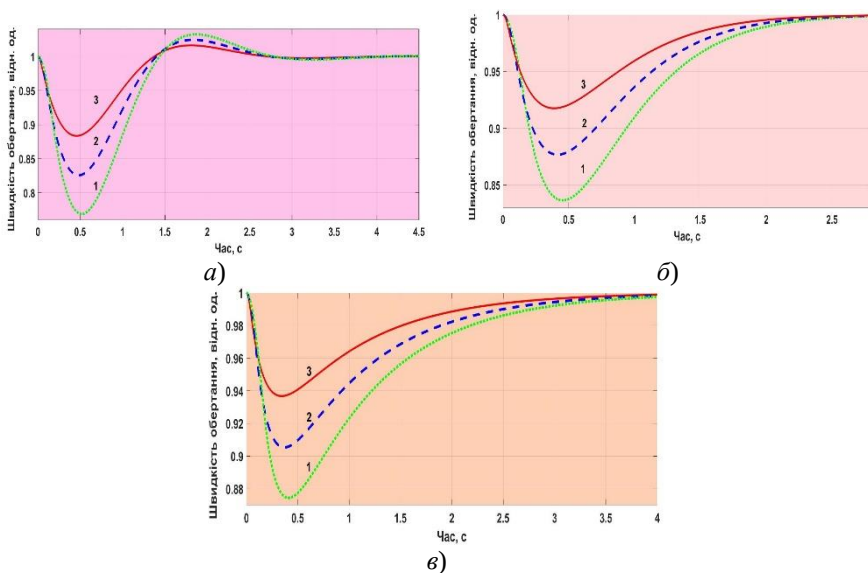


Рис. 4. Перехідні процеси в системі автоматичного регулювання частоти обертання валу дизеля за умовою: 1 – $f_0=0,4$; 2 – $f_0=0,3$; 3 – $f_0=0,1$; а – $T_i=0,4$ с, $k_p=0,8$; б – $T_i=0,4$ с, $k_p=1,6$; в – $T_i=0,4$ с, $k_p=2,4$

Результати визначення з графіків значень типових параметрів якості перехідних процесів, які водночас є критеріями оптимізації – часу регулювання та відносного динамічного закиду зведені у таблицю 2.

Таблиця 2. Критерії оптимізації системи автоматичного регулювання для різних значень параметрів налаштувань регулятора

Відносне навантаження f_0	Параметри налаштування		Критерії оптимізації	
	k_p , відн. од.	T_i , с	σ , %	t_p , с
0,4	0,8	0,10	17	2,0
		0,25	20	1,9
		0,40	23	2,3
	1,6	0,10	14	1,2
		0,25	15	1,3
		0,40	16	1,9
	2,4	0,10	11	1,1
		0,25	12	1,8
		0,40	13	2,4
0,3	0,8	0,10	13	1,7
		0,25	15	1,6
		0,40	17	2,1
	1,6	0,10	10	0,8
		0,25	11	1,2
		0,40	12	1,8
	2,4	0,10	8	1,0
		0,25	9	1,6
		0,40	9	2,1
0,2	0,8	0,10	8	1,4
		0,25	10	1,6
		0,40	11	1,9
	1,6	0,10	7	0,7
		0,25	7	1,1
		0,40	8	1,7
	2,4	0,10	5	0,9
		0,25	6	1,4
		0,40	6	1,9

Результати, що наведені в таблиці 2, свідчать, що для покращення якості перехідних процесів в САР в цілому (з деякими незначними відхиленнями внаслідок коливального характеру перехідних про-

цесів) слід зупинитися на значеннях $k_p=2,4$ та $T_i=0,1$ с. Для цих значень час регулювання (в залежності від рівня навантаження) знаходиться у межах – $t_p=(0,9 \dots 1,1)$ с, а відносне динамічне закидання – у межах $\sigma=(5 \dots 11)$ %.

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

1. Переведення судових дизелів з паливо зі вмістом сірки 0,5 % на палива, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %, призводить до необхідності адаптації їх систем автоматичного регулювання частоти обертання валу. Ці питання стають актуальними під час знаходження суден морського транспорту в спеціальних екологічних районах контролю викидів оксидів сірки.

2. Завдання забезпечення якості стабілізації частоти обертів роботи дизеля в таких випадках розв'язується класичним шляхом варіювання налаштувальних параметрів аналогового лінійного регулятора, алгоритм роботи якого відповідав пропорційно-інтегруючому закону. Обидва з варіюваних параметрів – коефіцієнти підсилення за пропорційною та інтегруючою складовою (час інтегрування) мали можливість незалежної зміни, що зводило задачу мінімізації критерію оптимальності до класичної двопараметричної задачі. Як критерії оптимізації процесу регулювання використовувалися найважливіші прямі показники перехідних процесів – відносна величина динамічного закиду регульованої характеристики (частоти обертання) та тривалість процесу регулювання.

3. Шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання (у програмному середовищі Matlab / Simulink) були визначені оптимальні параметри налаштування регулятора, які близькі до оптимальних значень: коефіцієнт підсилення за пропорційною компонентою – 2,4 та обернений коефіцієнт пропорційності (час інтегрування) за інтегруючою складовою – 0,1 с. При цьому забезпечуються найменші значення критеріїв оптимальності. В залежності від рівня зовнішнього навантаження вони знаходилися у наступних діапазонах час регулювання – $t_p=(0,9 \dots 1,1)$ с та величина відносного перерегулювання – $\sigma=(5 \dots 11)$ %. Це, у свою чергу, забезпечує оптимальний процес виходу швидкісного режиму головного двигуна на новий сталий режим під час його переведення на використання палива вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %.

Перелік використаних джерел

1. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O. Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment // *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Series Transp.* 2023. Vol. 118. P. 195–206. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>.
2. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport Systems and Technologies.* 2024. Vol. 43. P. 21–36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
3. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* 2025. Вип. 1(42). С. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
4. 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>.
5. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* 2024. Вип. 2(40). С. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
6. 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. С. 79–89.
7. 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>.
8. 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>.
9. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics // *Technol-*

ogy Audit and Production Reserves. 2022. Vol. 5(1(67)). P. 22–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>.

10. Budashko V., Shevchenko V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load // East.-Eur. J. Enterp. Technol. 2021. Vol. 2(110). P. 54-70. doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

11. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

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

13. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

14. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Koskina Y., Lohinov O., Veretennik O., Stukalenko O. Fundamental Concepts of Deck Cargo Handling and Transportation Safety // Eur. Transp. 2024. Vol. 98. P. 1. <https://doi.org/10.48295/ET.2024.98.1>.

15. Budashko V., Obniavko T., Onishchenko O., Dovidenko Y., Ungarov D. Main Problems of Creating Energy-efficient Positioning Systems for Multipurpose Sea Vessels // 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control. 2020. P. 106–109, doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255514.

16. 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: наук.-техн. зб. 2022. Вип. 45. С. 43-56. doi: 10.31653/smf45.2022.43-56.

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

18. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport //

Sustainability. 2025. Vol. 17. P. 2141.
<https://doi.org/10.3390/su17052141>.

19. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

20. Petrychenko O., Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. 2023. № 41. P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.

21. Goolak S., Riabov I., Petrychenko O., Kyrychenko M., Pohosov O. The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel // Advances in Mechanical Engineering. 2025. Vol. 17(2). <https://doi.org/10.1177/16878132251320236>.

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

23. 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. P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

24. Budashko V., Sandler A., Shevchenko V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2022. Vol. 16(1). P. 105-111. doi: 10.12716/1001.16.01.11.

25. Wang F., Zhao J., Li T., Guan P., Liu S., Wei H., Zhou L. Research on NOx Emissions Testing and Optimization Strategies for Diesel Engines Under Low-Load Cycles // Atmosphere. 2025. Vol. 16. P. 190. <https://doi.org/10.3390/atmos16020190>.

26. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.

27. 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>.

28. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V. Integral Approach to Vulnerability Assessment of Ship's Critical Equipment and Systems // Transactions on Maritime Science. 2023. Vol. 12(1). doi:10.7225/toms.v12.n01.002.

29. 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. С. 93-110. doi: 10.31653/smf44.2022. 93-110.

30. Wang Z., Ma Q., Zhang Z., Li Z., Qin C.; Chen J., Peng C. A Study on Monitoring and Supervision of Ship Nitrogen-Oxide Emissions and Fuel-Sulfur-Content Compliance // Atmosphere. 2023. Vol. 14. P. 175. <https://doi.org/10.3390/atmos14010175>.

31. Двуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. 2021. № 3 (1). С. 1-12. <http://doi.org/10.23939/smeu2021.01.001>.

32. Amoresano A., Langella G., Iodice P., Roscioli S. Numerical Analysis of SO₂ Absorption inside a Single Water Drop // Atmosphere. 2023. Vol. 14. P. 1746. <https://doi.org/10.3390/atmos14121746>.

33. Столярик Т.О. Забезпечення режимів мащення чотиритактних суднових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. С. 90 – 105. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-90-105.

34. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O. Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment // Sci. J. Silesian Univ. Technol. 2023. Vol. 118. P. 195–206. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>.

35. Сагін С.В., Поповський О.Ю., Куропятник О.А. Особливості регулювання частоти обертання суднового дизеля під час використання системи вибіркового каталітичного відновлення // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2025. Вип. 2(43). С. 161-176. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.14.

36. Сагін С.В., Поповський О.Ю., Куропятник О.А. Забезпечення швидкісних режимів роботи суднових дизелів, що використовують систему рециркуляції випускних газів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2025. Вип. 2(43). С. 200-214. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.17.

37. Kolegaev M., Brazhnik I. Improvement of the process of preparing cargo tanks of crude oil tankers for cargo operations // Technology Audit and Production Reserves. 2024. Vol. 6(1(80)). P. 36–40. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.318534>.

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

39. Солодовніков В.Г., Руснак Д.Ю. Використання ультразвукової обробки палива у паливних системах суднових середньообертових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2024. Вип. 48. С. 126-136. [doi: 10.31653/smf48.2024.126-136](https://doi.org/10.31653/smf48.2024.126-136).

40. Руснак Д.Ю. Аналіз методів забезпечення вимог щодо емісії в атмосферу сірчистих сполук з випускними газами суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 227-240. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.25.

41. Руснак Д.Ю. Особливості комплектації суднових систем підготовки палива // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2024. Вип. 49. С. 98-109. [doi: 10.31653/smf49.2024.98-109](https://doi.org/10.31653/smf49.2024.98-109).

42. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity Optimisation of a Main Marine Diesel Engine Electronic Speed Governor // Scientific Horizons. 2021. Vol. 24(11). P. 9-19. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).

43. Gorb S.I., Budurov M.I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // International Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2021. Vol. 6. P. 18-26.

10.31653/smf50.2025.131-140

Фомін О.В.,¹ Мельник О.В.,¹ Черкашин О.П.,² Гунько Є.В.¹¹ Національний транспортний університет,² Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

ПЕРСПЕКТИВНІ ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕХАНІЗМІВ ГАЗОРОЗПОДІЛУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасна морська індустрія висуває дедалі жорсткіші вимоги до надійності, економічності та екологічності суднових енергетичних установок [1-4]. У цьому контексті, дослідження, присвячене підвищенню надійності та ефективності механізмів газорозподілу (МГР), набуває особливої актуальності. Ці механізми забезпечують своєчасне та точне надходження повітря і видалення відпрацьованих газів, безпомилкова робота яких безпосередньо впливає на всі ключові показники: потужність, економічність, токсичність випускних газів та, що найважливіше, на надійність всієї системи. Проте, саме МГР є одними з найбільш навантажених і вразливих вузлів, що часто стають причиною аварійних зупинок і дорогого ремонту. Зростання експлуатаційних швидкостей та навантажень, використання низькосортного палива, а також прагнення до мінімізації розмірів двигунів без втрати потужності призводять до збільшення ризику відмов [5-7].

Актуальність посилюється також тим, що надійність МГР прямо корелює з економічністю. Несправності, знос кулачкових валів, пошкодження клапанів або їх сидниць, призводять до порушення герметичності, втрати тиску та, як наслідок, до збільшення питомої витрати палива і зниження потужності. Це не лише підвищує експлуатаційні витрати, а й суперечить сучасним екологічним стандартам. Дослідження також важливе з огляду на необхідність скорочення викидів шкідливих речовин, зокрема оксидів азоту NO_x та сірки SO_x , що є одним з головних завдань з забезпечення екологічності морського транспорту [8-10]. Оптимізація МГР дозволяє більш точно керувати процесами згоряння, що сприяє зменшенню токсичності випускних газів. Таким чином, нагальна потреба в розробці та впровадженні нових, більш надійних та ефективних конструктивних рішень, матеріалів і технологій для МГР є беззаперечною. Це дозволить забезпечити стабільну, безпечну та економічно вигідну експлуа-

тацію суднових двигунів, що, своєю чергою, сприятиме сталому розвитку морського транспорту в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження [11] зосереджене на аналізі поля течії та взаємодії вихорів у газовому потоці двох випускних клапанів двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Автори застосували експериментальні та чисельні методи для вивчення складних газодинамічних явищ. Результати демонструють сильну взаємодію вихрових структур, що впливають на коефіцієнт корисної дії (ККД) будь-якого теплового двигуна, обладнаного МГР. Робота показує перспективність МГР у підвищенні енергоефективності суден. Водночас визначені області можливих втрат, що вимагають оптимізації конструкцій.

У статті [12] представлено результати вимірювань кавітаційних процесів у проточній частині МГР. Авторами використано експериментальні методики та сучасні засоби візуалізації. Дослідження показує залежність розвитку каверн від режимів роботи МГР. Робота підтверджує важливість оптимізації геометрії тарілок клапанів для зниження шуму та вібрацій. Отримані дані можуть бути основою для удосконалення високооберткових суднових ДВЗ.

В роботі [13] розглянуто вплив різних навантажувальних умов на поле течії, створене двома газовими потоками. Результати показують значні зміни у структурі газового потоку залежно від режиму роботи МГР. Доведено, що правильне узгодження швидкісних параметрів є критично важливим для ефективності ДВЗ. Виявлені закономірності дозволяють підвищити прийомистість ДВЗ суднових енергетичних установок.

У [14] здійснено порівняльний аналіз топологій МГР двигунів малої потужності. Дослідження враховує електромагнітні, теплові та енергетичні аспекти конструкцій. Показано, що вибір оптимальної топології МГР суттєво впливає на ефективність роботи цих двигунів. Представлені результати демонструють потенціал покращення МГР для двигунів суден морського транспорту. Це відкриває перспективи для розробки більш енергоефективних ощадних суднових установок.

Дослідження [15] присвячено визначенню оптимального узгодження фаз відкриття та закриття МГР з метою мінімізації енергоспоживання. Методика передбачає багатопараметричний аналіз режимів роботи ДВЗ. Результати показують, що правильне налаштування МГР дозволяє значно знизити витрату палива. Дослідження має практичне значення для проектування сучасних енергетичних

установок суден. Автори підкреслюють важливість інтеграції газодинамічних і енергетичних параметрів.

У [16] представлено систему гібридної передачі даних для безпілотних надводних апаратів в умовах завад. Дослідження зосереджене на надійності та безперервності роботи в складних умовах. Розробка має прямий зв'язок з удосконаленням управління енергетичними установками. Використання такої системи дозволяє підвищити ефективність і безпеку функціонування суднових комплексів.

В роботі [17] виконано чисельне моделювання кавітаційного шуму МГР із застосуванням акустичного рівняння Фоукса-Вільямса-Гокінгса. Досліджено вплив кавітаційних явищ на шумові характеристики МГР. Результати свідчать, що оптимізація параметрів МГР дозволяє знизити інтенсивність випромінювання ДВЗ.

У [18] розглянута взаємодія газових потоків, що утворюються під час застосування реєстрового наддуву. Дослідження базується на експериментальних та чисельних методах оптимізації фаз роботи МГР. Автори показали складність газодинаміки подібних систем та їх вплив на ефективність. Результати важливі для вдосконалення конструкцій, здатних мінімізувати енергетичні втрати.

Дослідження [19] присвячено визначенню впливу технічного стану поверхонь МГР на паливну ефективність судна. Результати свідчать, що навіть незначні відхилення у стані поверхонь суттєво змінюють витрату палива. Автори підкреслюють необхідність регулярного технічного обслуговування МГР. Робота демонструє, що оптимізація МГР має супроводжуватися контролем стану їх «повітряних» та «газових». Це важливий аспект для інтегрованої стратегії енергоефективності суден.

У публікації [20] розглянуто параметри ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Хоча робота спрямована на залізничну сферу, підходи можуть бути застосовані й для суднових установок. Автори досліджують оптимальність енергозберігаючих систем. Розробка сприяє підвищенню автономності транспортних засобів. Це створює наукові передумови для інтеграції альтернативних джерел у судноплавстві.

У роботі [21] вивчені можливості зниження витрати палива завдяки оптимальному використанню МГР. Робота показує, що вибір параметрів МГР суттєво впливає на енергоефективність. Автори довели ефективність комбінованого підходу під час проектування.

Практична користь полягає у потенційному зниженні експлуатаційних витрат.

Дослідження [22] присвячено перспективам відновлюваної енергетики у судноплавстві. Автори аналізують технологічні та екологічні аспекти інтеграції нових джерел енергії. Дослідження демонструє важливість переходу на стійкіші системи. Результати можуть бути враховані у створенні гібридних суднових установок. Це підвищує екологічну ефективність морського транспорту.

Робота [23] підтверджує важливість оптимізації МГР для зменшення паливних витрат. Автори наводять експериментальні та розрахункові результати. Показано, що удосконалення геометрії МГР дає значний ефект. Практична реалізація сприятиме економії ресурсів. Це підкреслює актуальність тематики для сучасного суднобудування.

Дослідження [24] присвячено вивченню параметрів МГР енергії для транспортних засобів. Автори обґрунтовують як теоретичні, так і практичні аспекти використання систем управління газовими та повітряним потоками. Висновки дослідження є універсальними. Вони можуть бути адаптовані для суднових енергетичних установок. Це розширює спектр методів підвищення енергоефективності у морському транспорті.

У роботі [25] запропоновано методику вибору двигуна і МГР з урахуванням мінімізації витрати палива. Автори застосували комплексний підхід для визначення оптимальних параметрів налаштування МГР. Дослідження демонструє зв'язок між характеристиками двигуна і МГР. Результати підтверджують доцільність використання регульованого випуску газів. Це відкриває перспективи для оптимізації суднових енергетичних установок.

У дослідженні [26] розроблена методика відкритих випробувань гібридного ДВЗ. Автори представили експериментальну базу для визначення характеристик його МГР. Дослідження підтверджує переваги багатофазного випуску для подібних двигунів.

Аналіз наукової та технічної літератури свідчить, що питанню підвищення надійності й ефективності механізмів газорозподілу суднових двигунів, попри його беззаперечну важливість, не приділено належної уваги. Існуючі дослідження здебільшого зосереджені на загальних питаннях роботи двигунів внутрішнього згоряння або на окремих аспектах, як-от використання нових матеріалів чи вдосконалення систем змащення. Комплексного підходу, який би об'єднував

аналіз конструктивних недоліків, розрахунків навантажень та вібрацій, а також розробку інноваційних рішень, що враховують особливості експлуатації в морських умовах, майже не існує. Відсутність систематизованих даних про типові відмови та їх причини у сучасних МГР також створює дослідницьку прогалину, яку необхідно заповнити. Це підкреслює необхідність проведення глибокого науково-прикладного дослідження.

Постановка завдання. Сучасні суднові двигуни працюють в екстремальних умовах, що висуває надзвичайно високі вимоги до всіх їх компонентів. Механізми газорозподілу є одним із найбільш навантажених вузлів, робота якого безпосередньо визначає економічні та екологічні показники двигуна. Проблема полягає в тому, що попри постійне вдосконалення технологій, надійність цих механізмів залишається відносно низькою. Використання важкого палива, високі термічні й механічні навантаження, а також вібрації призводять до передчасного зносу кулачкових валів, корозії клапанів та їх сідел, а також до руйнування пружин та інших елементів.

Наслідками цих відмов є не лише зниження потужності та збільшення витрати палива, а й ризик серйозних аварій, що можуть призвести до повного виходу двигуна з ладу. Економічні втрати від простоїв судна, ремонту та заміни дорогого обладнання є значними. Крім того, неоптимальна робота МГР призводить до неповного згоряння палива, що збільшує викиди шкідливих речовин, суперечачи міжнародним екологічним нормам. Таким чином, існує нагальна потреба у розробці ефективних, надійних та економічно обґрунтованих рішень для підвищення працездатності МГР.

Завданням дослідження є наукове обґрунтування та розробка перспективних шляхів підвищення надійності та ефективності механізмів газорозподілу судових двигунів. Це включає аналіз існуючих проблем, розробку нових конструктивних рішень та впровадження інноваційних технологій, що дозволять досягти оптимальних показників роботи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Конструктивні рішення щодо удосконалення судових двигунів повинні бути спрямовані на забезпечення довговічності та безперебійної роботи двигуна. Ця може бути досягнута:

використанням міцних матеріалів – застосування високотемпературних матеріалів, які можуть витримувати екстремальні навантаження, значно зменшує ризик зносу та пошкодження компонентів;

додатковим розміщенням інформаційних датчиків – дублювання важливих датчиків забезпечує надійність системи керування. Якщо один датчик виходить з ладу, інший продовжує надавати необхідні дані, запобігаючи аварійному відключенню;

встановленням перепускних клапанів – цей елемент керує потоком газів, захищаючи турбокомпресор та інші компоненти від надмірного тиску, що є критично важливим для їхньої довготривалої роботи.

Підвищення ефективності ГРМ досягається впровадженням інновацій, спрямованих на зменшення споживання палива та підвищення потужності двигуна. До них відносяться:

система рекуперації тепла – обладнання, яке перетворює тепло відпрацьованих газів на додаткову енергію. Це дозволяє використовувати енергію, яка інакше була б втрачена, значно підвищуючи загальний ККД двигуна;

оптимізована форма впускних і випускних каналів – сприяє кращому змішуванню палива з повітрям та ефективнішому згорянню;

турбокомпресор зі змінною геометрією – технологія дозволяє змінювати потік газів через турбіну, що забезпечує оптимальну продуктивність наддуву за різних обертів двигуна та навантажень.

Ці рішення працюють разом, створюючи цілісну систему, яка не лише підвищує продуктивність двигуна, а й робить його більш стійким до відмов, що є ключовим для забезпечення надійності робот суден морського транспорту.

Висновки і перспективи подальших досліджень. За результатами проведеного науково-прикладного дослідження можна зробити такі висновки:

Проблеми надійності та ефективності механізмів газорозподілу судових двигунів є актуальними, існуючі технічні рішення не повною мірою відповідають сучасним вимогам.

Основними причинами відмов є динамічні навантаження, абразивний знос та корозія, спричинені агресивним середовищем та використанням низькосортного палива.

Застосування нових матеріалів, таких як керамічні та композитні покриття, що суттєво підвищують зносостійкість деталей.

Інноваційні конструктивні рішення, зокрема оптимізовані профілі кулачків та системи приводу, дозволяють знизити вібрації і підвищити точність роботи механізму.

Впровадження результатів дослідження дозволить скоротити експлуатаційні витрати, зменшити ризик аварій та підвищити паливну ефективність суднових двигунів.

Отримані дані можуть бути використані для модернізації існуючих двигунів та проєктування нових, більш надійних та екологічних.

Перелік використаних джерел

1. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport Systems and Technologies*. 2024. Vol. 43. P. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2

2. 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. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

3. 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*. 2021. № 7-8. P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

4. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2018. № 7-8. P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.

5. 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. P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

6. Kuropyatnyk O.A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). P. 203-211. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52992

7. 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. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

8. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport //

Sustainability. 2025. Vol. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.

9. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides // *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. №4(1(84)). P. 72–79. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.

10. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

11. Alves Pereira F., Capone A., Di Felice F.. Flow field and vortex interactions in the near wake of two counter-rotating propellers // *Applied Ocean Research*. 2021. Vol. 117. P. 102918. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102918>.

12. Capone A., Alves Pereira F., Di Felice F. Flow and cavity measurements in a super-cavitating propeller // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(2). P. 243. <https://doi.org/10.3390/jmse12020243>.

13. Capone A., Di Felice F., Alves Pereira F. On the flow field induced by two counter-rotating propellers at varying load conditions // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 221. P. 108322. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108322>.

14. Cheng B., Pang S., Ou H., Hu Z., Mao Z. Comparative research on topologies of contra-rotating motors for underwater vehicles // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11(11). P. 2042. <https://doi.org/10.3390/jmse11112042>.

15. Hou L., Yin L., Hu A., Chang X., Lin, Y., Wang, S. Optimal matching investigation of marine contra-rotating propellers for energy consumption minimization // *Journal of Marine Science and Technology*. 2021. Vol. 26. P. 1184–1197. <https://doi.org/10.1007/s00773-021-00809-x>.

16. Kurdiuk S., Dremliuk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // *Drones*. 2025. Vol. 9(3). P. 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.

17. Hu J., Ning X., Zhao W., Li F., Ma J., Zhang W., Sun S., Zou M., Lin C. Numerical simulation of the cavitating noise of contra-rotating propellers based on detached eddy simulation and the Ffowcs Williams–

Hawkings acoustics equation // *Physics of Fluids*. 2021. Vol. 33(11). P. 115117. <https://doi.org/10.1063/5.0065456>.

18. Posa A., Capone A., Alves Pereira F., Di Felice F., Broglia R. Interaction between the helical vortices shed by contra-rotating propellers // *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36(5). P. 055116. <https://doi.org/10.1063/5.0207145>.

19. Tadros M., Ventura M., Guedes Soares C. Effect of Hull and Propeller Roughness during the Assessment of Ship Fuel Consumption // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 11(4). P. 784. <https://doi.org/10.3390/jmse11040784>.

20. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2/1(92). P. 63-71. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126080.

21. Tadros M., Ventura M., Guedes Soares C. Towards Fuel Consumption Reduction Based on the Optimum Contra-Rotating Propeller // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10(11). P. 1657. <https://doi.org/10.3390/jmse10111657>.

22. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

23. Tadros M., Ventura M., Guedes Soares C. Towards fuel consumption reduction based on the optimum contra-rotating propeller // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10(11). P. 1657. <https://doi.org/10.3390/jmse10111657>.

24. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozia P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock // *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Iss. 5(1). P. 79-87. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/8.

25. Tadros M., Vettor R., Ventura M., Guedes Soares C. Coupled Engine-Propeller Selection Procedure to Minimize Fuel Consumption at a Specified Speed // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(1). P.59. <https://doi.org/10.3390/jmse9010059>.

26. Wakabayashi T., Katsui T. Propeller Open-Water Test Method for Hybrid Contra Rotating Propeller // Journal of Marine Science and Engineering. 2025. Vol. 13(5). P. 858. <https://doi.org/10.3390/jmse13050858>.

10.31653/smf50.2025.141-154

Хлієва О.Я., Константинов О. І.

Національний університет “Одеська морська академія”

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВКИ НА ОСНОВІ ОРГАНІЧНОГО ЦИКЛУ РЕНКІНА НА РІЗНИХ РОБОЧИХ ТІЛАХ ДЛЯ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ ВОДИ ОХОЛОДЖЕННЯ ДВИГУНА WÄRTSILÄ 12V46F

Вступ

Останніми роками пошуку раціональних схемних рішень та вивченню доцільності впровадження систем, що реалізують органічний цикл Ренкіна – Organic Rankin Cycle (ORC) – для рекуперації скидної теплоти судових енергетичних установок (СЕУ), привертається багато уваги [1–4]. На сьогодні парові турбіни для утилізації теплоти СЕУ вже є традиційними й їм все ж дається більше переваги виробниками та судновласниками, оскільки на торговельних судах простіше працювати з «класичним» водяним паром, ніж з «органічними» речовинами. Однак, турбіни на «органічних» речовинах все ж мають певні переваги, перш за все це вища ефективність при утилізації низько потенційної теплоти, коли температурного рівня недостатньо для забезпечення роботи класичної парової турбіни.

Першим судном, на якому у 2012 році була впроваджена така ORC система було m/v «Figaro» (заявлена електрична потужність 500 кВт) [5]. У подальшому такі системи потрохи впроваджуються (здебільшого як пілотні проекти) на нових судах. Після цього, у 2010-х на лайнерах Costa (Carnival Corp.) було проведено тестування ORC систем від Turboden. На сьогодні круїзні лайнери Fincantieri для Virgin Voyages, такі як Scarlet Lady (2020), Valiant Lady (2021), Resilient Lady (2022), Brilliant Lady (у процесі), усі оснащені Turboden ORC-установками потужністю порядку 1 МВт. Нові поромы Grimaldi Group, побудовані Fincantieri, були оснащені ORC-модулями. Окрім того, Wärtsilä та MAN Energy Solutions активно працюють над впровадженням та розробкою технологій на основі ORC для утилізації скидної теплоти СЕУ та вже встановлюють пілотні ORC-блоки на комерційні судна.

На сьогодні саме круїзні лайнери є найбільш перспективними для впровадження систем на основі ORC, тому що по перше мають високу потребу у електроенергії, по друге, великі круїзні компанії актив-

но просуваються себе як «зелені» й «екологічні» (наприклад, Virgin Voyages), по третє, використання ORC систем сприяє скороченню викидів забруднюючих речовин, що особливо важливо в зонах ЕСА (Emission Control Area), у четвертих, для великих пасажирських лайнерів ORC системи окупаються швидше, ніж на судах торговельного флоту. Перспективним є впровадження таких систем на LNG-танкерах та контейнеровозах, а також на інших типах суден.

Однак, ефективність роботи ORC системи залежить від багатьох факторів, включаючи обране джерело теплоти СЕУ, режим роботи СЕУ, параметри навколишнього середовища, тип робочого тіла. Таким чином, доцільність впровадження ORC системи є нетривіальною задачею, та вирішується окремо для кожного конкретного випадку. Для прийняття обґрунтованого рішення необхідно провести детальний аналіз, який враховує технічні особливості системи, капітальні та експлуатаційні витрати, очікувану економію для конкретних умов експлуатації системи, а також екологічні вимоги до судна.

Судновласники розглядають можливість встановлення ORC системи, якщо вона буде працювати щонайменше 5000-6000 годин на рік [6]. СЕУ судна не працює за постійним режимом, профіль експлуатації судна може змінюватися, а також змінюється температура забортної води протягом року. Все це суттєво впливає на доцільність роботи ORC системи.

Щоб заохотити судновласників ширше використовувати ORC системи на судах слід обрати найбільш раціональне схемне рішення цієї системи для конкретного судна та обґрунтувати економічну та екологічну доцільність її встановлення.

У даній роботі заплановано виконати порівняльний енергетичний аналіз двох схемних рішень судової ORC системи, яка живиться низькопотенційною теплою води охолодження двигуна Wärtsilä 12V46F. Ці двигуни знайшли широке застосування саме на пасажирських лайнерах. Низький потенціал води охолодження судових двигунів не використовується у повній мірі та може бути перспективним для ORC систем, однак при цьому конфігурація схемного рішення такої системи та обране робоче тіло будуть суттєво визначати їх ефективність. Тому потребують додаткового аналізу.

Вхідні дані та методи дослідження

В якості головного двигуна було прийнято чотирьохтактний двигун Wärtsilä 12V46F (14400 кВт). Система охолодження двигуна прісною водою поділяється на високотемпературний (НТ) і низько-

температурний (LT) контури та розглянута у попередній роботі авторів [4]. Вода HT контуру була прийнята як джерело теплоти для ORC установки.

Характеристики роботи двигуна Wärtsilä 12V46F прийняті відповідно до [7]. Інформація стосовно витрати води HT контуру в залежності від навантаження на двигун виробником не надається. Тому вона була оцінена з складових теплового балансу двигуна при 100 % навантаженні відповідно до наведених у [7] даних, з урахуванням того, що в елементах двигуна вода HT контуру нагрівається від 74 до 93 °С, та прийнята пропорційною навантаженню. Вхідні данні, а також і припущення, що були прийняті для аналізу, наведено нижче.

- Температура води HT контуру на вході в ORC систему прийнята рівною 74 °С.

- Температура води HT контуру на виході з ORC системи прийнята рівною 91...95 °С.

- Витрата води HT контуру при 100 % навантаженні 61,2 кг/с (на даному етапі дотиковий відбір води на інші потреби не розглядався).

- Температура заборотної води варіювалася в інтервалі 2...30 °С.

- Температура конденсації робочого тіла варіювалася в інтервалі 8...36 °С.

- Режим роботи ORC установки стаціонарний.

- Втрати тиску, втрати тепла в теплообмінниках і трубах не враховувалися.

- Ізоентропний ККД турбіни прийнятий рівним 0,7 [8].

- Механічний ККД турбіни прийнятий 0,98.

- ККД електрогенератора прийнятий 0,98.

- ККД живильного насосу прийнятий рівним 0,5 на основі експериментальних даних, наведених у роботі [9], а також власного експериментального досвіду [10]. Для шестеренного насоса ці величини слабко змінюються у широкому інтервалі робочих параметрів (окрім режиму з малими навантаженнями).

- Найменший температурний напір у теплообмінниках - pinch point - прийнятий рівним $\Delta T_{pp}=5$ К [4] для всіх теплообмінників, що аналізуються у роботі (теплообмінники з теплоносіями у газоподібному стані, які потребують більшого температурного напору, тут не розглядаються). Для підвищення ефективності ORC установки pinch point доцільно обирати мінімальною, однак при цьому площа теплообмінної поверхні та потужність насосів збільшуються, тому визна-

чення оптимального значення pinch point може розглядатися як окрема задача.

- Розрахунки виконувалися при навантаженні на двигун 75 %.
- Рух теплоносіїв у РТО приймався протитечію.

Розрахунок енергетичних характеристик органічного циклу Ренкіна виконувався за класичним підходом [11-13] з урахуванням теплофізичних властивостей води та робочих тіл [14]. При цьому метою було визначення такої температури кипіння робочого тіла для певних вхідних параметрів циклу (температур гарячої води на вході та виході, та конденсації), яка забезпечить прийнятну величину $\Delta T_{pp}=5$ К.

Вибір схемних рішень та робочих тіл

Для подальшого аналізу були розглянуті два схемних рішення, які базувалися на (рис. 1):

- термодинамічному циклі з одноступеневим розширенням робочого тілу в турбіні без регенерації теплоти у циклі;
- регенеративний термодинамічний цикл з одноступеневим розширенням робочого тілу в турбіні.

Рационально обраний регенеративний теплообмінник (РТО) є доволі простим та недорогим технічним рішенням для підвищення ефективності енергетичних установок на основі циклу Ренкіна [15]. Його застосування в судових ORC установках пропонується у ряді досліджень [2]. Хоча його наявність може створювати додатковий гідравлічний опір. В деяких роботах при аналізі судових ORC установок, що живляться теплою охолодження СЕУ та/або теплою газоподібних продуктів згорання, пропонується як базовий розглядати цикл без регенерації теплоти [3, 16]. Таким чином, однозначного рішення о доцільності застосування РТО немає, тому виникає потреба для кожного окремого схемного рішення та робочого тіла розглядати це питання окремо.

Принципова схема ORC системи з РТО (а) та без РТО (б), а також схематичне зображення ORC в T-s діаграмі, наведена на рис. 1. Вузлові точки на схемах та зображенні термодинамічного циклу відповідають одна одній.

Окрім схемного рішення на ефективність ORC установки буде оказувати суттєвий вплив рационально обране робоче тіло. Основні вимоги до робочого тіла установки, наступні [17, 18]: термодинамічні параметри (висока теплота випаровування, рациональна нормальна температура кипіння відносно температури джерела тепло-

ти); стабільність при високих температурах, сумісність з матеріалами, нетоксичність і негорючість; вартість і доступність на ринку; екологічні показники.

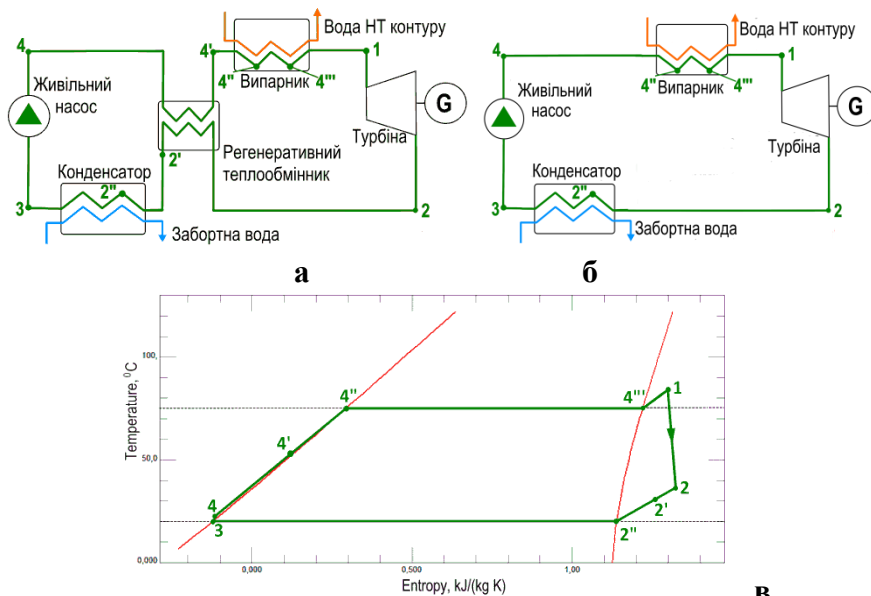


Рис. 1. Принципова схема суднової ORC установки з регенерацією теплоти у циклі (а), без генерації теплоти у циклі (б) та схематичне зображення ORC у T-s діаграмі пентану при параметрах роботи установки, що аналізують у роботі (в)

На основі виконаного огляду робіт [1-3, 16, 19-22], для подальшого аналізу було обрано R1233zd(E) як робоче тіло нового покоління (гідрофторолефіни - ненасичені фторвмісні вуглеводні) з дуже низьким GWP, R245fa як традиційне робоче тіло (фторвуглеводень) та R601(н-пентан) як представник т.з. «природних» робочих тіл з дуже низьким GWP. Зображення кривих насичення у T-s діаграмі для трьох робочих тіл, що були отримані за допомогою [14] наведені на рис. 2. Деякі характеристики робочих тіл наведено у таблиці 1.

Якщо проаналізувати обрані робочі тіла, то очевидно, що кожен з них має свої недоліки. R601 є горючим (хоча з 2024 року Lloyd's Register дозволив використання вуглеводнів як робочих тіл [24]), R1233zd(E) є робочим тілом нового покоління, ще мало вивчений та має дуже високу вартість, R245fa має високий показник глобального потеплення та токсичний (хоча саме від переважно використовується

у пілотних суднових ORC установках). Слід відзначити, що вимоги законодавчих актів до робочих тіл суднових ORC установок принципово не відрізняються від вимог до робочих тіл суднових холодильних систем [18, 25], тому застосування н-пентану (R601) як робочої речовини буде потребувати забезпечення додаткових мер безпеки, що вплине на вартість усієї установки.

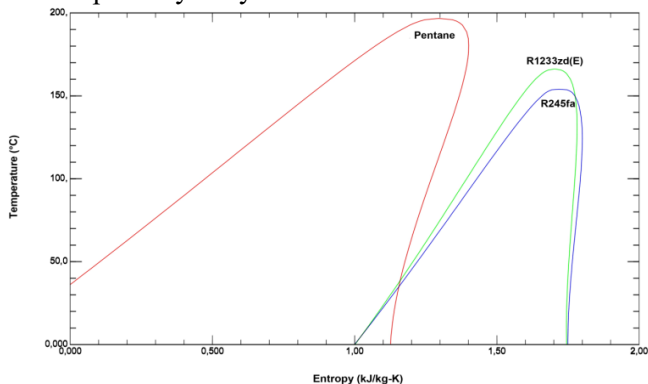


Рис. 2. Зображення кривих насичення у T-s діаграмі для трьох робочих тіл, що були отримані за допомогою [14]

Таблиця 1. Характеристики обраних для аналізу робочих тіл [14, 23]

Назва за ASHRAE	R601	R1233zd(E)	R245fa
Назва хімічної сполуки	н-пентан	транс-1 хлор-3,3,3- трифтор-1- пропілен	1,1,1,3,3- пентафтор- пропан
Екологічність та безпека			
Група безпеки відповідно класифікації ASHRAE (токсичність та горючість)*	A3	A1	B1
Потенціал глобального потепління GWP	5	4,5	1030
Теплофізичні			
Нормальна температура кипіння (при 0 бар за манометром) $t_{b,p}$, °C	36,06	18,26	15,05
Критична температура t_c , °C	196,6	166,4	153,9
Теплота пароутворення при нормальній температурі кипіння h_v , кДж/кг	357,7	194,6	196,8

* А – нетоксичний, В – токсичний (рівень токсичності R245fa нижче, ніж у R717 аміаку), 1 – незаймистий, 3 – високий рівень пожежної небезпеки.

Результати аналізу та їх обговорення

Обґрунтування схемного рішення

Для обґрунтування доцільності застосування РТО у схемі суднової ORC установки, що живиться водою охолодження суднового двигуна, було виконано енергетичний аналіз двох схемних рішень при різних температурах конденсації робочого тіла (забортної води). Приклад зміни температури теплоносіїв у теплообмінних апаратах ORC установки від кількості переданої теплоти (зміни ентальпії потоків теплоносіїв) для двох різних конфігурацій циклу при режимів роботи з температурою забортної води $t_{зг}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ наведено на рис. 3.

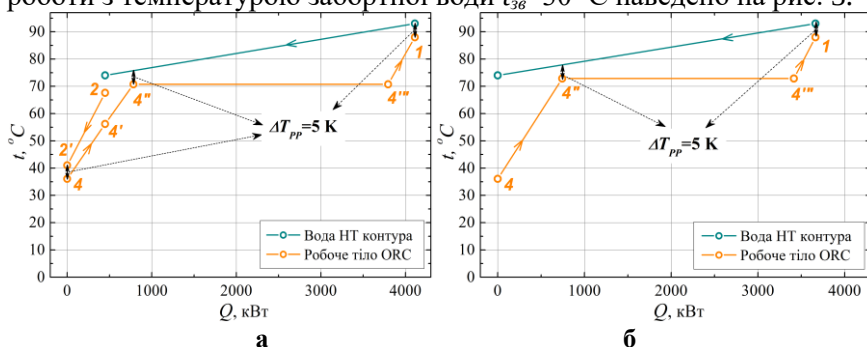


Рис. 3. Зміна температур теплоносіїв у протитокових теплообмінниках ORC установки (робоче тіло R601, $t_{зг}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, вузлові точки відповідають зображенням на рис. 1: (а) регенеративний цикл; (б) нерегенеративний цикл

Наведені на рис. 3 результати показують, що реалізація нерегенеративного циклу забезпечує підтримку більшої температури кипіння робочого тіла, у регенеративному циклі. Причому, для параметрів ORC, що аналізуються у роботі, на прикладі R601 така різниця складає приблизно 2 K у всьому інтервалі $t_{зг}$ – рис. 4. Більша температура кипіння буде забезпечить більший тиск робочого тіла перед турбіною, та, як наслідок, вищу питому роботу турбіни.

Однак ефект більшого тиску перед турбіною може бути нівельований тим, що в регенеративному циклі буде підведене більше теплоти до робочого тіла за рахунок попереднього підігріву рідкого робочого тіла паром після турбіни – рис. 1. На рис. 5 наведені результати розрахунку загального ККД установки на основі регенеративного та нерегенеративного ORC від $t_{зг}$ при використанні робочого тіла R601.

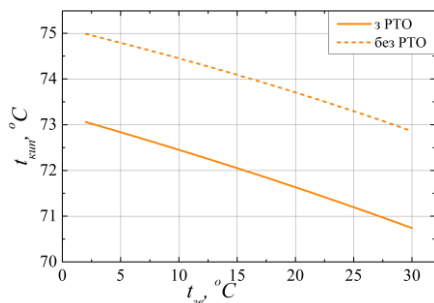


Рис. 4. Залежність температури кипіння від t_{36} для регенеративного та нерегенеративного ORC (робоче тіло R601)

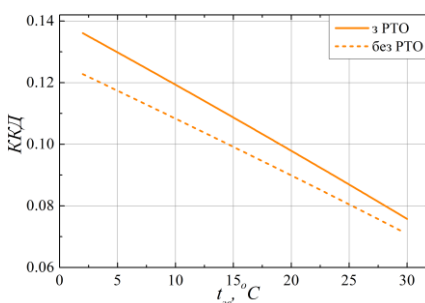


Рис. 5. Залежність загального ККД ORC установки на основі регенеративного та нерегенеративного циклу від t_{36} (робоче тіло R601)

Не зважаючи на більший тиск перед турбіною, ефективність нерегенеративного ORC суттєво нижче, тому для подальшого аналізу доцільності використання різних робочих тіл доцільно розглядати тільки регенеративний ORC. Однак, слід враховувати, що окрім додаткових втрат на створення ПТО (хоча його вартість відносно невисока), цей теплообмінник у контурі ORC системи є додатковим гідравлічним опором, який приводить до втрат тиску, та, як наслідок, зниженню ефективності системи. В даній роботі це питання не досліджувалося. Тому питання доцільності застосування ПТО слід вивчати більш глибоко вже при проектуванні реальної ORC системи.

Енергетичне обґрунтування вибору робочого тіла

Для обґрунтування раціонального з енергетичної точки зору робочого тіла було виконане термодинамічний розрахунок регенеративного ORC та оцінено загальний ККД установки на його основі при роботі на трьох різних робочих тілах, обраних у попередньому розділі. Залежність ККД циклу та загального ККД установки від t_{36} для різних робочих тіл наведені на рис. 6. Не зважаючи на близьке зайчення реального ККД циклу для трьох обраних для аналізу робочих тіл, загальний ККД ORC установки для R245fa та R1233zd(E) нижче, ніж для R601. Пояснюється отриманий результат різною потужністю живильного насоса для R245fa та R1233zd(E) та для R601. Це пов'язано переважно з приблизно в два рази більшою масовою витратою R245fa та R1233zd(E) (рис. 7), ніж R601 у контурі ORC системи (завдяки меншій теплоті фазового переходу R245fa та R1233zd(E) ніж R601, що добре ілюструє рис. 2 та табл. 1). Додатковий вплив оказує різна ступень підвищення тиску у циклі для різних

робочих тіл. Все це визначає значну різницю в електричній потужності живильного насоса робочого тіла.

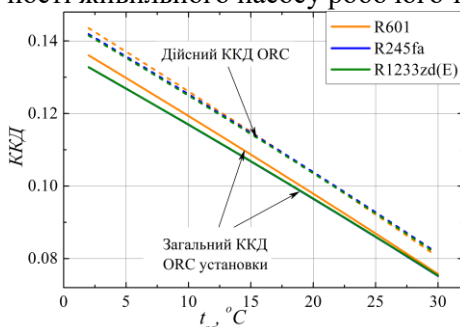


Рис. 6. Залежність ККД дійсного циклу та загального ККД ORC установки від t_{36} при використанні різних робочих тіл

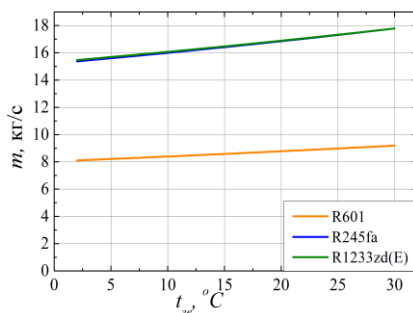


Рис. 7. Залежність витрати робочого тіла в контурі ORC установці від t_{36}

Залежність механічної потужності турбіни від t_{36} при використанні різних робочих тіл та 75 % навантаженні двигуна наведена на рис. 8. Більш чітко ефект робочого тіла на вихідну потужність (електричну) ORC установки при різних t_{36} наведено на рис. 9.

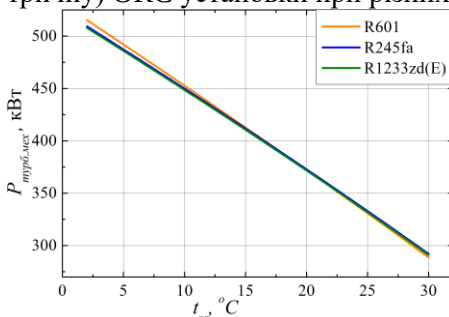


Рис. 8. Залежність механічної потужності турбіни від t_{36} при використанні різних робочих тіл

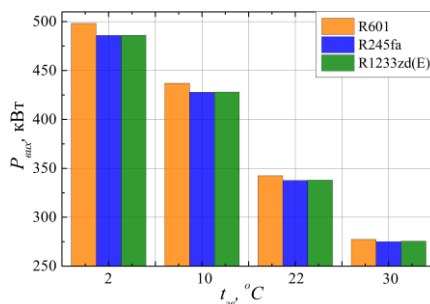


Рис. 9. Залежність вихідної потужності ORC установки від t_{36} при використанні різних робочих тіл

З результатів, наведених на рис. 8 та 9 видно, що ефективність ORC дуже суттєво, майже у два рази, знижується при підвищенні температури заборотної води з 2 до 30 °C. Тому доцільність та термін окупності такої установки вище для суден, які знаходяться більшу частину рейсів у холодних видах. Для суден, які переважно перебувають у регіонах з високою температурою заборотної води може бути доцільним впровадження теплоутилізаційних ежекторних холодиль-

них машин, які зможуть забезпечувати холодом систему кондиціювання, знижуючи при цьому загальне споживання електроенергії.

Як видно з рис. 8 та 9, R601 як робоче тіло забезпечує більше вироблення механічної роботи при низьких температурах забортної води, ніж інші два робочих тіла. Так, при $t_{36} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ORC установка на R601 видає на 2,5 % вище електроенергії, а при $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – на 2,2 % вище, ніж на R245fa.

Окрім більшої ефективності ORC системи на R601, менша витрата R601 у контурі установки сприятиме меншим габаритним розмірам основних та допоміжних елементів, що надзвичайно важливо для суднових умов.

Загальне порівняння обраних для аналізу робочих тіл

Як видно з попереднього аналізу, R601 забезпечує декілька вищу енергетичну ефективність, ніж та R1233zd(E) та R245fa, однак є горючим робочим тілом, що є найбільшою проблемою при його використанні на судні. Разом з тим, R245fa токсичний, хоча саме він є найбільш розповсюдженим робочим тілом у суднових ORC системах. Однак, завдяки високому потенціалу глобального потеплення GWP це робоче тіло не має перспектив для застосування у нових систем у наступні роки. Холодоагент нового покоління R1233zd(E) поки що мало вивчений, має дуже високу вартість, потребує спеціальних компресорних мастил тому його подальші перспективи на сьогодні не зрозумілі, особливо з урахуванням того, що провідні кваліфікаційні товариства, такі як Lloyd's Register (LR), Det Norske Veritas (DNV) та Bureau Veritas (BV) вже дозволяються використовувати горючі робочі тіла у суднових холодильних системах (як наслідок, й у ORC системах). Хоча не всі з них дозволяють використовувати вуглеводні (найвищий рівень пожежної небезпеки), однак саме Lloyd's Register з 2024 р. вуглеводні дозволені як робочі тіла холодильного обладнання [24]. Узагальнене порівняння переваг та недоліків трьох розглянутих робочих тіл наведено в таблиці 2.

Базуючись на виконаному аналізі, можна констатувати, що вибір раціонального робочого тіла для суднової ORC не тривіальна задача. На думку авторів, R601 є більш раціональним робочим тілом у розглянутій системі, ніж R245fa та R1233zd(E). Основний недолік R601 як робочого тіла – горючість. Тому для реалізації проекту з впровадження ORC установки на R601 потрібно буде забезпечувати певні заходи безпеки. Перш за все, це відсутність елементів установ-

ки у машинному відділенні. Ця вимога для випадку, коли як джерела вторинної теплоти використовується вода НТ контура, не має труднощів у реалізації. На сьогодні у наукових дослідженнях активно розглядаються перспективи вуглеводнів як робочих тіл судових ORC установок. Однак, це питання потребує подальшого аналізу, що заплановано авторами виконати у наступних дослідженнях.

Таблиця 2. Основні узагальнені характеристики використання обраних робочих тіл

	R245fa	R601	R1233zd(E)
Екологічність за показником GWP	Високий	Низький	Низький
Потреба у додатковим мерах безпеки при поводженні з робочим тілом	Потребує (токсичне)	Потребує (горюче)	Не потребує
Енергетична ефективність	Декілька нижче, ніж у R601	Найвища з розглянутих	Декілька нижче, ніж у R601
Габаритні розміри установки	Вище, ніж для R601	Найнижча з розглянутих	Вище, ніж для R601
Вартість робочого тіла	Низька	Дуже низька	Дуже висока

Висновки

Робота присвячена енергетичному аналізу судової установки на основі органічного циклу Ренкіна (ORC), яка живиться теплотою води охолодження судового двигуна Wärtsilä 12V46F. Проаналізовано ефективність двох конфігурацій ORC при змінній температурі забортної води (приймач теплоти) – регенеративного та нерегенеративного циклу, а також ефективність ORC установки на основі регенеративного циклу для трьох робочих тіл: R601, R245fa та R1233zd(E), та проаналізовано доцільність використання кожного з них.

На основі виконано аналізу отримано наступні висновки.

1. Показано, що при наявності регенеративного теплообмінника в установці на основі ORC, яка живиться теплотою води охолодження двигуна Wärtsilä 12V46F з температурою на вході 93 °C та 74 °C на виході, температура кипіння R601 приблизно на 2 K нижче, ніж для нерегенартивного ORC. Однак, загальна ефективність установки на основі регенеративного циклу вище на 6,9...10,8 %, ніж для нерегенеративного ORC.

2. Масова витрата R245fa та R1233zd(E) як робочого тіла у конфігурації ORC системи приблизно в два рази більша, ніж R601, що пояснюється більшими значеннями теплоти фазного переходу останнього та визначає менші витрати на роботу живильного насоса та менші габаритні розміри усієї установки.

3. Значення ККД дійсного регенеративного ORC при однакових температурах джерела та приймача теплоти близькі для розглянутих робочих тіл та змінюються від 0,08 до 0,14 при зменшенні температури заборотної води від 30 °C до 2 °C.

4. Загальний ККД ORC установки на R601 вище приблизно на 2,5 %, ніж для R245fa (близьке значення й для R1233zd(E)) при роботі з низькою температурою заборотної води (2 °C), що пов'язане з меншими витратами на роботу живильного насоса для R601, ніж для R245fa та R1233zd(E). Однак, зі збільшенням температури заборотної води переваги R601 знижуються, при 10 °C його ефективність вже на 2,2 % вище, ніж R245fa, а при температурі заборотної води 30 °C – всього на 0,8 %.

5. Оцінена вихідна електрична потужність ORC установки, що утилізує теплоту води охолодження суднового двигуна Wärtsilä 12V46F при його 75 % навантаженні (максимальна тривала потужність 14400 кВт) при застосуванні як робочого тіла R601 варіюється від 290 кВт (при температурі заборотної води 30 °C) до 520 кВт (при 2 °C).

6. Пентан R601 є найбільш раціональним робочим тілом у розглянутій ORC установці, порівняно з R245fa та R1233zd(E). Основний його недолік як робочого тіла – горючість, що буде потребувати додаткових заходів по забезпеченню безпеки розглянутої установки. Однак, вуглеводні як робочі тіла холодильних систем (як наслідок, й ORC установок) з 2024 року дозволені до використання на борту судна Lloyd's Register при забезпеченні відповідних заходів безпеки.

Перелік використаних джерел

1. Akman M., Ergin S. Performance optimisation of ORC-based waste heat recovery system integrated with marine engine using alternative fuels under different operating conditions. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2025. Vol. 66. 104084. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104084>

2. Lebedevas S., Čepaitis T. Complex use of the main marine diesel engine high-and low-temperature waste heat in the organic rankine cycle.

J. Mar. Sci. Eng. 2024. Vol. 12(3). 521.
<https://doi.org/10.3390/jmse12030521>

3. Konur O., Yuksel O., Korkmaz S.A., Colpan C.O., Saatcioglu O.Y., Koseoglu B. Operation-dependent exergetic sustainability assessment and environmental analysis on a large tanker ship utilising Organic Rankine cycle system. *Energy*. 2023. Vol. 262. 125477.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125477>

4. Хлієва О.Я., Константинов О. І. Енергетична ефективність суднової установки на основі органічного циклу Ренкіна для рекуперації теплоти води охолодження двигуна Wärtsilä 12V46F. *Судові енергетичні установки*. 2024. Вип. 49. С. 137-151.
<https://doi.org/10.31653/smf49.2024.137-151>

5. Проспект судна M/V Figaro. Wallenius Lines AB. URL: https://walleniuslines.com/wp-content/uploads/2021/12/Figaro_NB4459.pdf (дата звернення: 19.05.2025)

6. Ng C. W., Modelling and simulation of organic Rankine cycle waste heat recovery system with the operational profile of a ship. Doctoral dissertation, Newcastle University. 2022.

7. Wärtsilä 46F. Product Guide. Wärtsilä, Marine Solutions. Vaasa, February 2020. 206 p. www.wartsila.com

8. Kölsch B., Radulovic J. Utilisation of diesel engine waste heat by Organic Rankine Cycle. *Appl. Therm. Eng.* 2015. Vol. 78. P. 437-448.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.004>

9. Zeleny Z., Vodicka V., Novotny V., Mascuch J. Gear pump for low power output ORC—an efficiency analysis. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 129. P. 1002-1009. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.227>

10. Шестопалов К.О. Експериментальне дослідження ефективності ежектора та холодильної машини у складі суднової системи кондиціонування повітря. *Суднові енергетичні установки*. 2024. №. 48. С. 143-158. <https://doi.org/10.31653/smf48.2024.143-158>

11. Balme R. T. Vapor and Gas Power Cycles. In *Modern Engineering Thermodynamics*. Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2011. P. 448-534.

12. Bejan A. Advanced engineering thermodynamics. John Wiley & Sons, 2016.

13. Moran M.J., Shapiro H.N., Boettner D.D., Bailey M.B. Fundamentals of engineering thermodynamics. John Wiley & Sons, 2010.

14. 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.

15. Огурцов Д.В., Козьмїних М.А., Хлієва О.Я. Аналіз ефективності застосування регенеративного теплообмінника у судновій холодильній машині провізійних камер при її переведенні з холодоагенту R404A на R407F. *Судові енергетичні установки*. 2023. Вип. 47. С. 206-216. <https://doi.org/10.31653/smf49.2024.137-151>

16. Shu G., Liu P., Tian H., Wang X., Jing D. Operational profile based thermal-economic analysis on an Organic Rankine cycle using for harvesting marine engine's exhaust waste heat. *Energy Convers. Manage.* 2017. Vol. 146. P.107-123. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.099>

17. Papadopoulos A.I., Stijepovic M., Linke P. On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles. *Appl. Therm. Eng.* 2010. Vol. 30(6-7). P. 760-769. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.12.006>

18. Khliyeva O., Sorokin R., Stukalenko O.A direct contribution of marine refrigeration to anthropogenic greenhouse gases emission - a short review. *Судові енергетичні установки*. 2022. Vol. 44. P. 36-44. <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.36-44>

19. Kocaman E., Karakuş C., Yağlı H., Koç Y., Yumrutaş R., Koç A. Pinch point determination and Multi-Objective optimisation for working parameters of an ORC by using numerical analyses optimisation method. *Energy Convers. Manage.* 2022. Vol. 271. 116301. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116301>

20. Qiu K., Entchev E. A micro-CHP system with organic Rankine cycle using R1223zd (E) and n-Pentane as working fluids. *Energy*. 2022. Vol. 239. 121826. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121826>

21. Oyewunmi O.A., Kirmse C.J., Pantaleo A.M., Markides C.N. Performance of working-fluid mixtures in ORC-CHP systems for different heat-demand segments and heat-recovery temperature levels. *Energy Convers. Manage.* 2017. Vol. 148. P. 1508-1524. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.078>

22. Yang M.H., Liu M.C., Yeh R.H. Investigation of low-GWP working fluids as substitutes for R245fa in organic Rankine cycle application. *Heliyon*. 2024. Vol. 10(14). e34219. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34219>

23. ASHRAE Handbook – Fundamentals. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. Inc.: Atlanta, GA, USA, 2021

24. LR-RU-001, 2024. Rules and Regulations for the Classification of Ships. Part 6: Control, Electrical, Refrigeration and Fire. Chapter 3 Refrigerated Cargo Installations.

25. Козьмініх М. А., Константинов О. І. Оцінка доцільності застосування холодильного агенту в залежності від умов експлуатації *Судові енергетичні установки*. 2022. Вип. 44. С. 79-87. <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.79-87>

10.31653/smf50.2025.155-159

Черемісін В.І., Сапіга В.В., Ігнатенко О.А.

Інститут Військово-Морських Сил
Національного Університету «Одеська Морська Академія»**ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ МОРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Вступ. Основним недоліком газотурбінних двигунів, які працюють за простим відкритим термодинамічним циклом є недостатньо високий коефіцієнт корисної дії у порівнянні з дизельними двигунами (наприклад, коефіцієнт корисної дії двигуна UGT25000 та LM2500, відповідно дорівнює 37,0 % та 41,3 %) та обмеження температури газоповітряного потоку на виході з камери згоряння. Фактор, обмеження температури газоповітряного потоку на виході з камери згоряння, обмежує можливість підвищення термічного коефіцієнта корисної дії газотурбінного двигуна [1-5]. Враховуючи одну із основних переваг газотурбінних двигунів у порівнянні з дизельним двигуном достатньо висока потужність що заключена у мінімальних масо-габаритних показниках, робить доцільним наукові дослідження щодо удосконалення існуючого термодинамічного циклу (цикл Брайтона).

Мета статті є дослідження основних показників удосконаленого термодинамічного циклу газотурбінних двигунів в якому передбачається розширення відпрацьованих газів із силової турбіни до тиску нижче атмосферного з одночасним процесом охолодження перед випуском їх в атмосферу, що в підсумку підвищує питому потужність двигуна.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо спосіб здійснення термодинамічного циклу газотурбінного двигуна, за яким гази розширюються в силовій газовій турбіні до тиску нижче атмосферного. Ця умова забезпечується та підтримується завдяки наявності в удосконаленій конструкції газотурбінного двигуна ресиверу-охолоджувача та пристрою, якій забезпечує створення тиску в ресивері нижче атмосферного (умовний, вакуумний насос). Охолоджуючої рідиною в даному циклі може бути хладагент утилізаційної абсорбційної холодильної установки, що в підсумку дозволить збільшити енергоефективність установки в цілому.

На рис. 1 представлений в координатах p - v та T - s термодинамічний цикл газотурбінного двигуна простого і відкритого типу, який враховує процес розширення газової суміші в силовій турбіні до тиску нижче атмосферного.

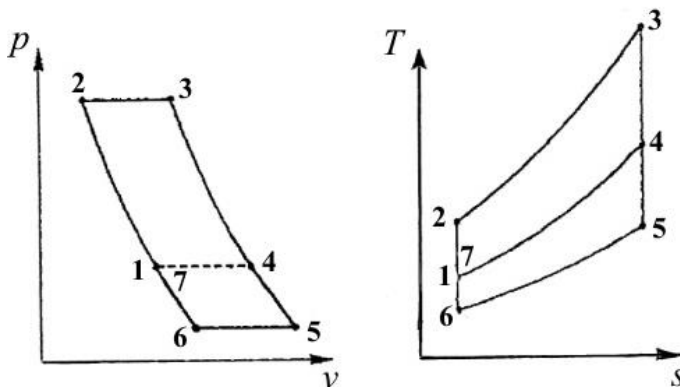


Рис. 1. Термодинамічний цикл газотурбінного двигуна з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного

Принципова схема газотурбінного двигуна, працюючого за удосконаленим термодинамічним циклом представлена на рис. 2.

Удосконалений термодинамічний цикл газотурбінного двигуна (мова в даній статті йде про ідеальний термодинамічний цикл) здійснюється наступним чином, а саме, повітря всмоктується компресором 1 із навколишнього середовища та ізоентропно стискується до тиску p_2 (процес 1-2, рис. 1) та надходить на вхід у камеру згоряння 2, де відбувається процес підведення тепла (процес 2-3, рис. 1). Газоповітряна суміш, яка володіє запасом потенційної енергії, в наслідок безперервного процесу підведення тепла надходить в газову турбіну 3, де ізоентропно розширюється до тиску нижче атмосферного (процес 3-5, рис. 1), якій утворюють в ресивері-охолоджувачі 5 за допомогою вакуумного насосу 6 (рис. 2). При цьому тепло від відпрацьованих газів відбирається холодагентом утилізаційної абсорбційної холодильної установки (процес 5-6, рис. 1) і далі їх тиск підвищується вакуумним насосом до атмосферного (процес 6-7, рис. 1).

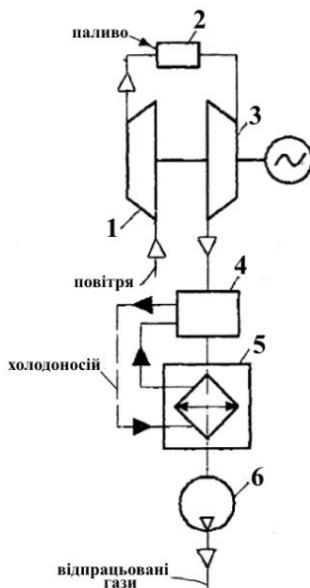


Рис. 2. Принципова схема газотурбінного двигуна з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного: 1 – компресор; 2 – камера згоряння; 3 – турбіна; 4 – утилізаційна абсорбційна холодильна установка; 5 – ресивер-охолоджувач відпрацьованих газів турбіни; 6 – вакуумний насос

Для ілюстрації ефективності розглянутого вище удосконаленого термодинамічного циклу газотурбінного двигуна побудованого за простим і відкритим циклом проведені розрахунки за умови: фіксованої температури газів перед газовою турбіною t_3 (температура обмежується жароміцністю матеріалу соплових та робочих лопаток газової турбіни) та прийнятого ступеня підвищення тиску π_K . Отже, в розрахунках прийнято $t_3 = 850^\circ\text{C}$ і $\pi_K = 7$.

Розрахунки виконані, як для типового циклу (при розширенні газів в турбіні до атмосферного тиску – перший рядок нижченаведеної таблиці), так і для удосконалених термодинамічних циклів газотурбінного двигуна в інтервалі зміни значень тиску в ресивері-охолоджувачі з 0,09 МПа до 0,01 МПа (див. табл. 1). Температура газів в точці 6 визначалась за умови, що значення ентропії в точці 6 дорівнює її значенню в точках 1 і 2 (див. рис. 1).

Таблиця 1. Основні показники ефективності (питома робота, термічний коефіцієнт корисної дії) типового та удосконаленого термодинамічного циклу газотурбінного двигуна

Тиск газів в точці 5, МПа	Температура газів в точках 5 і 6		Робота і її підвищення в удосконаленій схемі газотурбінного двигуна		Термічний коефіцієнт корисної дії і його підвищення	
	$t_5, ^\circ\text{C}$	$t_6, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{ГТУ}},$ кДж/кг	$\delta l_{\text{ГТУ}},$ %	$\eta, \%$	$\delta\eta, \%$
0,1013	–	30,0	252,1	–	42,65	–
0,09	349,4	20,2	266,0	4,286	44,55	4,478
0,08	328,85	10,54	277,6	8,071	46,4	8,779
0,07	306,3	0	289,1	11,88	48,40	13,48
0,06	281,4	-11,9	302,0	15,75	50,6	18,70
0,05	253,2	-25,1	317,3	19,73	53,0	24,57
0,04	220,0	-40,4	335,3	23,87	56,2	31,36
0,03	181,8	-58,8	355,2	28,31	59,5	39,50
0,02	132,0	-82,0	381,7	33,28	63,9	49,89
0,01	59,26	-117,5	420,36	39,43	70,4	65,08

Проведений аналіз отриманих показників ефективності (корисна питома робота, термічний коефіцієнт корисної дії) удосконаленого термодинамічного циклу газотурбінного двигуна дозволяє зробити наступні висновки:

– зниження тиску процесу розширення газів в газовій турбіні нижче атмосферного дає позитивний ефект, а саме, призводить до достатнього підвищення корисної питомої роботи і термічного коефіцієнта корисної дії удосконаленої схеми газотурбінного двигуна в порівнянні з типовим термодинамічним циклом газотурбінного двигуна виконаного за простим і відкритим циклом, в якому гази розширюються до атмосферного тиску;

– при значеннях тиску процесу розширення газів в газовій турбіні нижче атмосферного тиску газів в межах від 0,04 МПа і вище для їх охолодження є сенс використовувати утилізаційну абсорбційну холодильну установку, яка в підсумку може дати підвищення значення енергоефективності установки в цілому;

– при значеннях тиску процесу розширення газів в газовій турбіні нижче атмосферного тиску газів в межах менше 0,04 МПа, для під-

вищення енергоефективності циклу установки є потреба розглянути сумісний цикл газотурбінного двигуна та холодильної установки каскадного типу, нижня ступінь якої потребує затрати зовнішньої додаткової роботи, що в свою чергу уповільнить зростання питомої роботи і термічного коефіцієнта корисної дії удосконаленої конструкції газотурбінного двигуна.

Висновок. Напрямами удосконалення існуючих газотурбінних двигунів є: підвищення температури перед газовою турбіною, що в свою чергу обмежено жароміцністю матеріалів елементів камери згоряння та соплових і робочих лопаток турбіни; робота газотурбінного двигуна за складним термодинамічним циклом (регенерація тепла, проміжне охолодження повітря у випадку двокаскадного компресору тощо); робота газотурбінного двигуна за бінарними циклами; запропонований удосконалений термодинамічний цикл газотурбінного двигуна з розширенням відпрацьованих газів нижче атмосферного та одночасним відведенням тепла в циклі утилізаційної абсорбційної холодильної установки. Представлені розрахунки в статті дозволяють зробити висновок, що процес охолодження газів в циклі не дивлячись на деякі конструктивні ускладнення газотурбінного двигуна є економічно доцільним з урахуванням достатнього підвищення основних показників циклу (питомої роботи та термодинамічного коефіцієнта корисної дії).

Перелік використаних джерел

1. Вассерман О.А., Слинько О.Г. Технічна термодинаміка і теплообмін: підручник. Одеса: Фенікс, 2019. 496 с.
2. Марченко А.П. Термодинамічна оцінка резервів підвищення ККД двигунів внутрішнього згоряння // Двигунів внутрішнього згоряння. 2004. Вип. 2. С. 45 – 54
3. Вассерман О.А., Слинько О.Г. Підвищення ефективності та потужності двигунів внутрішнього згоряння. 1. Цикл ДВЗ з випуском відпрацьованих газів в атмосферу // Технічні гази. 2018. Т. 18. № 3. С. 34-37.
4. Черемісін В.І., Ігнатенко О.А. Урахування процесу дроселювання в циклі комбінованого суднового двигуна // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2024. Вип. 49. С. 152-156.
5. Черемісін В.І., Ігнатенко О.А. Дизельна форсунка з керованим уприскуванням палива в циліндр // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2024. Вип. 48. С. 137-142.

10.31653/smf50.2025.160-166

Kozytskyi S.V, Bezditko A.A

National University «Odesa Maritime Academy»

USE OF NANOMATERIALS – A WAY TO INCREASE THE RESOURCE OF MARINE MECHANISMS

Formulation of the problem

Improving the reliability and durability of ship mechanisms is one of the main tasks of modern shipbuilding and fleet operation. A promising direction for solving this problem is the application of nanotechnologies [1] – a field of science and technology aimed at obtaining materials formed by elements with sizes in the range of 1-100 nanometers.

Analysis of current research.

The physical and chemical properties of nanoscale particles significantly differ from their corresponding macroscopic particles [2], which is related to size effects. It should be noted that the fraction of surface atoms in a spherical particle with a size of 10 nm is 30% [3], which determines its increased chemical activity. 1 g of a substance formed by such particles has a surface area of ~100 m². Excess surface energy leads to significant non-equilibrium of nanoparticles [4]. Therefore, nanoparticles provide materials made from them with an increase in hardness by 2-7 times, strength by 1.5-8 times, and fluidity by 2-3 times compared to traditional materials [5,6].

Setting the task.

This work examines the prospects of using nanomaterials from the companies "XADO" and "NanoVit" to effectively increase the lifespan of ship mechanisms by introducing them into lubricating materials.

Research material

Nano additives to Lubricants

The homogeneity and stability of the lubricating substance into which nanoparticles have been introduced determine its ability to work reliably. The settling velocity is an important parameter determining colloidal stability and can be calculated using Stokes' law:

$$v = \frac{2(\rho_n - \rho_p)gr^2}{9\mu}$$

where v - steady settling velocity, ρ_H - density of the nanoparticle, ρ_p - density of the liquid, g - acceleration due to gravity, r - radius of the nanoparticle, and μ - dynamic viscosity of the liquid.

Previously, micron-sized particles were used as additives to lubricants, for which achieving homogeneity was a difficult task. When using nanoparticles, the settling velocity decreases by 100-1000 times, which significantly improves the stability of nanoparticle dispersion.

"XADO" Nanomaterial

"XADO" is a Ukrainian company [7] founded in 1991 in Kharkiv, which is a manufacturer of revitalizant – a high-molecular lubricating material containing a very active carboxyl group (COOH), as well as a mixture of nanoscale oxides Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 and their hydrates/ The nanoparticles of this substance have a shape close to spherical. Introducing [8] revitalizant into lubricating materials leads to the formation of a protective coating on the metal parts of mechanisms that rub against each other, directly during their operation

The process of forming a protective coating, called revitalization, is based on the physico-chemical interaction of friction surfaces in the presence of revitalizant under boundary or mixed lubrication regimes. The mechanism of protectiv



Figure 1. Stages of revitalization in the "metal-metal" friction zone and formation of a protective film [7]

As a result of the process, a metal-ceramic gradient coating is formed. A feature of the process is the strengthening of the coating with its simultaneous "growth," which has high contact strength and plasticity, good thermal conductivity, and at low speeds increases the actual contact area, reduces the coefficient of friction and wear, and also protects surfaces from scuffing and welding. Revitalizant exhibits unique properties when used as additives to lubricating materials applied for lubricating cylinder surfaces.

Fig. 2 shows data on the restoration of the cylinder surface of an internal combustion engine where scratches up to 0.1 mm deep were ob-

served, which disappear when revitalizant is introduced into the lubricating material

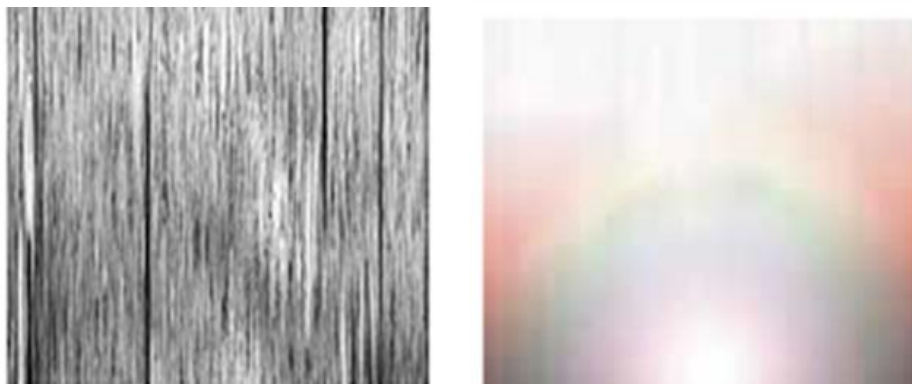
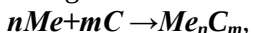


Figure 2. Left – scratches up to 0.1 mm deep on the engine cylinder surface, right – surface restoration by forming a smooth metal-ceramic coating [9]

The phenomenon of revitalization makes it possible to reverse the wear process and restore the worn surface by forming a metal-ceramic coating. Revitalization begins in the zone of greatest wear, as it is here that there is enough excess energy to start a new process, and metal atoms have the largest number of uncompensated bonds, which capture and hold the building material - revitalizant - precisely in the places of wear. Thus, a new coating is formed on the old base. The substances included in the revitalizant, under the influence of pressure and temperature arising in the parts during friction, act as a catalyst for the formation of metal carbides [8] according to the scheme:



where **Me** - metal; C - carbon.

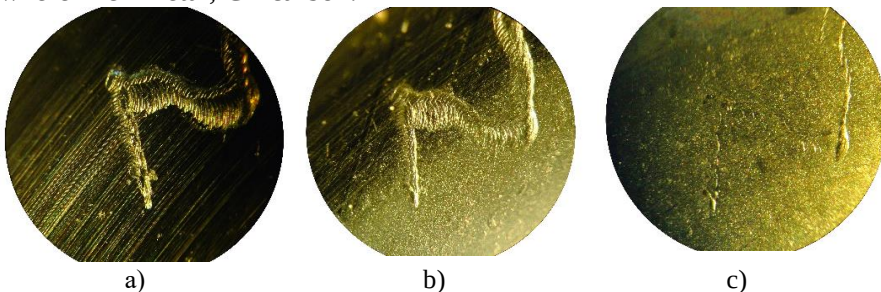


Figure 3. The process of metal-ceramic coating formation [8]

A demonstration of coating formation is shown in Fig. 3: a) surface of the part magnified, b) effect of revitalizant after 15 min. - small scratches disappear and surface restoration begins, c) eliminated surface defect after one hour of revitalization due to the formation of a metal-ceramic coating [7,8].

The "XADO" company reports that the use of revitalizant yields the following results:

- Complete elimination of scratches and micro-seizures on the working surface of cylinders up to 0.03 mm deep;
- Increase in lifespan by 1.5 ~ 2.5 times;
- Equalization and increase of compression and maximum combustion pressure across cylinders;
- Fuel savings up to 8%.

Nanomaterial "NanoVit Motor Renovator" (NVMR)

The product is a mixture of nanodispersed powders: SiO_2 - 80%, Al_2O_3 - 10%, and thermally exfoliated intercalated graphite - 10%. The average particle size of the nanopowder composition is 14 nanometers [10]. When NVMR is used as an additive, the nanoscale materials interact with the friction surfaces and form protective films [10] according to the following mechanism: In the friction zone, where high stresses occur, the aluminum-oxygen bonds in aluminum trioxide break, causing the substitution of iron atoms by aluminum atoms on the surface. The resulting plating film is a solid solution with significant plasticity and strength due to the formation of aluminum and iron oxides and carbides, which increase its wear resistance, while graphite particles on the friction surfaces participate in the formation of a wear-resistant layer.

The antifriction properties of NVMR have been repeatedly tested under various lubrication conditions, different load magnitudes, and product concentrations in oil [11]. Unambiguous conclusions were drawn about the reduction of friction coefficients under certain conditions to values of 0.01-0.001, with lower coefficient values recorded as the load increased. Engine disassembly showed that as a result of using NVMR, stable gel-like films form on the walls of parts in friction zones, which retain the lubricating material. Silicon dioxide (SiO_2) and graphite create a two-dimensional sliding layer, which sharply reduces any additional damage to the frictional parts of the engine. Oil does not drain from its surfaces, which additionally protects friction pairs during cold engine starts from increased wear and restores the cylinder mirror [10].

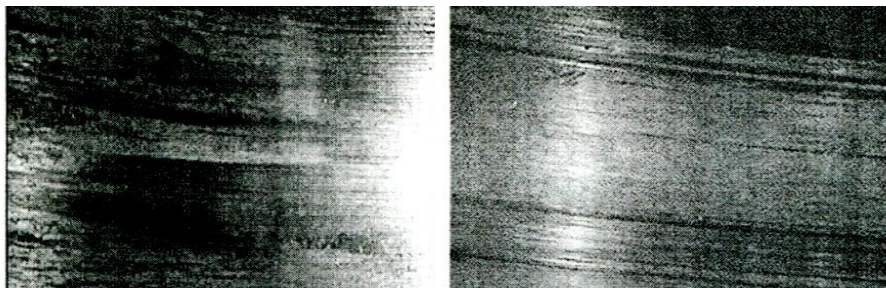


Figure. 4. Result of using the NVMR product – cleaning of the cylinder surface and restoration of its "mirror" [10]

Tests on a real engine under high loads showed that NVMR treatment leads to a 3-fold reduction in the wear rate of piston rings, and a 5-fold or more reduction in the wear rate of crankshaft bearing shells. Fig. 5 shows photographs of the piston surface after 80,000 km on base oil (left photo) and when using the NANOvit additive (right photo).



Figure. 5. Cleaning and restoration of the piston surface when using the "NanoVit" nanoadditive [10]

It was established that after 50,000 hours of operation of a ship diesel generator, adding the product to the engine oil during the subsequent 12,000 hours of operation led to an increase of up to 30% in compression pressure in the cylinders, reduction of the friction coefficient to the optimal value after 6,000 hours of operation, a 4-fold increase in the interval between scheduled oil changes (3,000 hours), fuel savings of up to 12%, and cleaning of friction surfaces from combustion product deposits.

Conclusions

Research confirms that the application of nanomaterials in ship mechanisms is a promising direction for enhancing their operational characteristics. Nanomaterials, such as revitalizants from "XADO" and nanoadditives "NanoVit," significantly improve the strength, wear resistance, and thermal conductivity of friction surfaces due to their unique physico-chemical properties. A key advantage of these materials is their ability to form protective metal-ceramic films that reduce the coefficient of friction, prevent wear, and restore damaged surfaces. Experimental data indicate an increase in the lifespan of mechanisms by 1.5–2.5 times, fuel savings up to 12%, and reduced maintenance costs. Thus, the use of nanotechnologies in shipbuilding opens up new possibilities for increasing the efficiency and durability of ship engines and mechanisms, which is an important step in the development of the modern maritime industry

Reference

1. Poole Charls. Introduction to nanotechnology/ Ch. Poole, F. Outsen London: John Wiley & Sons, 2003. 336 p.
2. Kozyskyi S. V., Kiriian S. V. Properties and behavior of nanoparticles // Фізика аеродисперсних систем. 2022. №44. С. 17–30.
3. Козицький С. В., Кіріян С. В. Особливості дії наночастинок // Матеріали наук.-техн. конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». Одеса, 2019. С. 49–52
4. Kozyskyi S. V., Kiriian S. V. Effectiveness of nanomaterial utilization in ship's mechanisms // Суднові енергетичні установки. 2019. №39. С. 101–106
5. Азаренков М. О., Неклюдов І. М. та інші. Наноматеріали і нанотехнології. ХНУ ім. В. Н. Каразіна. 2014. 316 с.
6. Valiulis A. A history of materials and technologies development / A.Valiulis. Technika, 2014. 444 p.
7. XADO Industrial: Revitalizants, oils, greases.[https://xadoindustrial.com/image/data/download/XADO Industry](https://xadoindustrial.com/image/data/download/XADO%20Industry)
8. Стадниченко В. Н., Стадниченко Н. Г., Джус Р. Н., Трошин О.Н. Про утворення та функціонування металокерамічного покриття, отриманого за допомогою ревіталізаторів // Вістн. науки і техн.: ХДНТ і НТУ «ХПІ». 2004. Вип. 1(16). С. 18–27

10. Трошин О. Н. Наукова парадигма досягнення аномально низького тертя в трибології // Вісник ХНТУСГ. Вип. 184, 2017. С. 102-110

11. Nano Vit Research GmbH [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nanovit-research.de/ueber-nanovit>.

12. Nanovit: General presentation. –Режим доступу до ресурсу: <http://efficiencytechnologies.co.uk/downloads> // Tribo Presentation.pdf

13. NanoVit Research GmbH <https://www/nanovit.de/> Neue Möglichkeit durch Einsatz von NanoVit®–Download

10.31653/smf50.2025.167-176

Korkh M. V., Zhuravlov Yu.I.

National University «Odessa Maritime Academy»

INNOVATION IN THE DEVELOPMENT OF SHIP SYSTEM DRAWINGS AND SCHEMATICS

Introduction. Shipbuilding is one of the key industries of modern mechanical engineering, responsible for the production of vessels of various purposes: cargo, passenger, military, and so on. One of the most important stages of this process is the development of drawings and diagrams of ship systems, which include power plants, pipelines, ventilation, hydraulic, and other engineering systems.

The development of innovations in the creation of drawings and diagrams of ship systems has become a decisive factor in maintaining the competitiveness of shipbuilding enterprises. The gradual implementation of advanced technologies, investment in personnel qualification improvement, and optimization of production processes allow the industry to remain at the forefront of high technologies worldwide [1].

Drawings and diagrams perform the following functions:

- Clear visualization of design solutions.
- Integration of all systems on the vessel.
- Simplification of installation, operation, and maintenance processes.

Aim of the study. To reveal the main principles of creating ship system drawings, review modern tools and technologies, and assess their impact on the efficiency of the shipbuilding process.

The rapid development of design technologies has led to the emergence of new international standards in the shipbuilding industry [2]. It is important to study how these innovations meet international requirements, which contribute to navigation safety and ensure competitiveness in the global market. The development of drawings and diagrams of ship systems is a strictly regulated field, as design errors can lead to serious consequences for the safety of the vessel, crew, and passengers.

The main standards and regulations of the shipping industry [3]:

International Standard:

International Maritime Organization (IMO) — the main regulator responsible for developing norms to ensure the safety of navigation and environmental protection. Key documents for the design of ship systems:

- *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)*: requirements for fire-fighting systems, ventilation, emergency lighting, and more.
- *International Convention MARPOL*: regulates environmental standards, particularly for systems that handle oil waste and wastewater.

ISO (International Organization for Standardization) offers standards that ensure the unification of drawings and diagrams:

- *ISO 128*: standards for conventional symbols in drawings (e.g., symbols for pumps, valves, tanks).
- *ISO 10628*: requirements for the creation of process flow diagrams, including ship systems.
- *ISO 9001*: quality management system for drawing creation processes.

National Standard. Each country may have its own regulatory acts influencing the creation of drawings. For example:

- *GOST (CIS countries)*: standards for conventional symbols and drawing formats.
- *DIN (Germany)*: standards for manufacturing and designing ship system elements.
- *ASME (USA)*: requirements for pipelines, fittings, and tanks.

Regulation of Design Organizations. In addition to international and national standards, shipbuilding companies often develop their own regulations, taking into account:

- Specifics of the production process.
- Features of vessel operation in different conditions.
- Recommendations from equipment suppliers.

All these regulations ensure the unity of approaches to drawing development, which guarantees:

1. Compatibility of equipment: drawings from different suppliers easily integrate into a unified system.
2. Clarity of drawings: standardized symbols simplify work for technical staff.
3. Minimization of errors: standardization reduces the risk of design flaws.

This approach to standardization ensures high-quality drawings and contributes to the creation of safe and reliable vessels [4].

Analysis of Recent Research and Publications. Recently, increasing attention has been given to innovations in the creation of automated ship control systems, which include the automation of management and monitoring processes, as well as integration with cargo and safety management systems. These changes require new approaches to the design of drawings and diagrams.

Innovative technologies enable more efficient use of new materials for creating ship systems, which can significantly reduce weight, increase strength, and lower maintenance costs. Modern engineering solutions in the design of ship systems take into account new materials and constructions, improving both the economic and operational characteristics of vessels [14].

The use of innovative technologies in the development of drawings and diagrams significantly enhances the accuracy and detail of ship projects. Digital tools allow for easy verification of geometric characteristics, load calculations, and structural optimization, which is crucial for improving the safety and reliability of ship systems [5].

Innovations such as the use of computer-aided design (CAD) systems, 3D modelling, virtual reality, and technologies such as artificial intelligence and machine learning are actively changing the process of creating ship system drawings and diagrams. These technologies allow for a more accurate representation of complex ship structures, reducing the number of design errors and increasing the efficiency of development [6].

Main Body. The development of technologies has significantly transformed the process of creating drawings and diagrams for ship systems. Innovative tools and methods have enhanced the accuracy, efficiency, and speed of design, as well as provided opportunities for the integration of different systems and improved project management [7].

The increasing complexity of ship systems and the growing demands for their efficiency are forcing the shipbuilding industry to seek new approaches to design processes. Modern innovations (see Fig. 1), among which digital technologies stand out, are revolutionizing the field of ship system drawing and schematics [8].

Digital Technologies in Design

In modern shipbuilding, CAD (Computer-Aided Design) systems are widely used, enabling the creation of accurate three-dimensional models of ship components and systems. The use of programs such as AutoCAD, SolidWorks, and Siemens NX promotes the precision of drawings and provides the ability to quickly make modifications [9].

The application of software tools for design is the foundation of the modern process of creating drawings and diagrams. The most common programs include 2D and 3D CAD systems:

a) AutoCAD: used for creating detailed 2D drawings and basic 3D models of ship systems.

b) SolidWorks: allows the design of parts and components of ship systems in 3D (Fig. 2).



Fig. 1. Illustration demonstrating examples of modern innovations in the creation of ship system drawings and diagrams

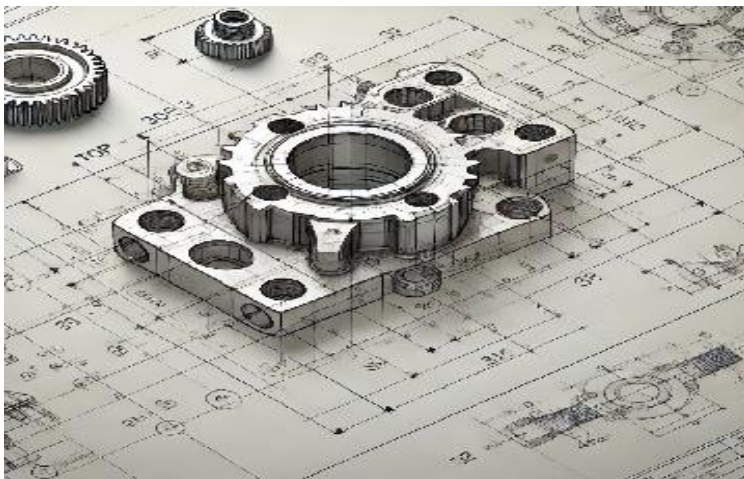


Fig. 2. Example of a modern technical drawing created using SolidWorks

Specialized Programs for Shipbuilding:

a) AVEVA Marine: enables the development of integrated ship models, including ventilation, piping, and fuel systems.

b) Ship Constructor: allows the creation of drawings for pipelines, electrical systems, and the ship's hull structures.

Software for Hydraulic and Pneumatic Schemes:

EPLAN Fluid: develops diagrams for hydraulic and pneumatic systems with integration of standard symbols according to international standards.

Software for Analysis and Simulation:

a) ANSYS Fluent: models fluid and gas flows in ventilation, cooling, or fuel supply systems.

b) CFD modelling (Computational Fluid Dynamics): used for analyzing the efficiency of systems.

BIM Technologies

More complex systems are oriented towards BIM (Building Information Modelling), which are successfully applied in the design of ship systems. BIM technologies allow for the creation of integrated schematics, reduce potential errors, and facilitate coordination among various specialists.

Integration of BIM Technologies (Building Information Modeling)

- *Lifecycle Modelling of Systems:* BIM enables the creation of digital models of ships that include all systems, from design to operation.
- *System Interaction:* All drawings are integrated into a single model, simplifying coordination between different engineering teams.
- *Automation of Updates:* Any changes in the model are automatically updated in the drawings and schematics.

Use of Drones and Scanning

The use of drones for surveying ship systems and laser scanning for collecting accurate data on existing components has gained significant popularity. This ensures high precision when creating drawings and schematics.

Automation and Artificial Intelligence

- *Drawing Generation:* Modern systems automatically generate drawings based on input parameters of the ship (length, tonnage, system type).
- *Error Checking:* AI-based tools analyse drawings to detect errors (e.g., incorrect pipe connections, excessive pressure in the system, etc.).
- *Optimization of Component Placement:* AI helps find optimal configurations for placing pumps, valves, and pipelines while minimizing material and energy costs [10].

Cloud Technologies and Collaborative Work

- *Cloud Data Storage*: Platforms like Autodesk Cloud and Bentley Systems enable the storage of drawings and provide access to them from anywhere.
- *Real-Time Collaboration*: Teams can work on the same model or drawing simultaneously, synchronizing changes in real time.
- *Data Protection and Archiving*: Cloud technologies ensure project backup and data security.

Use of VR/AR Technologies

- *Virtual Reality (VR)*: Allows users to "walk through" the ship in a virtual environment, verifying the correct placement of systems and detecting potential issues at the design stage.
- *Augmented Reality (AR)*: Engineers can view drawings and schematics directly on-site using tablets or smart glasses (see Fig. 3).

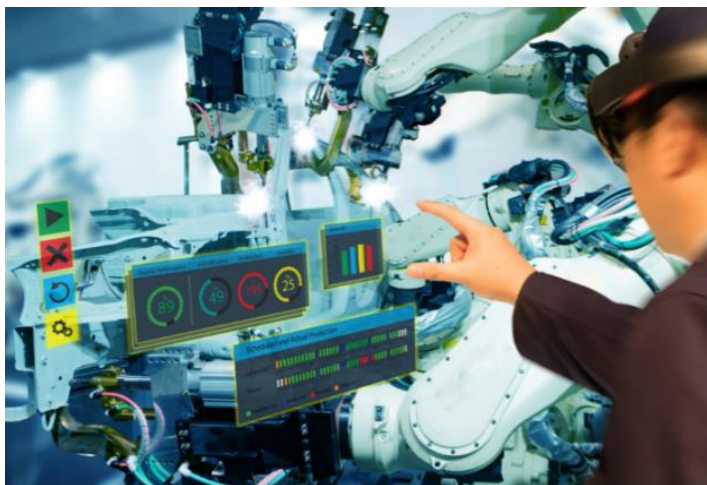


Fig. 3. Application of Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) Technologies in Shipbuilding

Use of Digital Twins

A digital twin is an interactive model of a ship that reflects all its systems in real time.

System condition monitoring: Engineers can track the operation of ship systems (such as fuel consumption or ventilation) and make timely adjustments.

Operational forecasting: Data from sensors is analyzed to predict potential failures.

Energy-Efficient Design

Design Flow optimization systems: Simulation software is used to minimize air or fluid losses within the systems. Selection of eco-friendly materials: Innovative programs assist in selecting materials with minimal environmental impact.

Examples of Innovations in the Development of Ship System Drawings and Schemes

To better understand the innovations, let's compare traditional approaches to developing ship system drawings and schemes with modern technologies. This comparison highlights the use of specialized software, cloud platforms, VR/AR technologies, and digital twins [11].

1. Design Software: A Comparison

Traditional Approach: Previously, ship system drawings were created manually or with basic 2D drawing software (e.g., AutoCAD for simple plans). This process was time-consuming and often lacked the precision needed for complex integrated systems.

Modern Software: Today, specialized programs like Ship Constructor, AVEVA Marine, and AutoCAD 3D enable the creation of integrated 3D models of ship systems. This significantly improves design accuracy and reduces the time required for drawing creation and modification [12]. The software also allows:

- Automatic generation of drawings based on given parameters.
- Early detection and correction of design errors.
- Simulation of system behavior in real-world conditions, considering physical constraints.

Example. Using AVEVA Marine for the design of ship piping and ventilation systems allows designers to quickly integrate various systems (electrical, mechanical, pneumatic) into a single model and verify their interactions during the design stage. This greatly reduces the number of errors during the installation phase.

Piping System on a Tanker

AutoCAD 3D allows for the creation of detailed models of piping systems, taking into account the ship's dimensions, equipment placement, valves, and connections.

- Features: 3D visualization shows the exact routing of pipes from pumps to tanks.
- Efficient clash detection identifies problems before installation.
- Easy modification: Engineers can adapt the project according to requirements.

2. Cloud Technologies and Collaborative Work

Traditional approach: Before the introduction of cloud technologies, designers stored drawings on local servers or physical media. This limited collaboration opportunities, especially when teams were spread across different geographical locations. Storage and access systems were less efficient, increasing the risk of data loss or mistakes due to unsynchronized project versions.

Modern cloud technologies: Today, cloud platforms like Autodesk BIM 360 and Bentley Systems allow real-time data storage, enabling all team members to work simultaneously on the project. Thanks to cloud services, the latest updates are immediately available, reducing the likelihood of errors and accelerating problem-solving.

Example. The Bentley ProjectWise cloud platform ensures effective project management for large shipbuilding companies. All ship system drawings—from structures to electrical and mechanical diagrams—are stored in a single database, allowing teams at different stages of design and production to quickly access the necessary information.

3. Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR): Technologies in Ship Systems Design

Traditional approach: using traditional drawings and diagrams for ship system visualization was often limited and did not provide a full representation of the future vessel or its individual parts. This complicated communication between team members and clients, and made it harder to identify possible design flaws before production began.

Modern VR/AR technologies: Virtual and augmented reality systems enable the visualization of the ship or its individual systems in three-dimensional space, allowing engineers to "walk through" the future vessel and inspect all elements at real scale. Augmented reality also allows overlaying drawings onto the real environment, facilitating installation and providing visualization of complex elements directly on the construction site [13].

Example. Using HTC Vive in ship design allows engineers to "enter" the ship model, inspect the placement of ventilation systems, piping, and other equipment, and detect clashes or design flaws before the production of components begins.

4. Digital Twins: Advantages for Ship System Design

Without digital twins, the design of ship systems was limited to physical models and static drawings.

Traditional approach: Compliance checks and system testing mainly occurred after the vessel or its parts had already been built.

Digital twins are accurate replicas of real ship systems, created based on collected data and models. They allow real-time monitoring of the ship's condition, forecasting system behavior under different conditions, and testing new solutions without the need for physical prototyping. This is especially useful for ship systems where energy optimization and safety assurance are critical.

Example. ABB Marine Advisory uses digital twins to monitor ship system operations and ensure energy efficiency. This enables optimization of fuel usage, ensures the necessary air exchange, and tracks the wear of key components, helping to reduce vessel maintenance costs.

Container Ship Modernization

During the modernization of an old container ship, AVEVA Marine was used to create a digital twin of the vessel. This allowed for the effective upgrade of piping and ventilation systems, taking into account new environmental standards.

Results:

- A 15% reduction in operating costs through system optimization.
- Rapid adaptation to IMO 2020 standards with minimal expenses.
- Use of drones for 3D scanning of existing structures and integration of this data into AVEVA Marine.

Conclusions and Prospects for the Implementation of Innovations:

1. Modern innovations in the creation of ship system drawings and diagrams are significantly transforming approaches to ship design and construction. Transitioning from traditional methods, which involved manual drafting and static models, to the adoption of BIM technologies, cloud platforms, VR/AR, and digital twins, has greatly improved accuracy, efficiency, and safety.

2. The use of software that supports the integration of various engineering disciplines, along with the application of virtual and augmented reality, not only enables the creation of precise models but also allows testing under real-world conditions. Digital twins, as exact replicas of real systems, provide opportunities to monitor the ship's condition in real time and optimize its operation.

3. Thanks to cloud technologies, designers can work on projects from anywhere in the world, ensuring efficient collaboration and reducing the risk of errors. Innovations in shipbuilding lead not only to improved

design quality but also to lower maintenance costs and increased energy efficiency.

4. In the future, even greater integration of these technologies can be expected, optimizing all stages of a vessel's lifecycle — from design to operation. This will enable shipbuilding companies to create safer, more environmentally friendly, and more efficient ships.

Перелік використаних джерел

1. Ковальчук В. М., Мельник С. В. Інноваційні підходи до проектування суднових систем із застосуванням новітніх технологій // Журнал суднобудування та морських технологій, 38(1). 2021. С.15-25.

2. Коваль В. С., Сидоренко І. В. Суднобудування: інноваційні підходи та сучасні технології проектування // Київ: Наукова думка. 2019.

3. Міністерство транспорту України Національні стандарти з проектування суднових систем та обладнання. Київ: МТУ України. 2021.

4. Український класифікаційний товариство «Класифікація та стандарти для проектування суднових систем в Україні». 2020.

5. Dufresne A. Recent Trends in Naval Architecture and Shipbuilding // Journal of Shipbuilding Technology, 48(2). 2023. P. 122-135.

6. Zhang X., Liu Y. Advancements in 3D Modeling for Ship Design // International Conference on Marine Engineering and Technology, 10(4). 2021. P. 112-118.

7. Корх М.В. Конструктивні та робочі креслення корпусних конструкцій // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». Одеса: НУ «ОМА». 2024. С. 39-42.

8. Петров А. О. Використання цифрових технологій у проектуванні суднових систем // Матеріали міжнародної конференції «Інновації в морському суднобудуванні», Одеса. 2021. С. 101-104.

9. Karmakar R., Bhattacharya A. Digital Tools and Innovation in Ship Design: A New Approach to Safety and Efficiency // Maritime Technology and Engineering Journal. 2022. 18(3). P. 211-227.

10. Smith R. Integration of AI and Machine Learning in Naval Design // Journal of Naval Architecture, 60(1). 2022. P. 45-59.

11. Савченко Р. О., Морозова Т. І. Розвиток новітніх інженерних підходів до створення креслень суднових систем // Тези міжнародної науково-практичної конференції, Київ. 2020. С. 200-205.

12. Lee J. Recent Developments in Eco-friendly Shipbuilding Systems // Environmental Aspects of Ship Design, 24(2). 2023. P. 98-112.
13. World Maritime University Innovations in Ship Design and Technology: Global Trends and Challenges. WMU Press. 2022.
14. Velikanova N.P., Zakiev F.K. Comparative analysis of the strength reliability of turbine blades for aircraft gas turbine engines of large size. Bulletin of engine building No. 3. M.: Zaporozhye, 2006. P. 80-83.

РЕФЕРАТИ

Богач В.М., Довиденко Ю.М. Обертюр К.Л. Закономірності руху плівки мастила по дзеркалу циліндра

Публікація присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності роботи судових ДВЗ шляхом вивчення рух рідкої плівки потоку мастила і газу при мащенні циліндрів судового дизелю.

Показана перспектива практичного застосування двофазного газорідного руху плівки, особливо в тому ж напрямку, коли проявляється стабілізуючий ефект.

Кількісний опис такого руху вважається вичерпним, якщо визначені компоненти вектора швидкості, тиск мастила і товщина плівки. Ці характеристики отримують шляхом вирішення основних рівнянь механіки суцільних середовищ, включаючи рівняння передачі імпульсу, неперервності та макроскопічного балансу.

Встановлено, що витрата мастила в плівці, що стікає по дзеркалу циліндра під дією сили тяжіння визначається співвідношенням його ваги, в'язкості й сил, що діють на поверхні розділу газ-рідина.

Аналітичні залежності вказують на той факт, що вимушений рух газу істотно впливає на рух плівки, при цьому однаковий напрямок руху газу й мастила (період руху поршня до н.м.т.) робить на двофазний рух стабілізційний вплив.

У випадку ж зустрічного руху газу і мастила (рух поршня в напрямку в.м.т.) різке зростання перепаду тиску призводить в результаті до явища «захлинання», при якому відносно тонкий шар мастила захоплюється газом, що рухається йому назустріч.

Ключові слова: судовий дизель, система мащення, змащувальний канал, процес мащення, циліндр, поршень, поршневе кільце.

Bohach V.M., Dovydenko Yu.M., Obertur K.L. Regularities of the Motion of an Oil Film on the Cylinder Mirror

The publication is devoted to solving the current problem of increasing the efficiency of marine diesel engines by studying cylinder lubrication processes.

The simultaneous movement of the liquid film of the flow of lubricant and gas in the case when the latter is turbulent is considered. The prospect of practical application of the twophase gasliquid movement of the film is shown, especially in the same direction when the stabilizing effect is manifested.

A quantitative description of such movement is considered comprehensive if the components of the velocity vector, oil pressure, and film thickness are determined. These characteristics are obtained by solving the basic equations of solid mechanics, including the equations of momentum transfer, continuity, and macroscopic balance.

It was established that the consumption of lubricant in the film flowing down the mirror of the cylinder under the influence of gravity is determined by the ratio of its weight, viscosity and forces acting on the gas-liquid interface.

Analytical dependences indicate the fact that the forced movement of gas significantly affects the movement of the film, while the same direction of movement of gas and lubricant (piston movement period to n.m.t.) has a stabilizing effect on the twophase movement.

In the case of counter movement of gas and lubricant (movement of the piston in the direction of the v.m.t.), a sharp increase in the pressure difference results in the phenomenon of "choking", in which a relatively thin layer of lubricant is captured by the gas moving towards it .

Keywords: marine diesel, lubrication system, lubrication channel, lubrication process, cylinder, piston, piston ring.

Веретеннік О. М., Сандлер А. К. Засіб підвищення енергоефективності суднових систем утилізації вторинного тепла

Одним зі шляхів вирішення проблеми енергоефективності 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 теплова труба з акумулюванням теплоти, що складається з робочого корпусу з полірованою внутрішньою поверхнею, системи капілярних каналів, виконаної у вигляді перфорованої отворами пластини, розташованої у перетині поперек довжини корпусу з кінцями, які щільно прилягають до стінок корпусу та мають кут між стінкою корпусу й пластини до 1° , та яка має ширину більше довжини діаметра отвору корпусу, загальної заглушки та клапана.

Основна відмінність запропонованої конструкції полягає у тому, що навколо робочого корпусу, коаксіально до нього, розташований вторинний корпус, а у зазорі між робочим та вторинним корпусом містяться мідна сітка та термоакуюлюючий матеріал на основі фазового переходу, у якості робочої рідини у робочому корпусі застосовано рідина з низькою темпера-

турою кипіння флуорінол-85, робочий та вторинний корпуси обладнані мідними заглушками, а зазор між корпусами обладнано клапаном для поповнення термоакумуючого матеріалу.

Ключові слова: енергоефективність, утилізація тепла, теплова труба, флуорінол

Veretennik O., Sandler A. A means of increasing energy efficiency of ship systems of secondary heat utilization

One of the ways to solve the problem of energy efficiency is to develop technologies for deep heat utilization of secondary objects of ship power plants. The introduction of such technologies allows to significantly (by 10 ... 15%) increase the efficiency of using the thermal potential of fuel and ensure its economy, as well as to improve the ecological situation in the world ocean by reducing emissions of harmful substances into the environment. The development and implementation of heat utilization technologies are combined with the need to solve a number of rather complex scientific and technical problems. Utilization technologies, as a rule, are introduced in the process of modernization or reconstruction of existing ship power plants. In this case, the choice of the utilization scheme significantly depends on the stability of the vessel's annual need for a certain type of low-potential coolant obtained in the utilization process. In this case, the dominant efficiency criterion is the fuel utilization coefficient, on the basis of which the heat utilization scheme is selected. The problem is solved by the fact that a heat pipe with heat accumulation, consisting of a working body with a polished inner surface, a system of capillary channels, made in the form of a plate perforated with holes, located in a cross section across the length of the body with ends that fit tightly to the body walls and have an angle between the body wall and the plate up to 1° , and which has a width greater than the length of the diameter of the body hole, a common plug and a valve. The main difference of the proposed design is that around the working body, coaxially to it, a secondary body is located, and in the gap between the working and secondary bodies there is a copper mesh and a thermal storage material based on a phase transition, as a working fluid in the working body a liquid with a low boiling point of fluorinol-85 is used, the working and secondary bodies are equipped with copper plugs, and the gap between the bodies is equipped with a valve for replenishing the thermal storage material.

Keywords: energy efficiency, heat utilization, heat pipe, fluorinol

Голіков В.А., Данилов К.С., Шумілова К.В. Еколого-енергетична ефективність експлуатації контейнеровозів на міжконтинентальних перевезеннях

Метою дослідження є підвищення інформаційного забезпечення процесу управління судном на маршруті під дією зовнішніх збурень та шляхових

обмежень, шляхом включення до складу системи управління навігаційних пристроїв для оперативного розрахунку параметрів руху судна.

В статті розглянуто принципи роботи системи повітряного змащення Silverstream, її безпечна експлуатація та вимоги з обслуговування. Для підвищення інформаційного забезпечення процесу управління судном на маршруті використано методику графо-аналітичного розрахунку початкових параметрів руху судна на основі застосування векторного аналізу з візуалізацією на картографічній основі; способи динамічного вибору оптимальної швидкості ходу судна та стабілізації руху судна із застосуванням системного (комплексного) підходу до врахування впливу факторів навколишнього середовища на процес судноводіння. Дослідження охоплює вивчення та аналіз елементів руху на різних етапах плавання, включаючи планування маршруту, обсервацію та зміну швидкості. Шляхом розробки алгоритмів стабілізації та вибору оптимальної швидкості з урахуванням різних факторів, таких як збурення та шляхові обмеження, забезпечується ефективне та безпечне керування судном. Згідно з розглянутою технологією системи Silverstream® створюваний нею килимок з мікро-бульбашок значно зменшує опір тертя днищової частини корпусу судна. Тому, внаслідок зниження загального опору корпусу зменшується потужність валу енергетичної установки, яка необхідна для підтримання заданої швидкості судна. В дослідженні удосконалено адаптивний алгоритм корекції траєкторії судна для повернення на задану лінію шляху, з врахуванням поточних даних про модуль та дію збурюючих чинників.

Ключові слова: оптимізація руху судна на маршруті; безпечне керування судном; система повітряного змащення; адаптивний алгоритм корекції траєкторії руху судна; оптимальна швидкість ходу судна; метод поверхневого змащення корпусу; зниження потужності головного двигуна судна.

Golikov V.A., Danilov K.S., Shumilova K.V. Environmental and energy efficiency of container ships' operation on intercontinental transportations

The article discusses the principles of operation of the Silverstream air lubrication system, its safe operation and maintenance requirements. To improve the information support of the ship control process on the route, the method of graphical and analytical calculation of the initial parameters of ship movement based on the use of vector analysis with visualization on a cartographic basis; methods of dynamic selection of the optimal ship speed and stabilization of ship movement using a systematic (integrated) approach to taking into account the influence of environmental factors on the process of navigation are used. The research covers the study and analysis of motion elements at different stages of navigation, including route planning, observation and speed changes. By developing stabilization algorithms and selecting the optimal speed, taking into account various factors such as disturbances and road constraints, efficient and safe ship control is ensured. According to the technology of the Silverstream®

system, the micro-bubble mat created by it significantly reduces the friction resistance of the bottom of the ship's hull. Therefore, due to the reduction of the total hull resistance, the power of the power plant shaft, which is necessary to maintain the set speed of the vessel, is reduced. The research improves the adaptive algorithm for correcting the ship's trajectory to return to a given path line, taking into account the current data on the module and the effect of disturbing factors.

Keywords: optimization of ship movement on the route; safe ship control; air lubrication system; adaptive algorithm for correcting the ship's trajectory; optimal ship speed; method of surface lubrication of the hull; reduction of the main engine power.

Колегасєв М.О., Побережний Р.В. Підвищення екологічних показників роботи дизелів морських суден

Розглянути питання щодо забезпечення екологічних показників роботи дизелів морських суден. Виконано аналіз найбільш розповсюджених напрямків наукових досліджень, що спрямовані на зниження емісії оксидів азоту з випускних газів, а саме: підвищення якості організації робочого процесу; підвищення якості традиційних видів палива, використання присадок, водопаливних емульсій та застосування альтернативних видів палива; застосування систем очищення випускних газів суднових дизелів. Надано аналіз первинних методів зниження емісії оксидів азоту. Визначені критичні температури, за умовою досягнення яких починається ланцюгова реакція утворення оксидів азоту у циліндрі суднового дизеля. Наведені вимоги Міжнародної конвенції МАРПОЛ та вказані рівні Tier I, Tier II, Tier III щодо максимальної можливої концентрації оксидів азоту у випускних газах суднових дизелів. Зазначено, що забезпечення вимог Tier I щодо емісії оксидів азоту можливо шляхом оптимізації робочого процесу та вдосконаленням конструкційних та експлуатаційних характеристик паливної апаратури високого тиску. Досягнення вимог Tier II та Tier III можливо лише шляхом додаткових методів, до одного з яких відноситься використання водопаливних емульсій. Як завдання дослідження поставлено визначення впливу водопаливних емульсій на емісію оксидів азоту суднових дизелів та оцінка доцільності використання цього способу для підвищення екологічних показників роботи суднових дизелів. Наведені результати комплексних дослідження щодо можливостей переведення суднових дизелів на водопаливну емульсію, які виконувались на дизелі 6R32E фірми Wartsila. Зазначено, що використання водопаливної емульсії (зміст води в якій може досягати 30 %) сприяє не лише підвищенню екологічних показників роботи суднових дизелів (що відображається з зниженні емісії оксидів азоту з випускними газами), але також покращує їх економічність (що підтверджується зменшенням питомої витрати палива).

Ключові слова: водопаливна емульсія, екологічність роботи дизеля, економічність роботи дизеля, емісія оксидів азоту, морський транспорт, судновий дизель, суднове паливо.

Kolegaev M.O., Poberezhnyi R.V. Improving the environmental performance of marine diesel engines

To consider the issue of ensuring the environmental performance of marine diesel engines. An analysis of the most common areas of scientific research aimed at reducing nitrogen oxide emissions from exhaust gases has been carried out, namely: improving the quality of the work process organization; improving the quality of traditional fuels, the use of additives, water-fuel emulsions and the use of alternative fuels; the use of exhaust gas purification systems for marine diesel engines. An analysis of primary methods for reducing nitrogen oxide emissions has been provided. Critical temperatures have been determined, upon reaching which a chain reaction of nitrogen oxide formation begins in the cylinder of a marine diesel engine. The requirements of the International MARPOL Convention are given and the Tier I, Tier II, Tier III levels are indicated for the maximum possible concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases of marine diesel engines. It is noted that ensuring Tier I requirements for nitrogen oxide emissions is possible by optimizing the work process and improving the design and operational characteristics of high-pressure fuel equipment. Achieving Tier II and Tier III requirements is possible only through additional methods, one of which is the use of water-fuel emulsions. The task of the study was to determine the impact of water-fuel emulsions on the emission of nitrogen oxides of marine diesel engines and to assess the feasibility of using this method to improve the environmental performance of marine diesel engines. The results of comprehensive studies on the possibilities of converting marine diesel engines to water-fuel emulsion, which were carried out on the 6R32E diesel engine from Wartsila, are presented. It is noted that the use of water-fuel emulsion (the water content of which can reach 30%) contributes not only to increasing the environmental performance of marine diesel engines (which is reflected in the reduction of nitrogen oxide emissions with exhaust gases), but also improves their efficiency (which is confirmed by the reduction in specific fuel consumption).

Keywords: environmental friendliness of diesel engine, diesel engine efficiency, marine diesel, marine fuel, maritime transport, nitrogen oxide emissions, water-fuel emulsion.

Куропятник О.А. Аналіз експлуатаційних режимів роботи дизелів суден морського транспорту під час використання альтернативного палива

Розглянути питання щодо аналіз експлуатаційних режимів роботи дизелів суден морського транспорту під час використання альтернативного па-

лива. Наведені основні причини, що обмежують використання альтернативного палива на судах морського транспорту. Визначено, що існують альтернативні палива, які за своїми функціональними характеристиками збігаються з паливом нафтового походження. Це дозволяє використовувати паливні суміші, до складу яких разом з нафтовим паливом входять альтернативні палива. Також зазначено, що найбільшим збігом експлуатаційних властивостей з нафтовими палива характеризуються палива біологічного походження. Завданням дослідження був аналіз експлуатаційних режимів роботи суднових дизелів під час використання альтернативного палива, яким було паливо біологічного походження – гідроване рослинне мастило. При цьому аналіз цих режимів виконувався за економічними (питомою витратою палива) та екологічними (емісією оксидів азоту та діоксиду вуглецю) показниками роботи дизелів. Дослідження виконувались на трьох однотипних суднових дизелях 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries навантаження на які під час дослідження змінювалось у діапазоні 50...80 % від номінального. Як основне паливо під час експлуатації дизеля що використовувалось суднове моторне паливо RME180, як альтернативне – паливо HVO. З метою визначення впливу паливо HVO на експлуатаційні характеристики дизелів утворювались паливні суміші, до яких входило паливо RME180, а також 10 %, 20 %, 30 % та 40 % палива HVO. Експериментально визначено, що збільшення у складі паливної суміші вмісту палива біологічного походження HVO на всіх експлуатаційних режимах роботи дизелів призводить до зменшення питомої витрати палива на 2,04...8,02 % та зменшенню об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах на 14,83...39,23 %. Одночасно з цим зміна концентрації оксидів азоту у випускних газах має різноспрямований характер при цьому зменшується на 12,23...37,41 % під час використання паливних сумішей до складу яких входить 10...30 % палива біологічного походження HVO та збільшується на 4,82...6,35 % під час використання паливної суміші до складу якої входить 40 % палива біологічного походження HVO. Наведені дані свідчать про наявність оптимальної концентрації палива біологічного походження HVO у складі її суміші з нафтовим паливом.

Ключові слова: альтернативні палива, екологічність роботи дизеля, економічність роботи дизеля, емісія оксидів азоту, морський транспорт, паливо біологічного походження, паливо нафтового походження, питома витрата палива, судновий дизель

Kuropyatnyk O.A. Analysis of the operating modes of diesel engines of marine transport vessels when using alternative fuels

To consider the issue of analyzing the operating modes of diesel engines of marine transport vessels when using alternative fuels. The main reasons limiting the use of alternative fuels on marine transport vessels are given. It is determined that there are alternative fuels that coincide in their functional characteristics with

fuels of oil origin. This allows the use of fuel mixtures that include alternative fuels along with oil fuels. It is also noted that fuels of biological origin are characterized by the greatest coincidence of operational properties with petroleum fuels. The task of the study was to analyze the operating modes of marine diesel engines when using alternative fuel, which was fuel of biological origin – hydrogenated vegetable oil. At the same time, the analysis of these modes was carried out according to economic (specific fuel consumption) and environmental (emission of nitrogen oxides and carbon dioxide) indicators of diesel engine operation. The research was carried out on three identical 6S20R2-T2 marine diesel engines manufactured by Mitsubishi Heavy Industries, the load on which during the research varied in the range of 50–80 % of the nominal. As the main fuel during the operation of the diesel engine, RME180 marine motor fuel was used, as an alternative – HVO fuel. In order to determine the influence of HVO fuel on the operational characteristics of diesel engines, fuel mixtures were formed, which included RME180 fuel, as well as 10 %, 20 %, 30 % and 40% HVO fuel. It was experimentally determined that an increase in the content of biological HVO fuel in the fuel mixture at all operating modes of diesel engines leads to a decrease in specific fuel consumption by 2.04–8.02 % and a decrease in the volumetric content of carbon monoxide in exhaust gases by 14.83–39.23 %. At the same time, the change in the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases has a multidirectional nature, while it decreases by 12.23–37.41 % when using fuel mixtures containing 10–30 % of HVO biological fuel and increases by 4.82–6.35 % when using a fuel mixture containing 40% of HVO biological fuel. The data provided indicate the presence of an optimal concentration of HVO biological fuel in its mixture with oil fuel.

Keywords: alternative fuels, biological fuel, environmental friendliness of diesel engine operation, efficiency of diesel engine operation, marine diesel, maritime transport, nitrogen oxide emissions, petroleum fuel, specific fuel consumption.

Куропятник О.А. Визначення оптимальних умов експлуатації систем каталітичного відновлення випускних газів дизелів суден морського транспорту

Розглянути питання щодо визначення оптимальних умов експлуатації систем каталітичного відновлення випускних газів дизелів суден морського транспорту. Наведені вимоги Додатку VI МАРПОЛ щодо експлуатації судових дизелів у спеціальних екологічних районах. Визначено, що виконання цих вимог можливо виключно за рахунок використання додаткових технологій очищення випускних газів, найбільш ефективною з яких є система селективного каталітичного відновлення випускних газів. Зазначено, що ефективність роботи системи селективного каталітичного відновлення визначається температурою випускних газів, з якою вони потрапляють до спеціального реактору цієї системи, в якому завдяки хімічних перетворень з

реагентом відбувається перетворення оксидів азоту до атомарного азоту. Завданням дослідження було визначення впливу температури випускних газів на ефективність системи селективного каталітичного відновлення. При цьому розв'язання цього завдання здійснювалось під час знаходження судна у акваторіях спеціальних екологічних районів. Наведені результати досліджень, що виконувались на судні вантажомісткістю 106500 м³, призначеному для перевезення скраплених газів. Функції головного двигуна на судні забезпечували два однотипних дизеля 5X72DF фірми Hyundai-WinGD, кожний з яких був обладнаний окремою системою каталітичного відновлення. Було встановлено, що для суднового дизеля 5X72DF фірми Hyundai-WinGD для експлуатаційних режимів, які відповідають 50...80 % від його номінального навантаження, зміна кута випередження випуску у діапазоні 55...70 °пкв сприяє підвищенню температури випускних газів та через це зменшує рівень емісії оксидів азоту. Досягнення мінімально можливих за умовою експлуатації суднового дизеля значень концентрації оксидів азоту у випускних газів особливо актуально під час знаходження суден у зонах спеціального екологічного контролю – морських районах, в яких діють більш суворі вимоги щодо емісії оксидів азоту та в яких з боку наглядових органів виконується постійний моніторинг екологічних показників роботи суден.

Ключові слова: екологічність роботи дизеля, емісія оксидів азоту, морський транспорт, спеціальні екологічні райони, судновий дизель, температура випускних газів.

Kuropatnyk O.A. Determination of optimal operating conditions for catalytic reduction systems for exhaust gases of marine diesel engines

To consider the issue of determining optimal operating conditions for catalytic reduction systems for exhaust gases of marine diesel engines. The requirements of Annex VI of MARPOL for the operation of marine diesel engines in special ecological areas are given. It is determined that the fulfillment of these requirements is possible only through the use of additional exhaust gas purification technologies, the most effective of which is the selective catalytic reduction system. It is noted that the efficiency of the selective catalytic reduction system is determined by the exhaust gas temperature at which they enter the special reactor of this system, in which nitrogen oxides are converted to atomic nitrogen through chemical transformations with the reagent. The task of the study was to determine the influence of exhaust gas temperature on the efficiency of the selective catalytic reduction system. At the same time, this task was solved while the ship was in the waters of special ecological areas. The results of the research carried out on a vessel with a cargo capacity of 106500 m³, intended for the transportation of liquefied gases, are presented. The functions of the main engine on the vessel were provided by two identical diesel engines 5X72DF of the Hyundai-WinGD company, each of which was equipped with a separate catalytic

reduction system. It was found that for the marine diesel engine 5X72DF of the Hyundai-WinGD company for operating modes corresponding to 50–80 % of its nominal load, changing the exhaust advance angle in the range of 55–70°CА contributes to an increase in the exhaust gas temperature and, therefore, reduces the level of nitrogen oxide emissions. Achieving the minimum possible values of nitrogen oxide concentration in exhaust gases under the conditions of operation of a marine diesel engine is especially important when ships are in special environmental control zones – marine areas, where stricter requirements for nitrogen oxide emissions apply and where the supervisory authorities constantly monitor the environmental performance of ships.

Keywords: environmental friendliness of diesel engine operation, exhaust gas temperature, maritime transport, nitrogen oxide emissions, special environmental areas, marine diesel.

Муравйов Г.М., Шумілова К.В., Мальцев А.С. Удосконалена змістовна модель планування координат переходу автономного судна в рейсовому циклі на обширному мілководді

Метою статті є створення вдосконаленої комплексної моделі планування координат траєкторних точок рейсового циклу автономного судна, що рухається через мілководне середовище. Дослідження зосереджено на вирішенні впливу мілководдя на характеристики поворотності та їх врахування при розрахунку траєкторних точок. Указана модель інтегрує різні технічні і технологічні компоненти автономного судна, включаючи вдосконалені датчики параметрів маневрування, стану навігаційних систем та використання алгоритмів машинного навчання штучного інтелекту, які призначені для підтримки прийняття рішень у реальному часі. В удосконалених методах автоматичного планування координат при підготовці рейсового циклу автономного судна враховано наступне: стан судна; ступінь мілководдя за відношенням глибини моря до середньої осадки; параметри очікуваних зовнішніх впливів, включаючи аварійно-небезпечні ділянки та навігаційні ризики і кібератаки. Це значно підвищує безпеку та надійність роботи автономних суден. Тому використання запропонованих методів являється актуальним для сучасних навігаційних систем автономного судна при плаванні на мілководді. Автоматичне планування координат рейсового циклу для автономних суден, при плаванні на обширному мілководді, дозволяє виконувати високоточне планування координат траєкторних точок центру ваги за таблицею шляхових точок з елементами маневрування, що дає можливість підвищити безпеку управління маневруванням на мілководді. Виконане дослідження дозволяє автономним суднам оперативного і високоточно планувати рух на мілководних ділянках переходу.

Ключові слова: автономні судна, обширне мілководдя, рейсовий цикл, автоматизація планування координат руху, спосіб шляхових точок і параме-

трів маневрування, системи управління маневруванням, машинне навчання в реальному часі, навігаційні небезпеки, кібернетичні атаки.

Muravyov G.M., Shumilova K.V., Maltsev A.S. The improved model for planning sea passage coordinates of an autonomous vessel in the voyage cycle in extensive shallow water

The aim of the article is to create an improved integrated model for planning the coordinates of trajectory points of the voyage cycle of an autonomous vessel moving through a shallow water environment. The study focuses on addressing the influence of shallow water on the characteristics of maneuverability and their consideration in the calculation of trajectory points. This model integrates various technical and technological components of an autonomous vessel, including advanced sensors of maneuvering parameters, navigation systems, and the use of artificial intelligence machine learning algorithms designed to support real-time decision-making. Advanced methods of automatic coordinate planning in the preparation of the autonomous vessel's voyage cycle take into account the following: the vessel's condition; the degree of shallow water in terms of the ratio of sea depth to average draft; parameters of expected external influences, including accident-prone areas and navigation risks and cyberattacks. This significantly increases the safety and reliability of autonomous vessels. Therefore, the use of the proposed methods is relevant for modern navigation systems of an autonomous vessel when navigating in shallow water. Automatic planning of the coordinates of the voyage cycle for autonomous vessels, when navigating in vast shallow water, allows for high-precision planning of the coordinates of the trajectory points of the center of gravity according to the table of waypoints with maneuvering elements, which makes it possible to increase the safety of maneuvering control in shallow water. The research allows autonomous vessels to quickly and accurately plan their movement in shallow water crossing areas.

Keywords: autonomous vessels, extensive shallow water, voyage cycle, automation of traffic coordinate planning, waypoints and maneuvering parameters, maneuvering control systems, real-time machine learning, navigational hazards, cyber-attacks.

Половинка Е.М., Мартинов С.В. Швидкісна характеристика гібридної системи впорскування палива судового середньообертового дизеля

Представлений аналіз тенденцій розвитку способів і технічних засобів паливopодачі сучасних дизелів різного призначення. Відзначена необхідність удосконалювання паливної апаратури, яке полягає в можливості регулювання тиску впорскування залежно від режиму дизеля, керування характеристикою впорскування, організації багатofазного впорскування, впровадженні електронного керування процесом паливopодачі. Реалізувати ці вимоги дозволяє застосування акумуляторних паливних систем з електронним керуванням.

Рівень досконалості всієї паливної апаратури в більшості випадків оцінюють по технічному рівню застосовуваних форсунок. Одним з основних напрямків розвитку форсунок є підвищення тиску впорскування (до 220 МПа), що разом з багатофазним впорскуванням позитивно позначається на показниках двигуна.

Перспективні є форсунки з регульованими розпилювачами CVN (Coaxial Vario Nozzle) та за технологією HADI (Hydraulically Amplified Diesel Injector). Останні здатні робити впорскування палива з тиском до 250 МПа.

Сучасний рівень розвитку технології паливоподачі дозволяє не тільки вдосконалювати сумішоутворення, але й більш точно управляти впорскуванням, створюючи передумови для нових стратегій і можливостей дослідження.

У результаті аналізу тенденцій розвитку систем паливоподачі сучасних дизелів різного призначення встановлена перспективність систем впорскування акумуляторного типу.

Представлене компонування гібридної системи впорскування палива на базі штатної паливної апаратури судового середньообертового двигуна 6ЧН25/34. Запропонована система показників для оцінки конструктивних і експлуатаційних параметрів системи, що включає фазові дані й тиску в різних крапках системи.

Проведені випробування на режимах швидкісної характеристики в діапазоні частоти обертання розподільного вала $n_p = 53 - 252$ об/хв і вході рейки ПНВТ $m = 20$ мм.

Досліджена взаємодія акумуляторного модуля й базової системи паливоподачі при незмінних параметрах керування сполучним золотником.

При відкритті золотника впорскування палива має дробовий характер із частковим підйомом голки, що становлять 0,4 від повного ходу.

Кут затримки відкриття золотника є функцією частоти обертання, який зростає зі збільшенням числа обертів, а з ним й затримка підйому голки форсунки $\varphi'_{зпг}$. Так, при максимальних оборотах голка починає підйом із затримкою в $\varphi'_{зпг} = 44^\circ$ ПРВ (повний діапазон $\varphi'_{зпг} \sim 6 - 44^\circ$ ПРВ).

Ключові слова: гібридна система впорскування палива, паливоподача, швидкісна характеристика

Половинка Е.М., Мартинов С.В. Швидкісна характеристика гібридної системи впорскування палива судового середньообертового дизеля

The analysis of trends in the development of methods and technical means of fueling modern diesel engines of various purposes is presented. The need to improve the fuel equipment is noted, which consists in the possibility of adjusting the injection pressure depending on the diesel mode, controlling the injection characteristics, organizing multiphase injection, and introducing electronic con-

trol of the fuel supply process. These requirements can be implemented using accumulator fuel systems with electronic control.

In most cases, the level of perfection of the entire fuel equipment is evaluated by the technical level of the used injectors. One of the main areas of injector development is increasing the injection pressure (up to 220 MPa), which, together with multiphase injection, has a positive effect on engine performance.

Injectors with adjustable nozzle CVN (Coaxial Vario Nozzle) and HADI (Hydraulically Amplified Diesel Injector) technology are promising. The latter are able to inject fuel with a pressure of up to 250 MPa.

The current level of development of fuel supply technology allows not only to improve mixture formation, but also to control injection more precisely, creating prerequisites for new strategies and research opportunities.

As a result of the analysis of the trends in the development of fuel supply systems of modern diesel engines of various purposes, the prospects of accumulator - type injection systems have been established.

The layout of the hybrid fuel injection system based on the standard fuel equipment of the 6ChN5/34 marine medium-speed engine is presented. A system of indicators is proposed for evaluating the structural and operational parameters of the system, which includes phase data and pressure at various points of the system.

Tests were carried out on the speed characteristic modes in the range of camshaft rotation frequency $n_c = 53 - 252$ rpm and toothed rack injection pump output $m = 20$ mm.

The interaction of the accumulator module and the basic fuel supply system with unchanged control parameters of the connecting spool was studied.

When opening the spool, fuel injection is fractional in nature with a partial lift of the needle, which is 0.4 of a full stroke.

The spool opening delay angle is a function of the rotation frequency, which increases as the number of revolutions increases, and with it, the nozzle needle lift delay φ'_{dnl} . Thus, at maximum revolutions, the needle begins to rise with a delay in $\varphi'_{dnl} = 44^\circ$ CA (the full range of $\varphi'_{dnl} \sim 6-44^\circ$ CA).

Keywords: hybrid fuel injection system, fuel delivery, speed characteristics

Сазін С.В., Парменова Д.Г., Верпека А.О. Підвищення паливної економічності дизелів суден морського транспорту

Розглянути питання щодо підвищення паливної економічності дизелів суден морського транспорту. Зазначено, що в останні роки на транспортних судах морського та внутрішнього водного транспорту для забезпечення роботи дизелів використовуються важкі сорти палива високої в'язкості, що мають більш низьку вартість. Згідно з вимогами таких провідних фірм, що будують дизелі, як Wartsila-Sulzer, MAN Diesel & Turbo суднові дизелі повинні надійно експлуатуватися на всіх режимах (в тому числі на пускових і перехідних) під час використання палив з в'язкістю до $700 \text{ мм}^2/\text{с}$. Викорис-

тання в судових дизелях палив підвищеної в'язкості перш за все пов'язано зі намаганням зменшити експлуатаційні витрати на придбання рідкого палива. Одночасно з цим підвищенню економічності роботи судових дизелів сприяє не лише вартість палива, але також визначення оптимальних режимів його використання, а також впровадження сучасних технологій, що підвищують якість його збереження, транспортування та згоряння. До однієї з технологій, яка спрямована на підвищення економічності роботи дизелів морських суден, відноситься використання паливних присадок. Метою дослідження було визначення впливу паливних присадок на економічність роботи дизелів морських суден. Експериментально отримані результати, що підтверджують зниження питомої ефективної витрати палива під час використання паливних присадок, свідчать про інтенсифікацію процесу сумішотворення і згоряння палива. Це призводить до більш повного використання його теплотворної здатності та зниження кількості палива, що догоряє на ході розширення і в випускному колекторі. При цьому відзначаємо, що для різної концентрації присадки в базовому паливі спостерігається різна величина зниження питомої ефективної витрати палива. Використання присадок до палива призводить до підвищення паливної економічності судового дизеля. Під час використання паливних присадок на різних режимах роботи судового дизеля Wartsila 6L32F було досягнуте зниження питомої ефективної витрати палива на 0,61...4,91 %.

Ключові слова: економічність роботи дизеля, морський транспорт, паливна система, питома витрата палива, присадки до судового палива, судовий дизель, суднове паливо.

Sagin S.V., Parmenova D.G., Verpeka A.O. Increasing the fuel efficiency of diesel engines of marine transport vessels

To consider the issue of increasing the fuel efficiency of diesel engines of marine transport vessels. It is noted that in recent years, heavy grades of high-viscosity fuel, which have a lower cost, have been used on marine and inland waterway transport vessels to ensure the operation of diesel engines. According to the requirements of such leading companies that build diesel engines as Wartsila-Sulzer, MAN Diesel & Turbo, marine diesel engines must be reliably operated in all modes (including starting and transient) when using fuels with a viscosity of up to 700 mm²/s. The use of high-viscosity fuels in marine diesel engines is primarily associated with an attempt to reduce operating costs for the purchase of liquid fuel. At the same time, the increase in the efficiency of marine diesel engines is facilitated not only by the cost of fuel, but also by the determination of optimal modes of its use, as well as the introduction of modern technologies that improve the quality of its preservation, transportation and combustion. One of the technologies aimed at increasing the efficiency of marine diesel engines is the use of fuel additives. The purpose of the study was to determine the influence of fuel additives on the efficiency of marine diesel engines. The experimentally obtained

results, confirming the decrease in the specific effective fuel consumption during the use of fuel additives, indicate an intensification of the process of mixture formation and combustion of fuel. This leads to a more complete use of its calorific value and a decrease in the amount of fuel that burns out during expansion and in the exhaust manifold. It should be noted that for different concentrations of the additive in the base fuel, a different amount of decrease in the specific effective fuel consumption is observed. The use of fuel additives leads to an increase in the fuel efficiency of marine diesel. When using fuel additives in different operating modes of the Wartsila 6L32F marine diesel engine, a reduction in specific effective fuel consumption by 0.61–4.91 % was achieved.

Keywords: diesel engine efficiency, marine transport, fuel system, specific fuel consumption, marine fuel additives, marine diesel, marine fuel.

Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Поповський А.Ю., Сагін А.С. Адаптація систем автоматичного регулювання частоти обертання суднових дизелів під час їх переведення на паливо з низьким вмістом сірки

Розглянути питання щодо адаптації систем автоматичного регулювання частоти обертання суднових дизелів під час їх переведення на паливо з низьким вмістом сірки. Зазначено, що під час експлуатації дизелів морських суден забезпечується розв'язання завдань не лише підтримання їх ефективності та технічного стану, але також з виконання міжнародних та національних вимог з попередження забруднення довкілля. Однієї із забруднюючих речовин, що входить до складу випускних газів, є оксиди сірки, які знаходяться в прямій залежності від вмісту сірки у паливі. Зниження вмісту сірки в судовому паливі чинить комплексний вплив на процес згоряння у двигунах внутрішнього згоряння. У разі зменшення її вмісту у паливі змінюються такі параметри, як в'язкість, температура займання та швидкість поширення фронту полум'я. Одночасно з цим підвищується вміст в паливі інших складових – вуглецю та водню, що призводить до збільшення теплотворної здатності палива та у подальшому у збільшення теплової енергії що утворюється під час згоряння палива, перетворюється на кінетичну енергії газів, створює тиск на поршень, забезпечує його поступальний рух та обертальний рух колінчатого валу. Це призводить до необхідності корегування налаштування регуляторів частоти обертання колінчатого валу дизеля та забезпечення адаптації систем автоматичного регулювання частоти обертання суднових дизелів під час їх переведення на паливо з низьким вмістом сірки. Шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання (у програмному середовищі Matlab / Simulink) були визначені оптимальні параметри налаштування регулятора, які близькі до оптимальних значень: коефіцієнт підсилення за пропорційною компонентою та обернений коефіцієнт пропорційності (час інтегрування) за інтегруючою складовою. При цьому забезпечуються найменші значення критеріїв оптимальності. Це, у свою чергу, забезпечує оп-

тимальний процес виходу швидкісного режиму головного двигуна на новий сталий режим під час його переведення на використання палива вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %.

Ключові слова: автоматична система регулювання частоти обертання валу дизеля, паливо з низьким вмістом сірки, параметри настройки регулятора, перехідний процес, регулятор частоти обертання, судновий дизель, частота обертання валу.

Sagin S.V., Zablotzkyi Y.V. Popovskii O.Y., Sagin A.S. Adaptation of automatic speed control systems for marine diesel engines during their conversion to low-sulfur fuel

To consider the issue of adapting automatic speed control systems for marine diesel engines during their conversion to low-sulfur fuel. It is noted that during the operation of marine diesel engines, the tasks of not only maintaining their efficiency and technical condition are solved, but also meeting international and national requirements for the prevention of environmental pollution. One of the pollutants included in the exhaust gases is sulfur oxides, which are directly dependent on the sulfur content in the fuel. Reducing the sulfur content in marine fuel has a complex effect on the combustion process in internal combustion engines. In the event of a decrease in its content in the fuel, such parameters as viscosity, ignition temperature and flame front propagation speed change. At the same time, the content of other components in the fuel increases – carbon and hydrogen, which leads to an increase in the calorific value of the fuel and subsequently to an increase in the thermal energy generated during fuel combustion, converted into kinetic energy of gases, creates pressure on the piston, ensures its translational movement and rotational movement of the crankshaft. This leads to the need to adjust the settings of the diesel engine crankshaft speed controllers and ensure the adaptation of the automatic speed control systems of marine diesel engines during their conversion to low-sulfur fuel. By means of simulation computer modeling (in the Matlab / Simulink software environment), the optimal settings of the controller were determined, which are close to the optimal values: the gain coefficient for the proportional component and the inverse proportionality coefficient (integration time) for the integrating component. At the same time, the smallest values of the optimality criteria are ensured. This, in turn, ensures the optimal process of the main engine speed mode reaching a new stable mode during its transfer to the use of fuel with a sulfur content of not more than 0.1 %.

Keywords: automatic diesel engine shaft speed control system, low-sulfur fuel, marine diesel, regulator settings, shaft speed, speed controller, transient process.

Фомін О.В., Мельник О.В., Черкашин О.П., Гунько Є.В. Перспективні шляхи підвищення надійності та ефективності механізмів газорозподілу енергетичних установок

Зазначено, що у сучасній морській індустрії постійно зростають вимоги до надійності, економічності та екологічності суднових енергетичних установок. Механізми газорозподілу є ключовими компонентами двигунів, які відповідають за надходження повітря та видаління відпрацьованих газів, проте вони залишаються одними з найбільш вразливих вузлів, що часто призводять до аварій. Зазначено, що проблеми надійності та ефективності механізмів газорозподілу суднових двигунів є актуальними, існуючі технічні рішення не повною мірою відповідають сучасним вимогам. Дослідження присвячене розробці перспективних шляхів для підвищення надійності та ефективності механізму газорозподілу суднових двигунів, враховуючи екстремальні умови їх експлуатації. Для розв'язання проблеми було запропоновано та обґрунтовано ряд інноваційних рішень, включаючи застосування нових високотемпературних матеріалів, таких як керамічні композити та покриття, що знижують знос. Також розглянуто оптимізацію конструкції та систем зміни фаз газорозподілу, які адаптують роботу двигуна до різних навантажень. Застосування цих технологій дозволяє підвищити механічний коефіцієнт корисної дії двигуна та значно знизити питому витрату палива. Запропоновані інноваційні конструктивні рішення, зокрема оптимізовані профілі кулачків та системи приводу, дозволяють знизити вібрації і підвищити точність роботи механізму. Крім того, ці рішення сприяють зменшенню викидів шкідливих речовин, зокрема оксидів азоту, що відповідає суворим міжнародним екологічним нормам. Результати дослідження підтверджують, що впровадження запропонованих рішень дозволить підвищити надійність, паливну ефективність та екологічність суднових двигунів. Це має важливе значення для сталого розвитку морських засобів транспорту. Впровадження результатів дослідження дозволить скоротити експлуатаційні витрати, зменшити ризик аварій та підвищити паливну ефективність суднових двигунів. Отримані дані можуть бути використані для модернізації існуючих двигунів та проєктування нових, більш надійних та екологічних.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, екологічність, ефективність, механізми газорозподілу, морський транспорт, надійність, суднові енергетичні установки, транспорт

Fomin O., Melnyk O., Cherkashin O., Gunko I. Promising ways to increase the reliability and efficiency of gas distribution mechanisms of power plants

It is noted that in the modern maritime industry, the requirements for the reliability, economy and environmental friendliness of ship power plants are constantly increasing. Gas distribution mechanisms are key components of engines that are responsible for the intake of air and the removal of exhaust gases, but they remain one of the most vulnerable nodes that often lead to accidents. It is

noted that the problems of reliability and efficiency of gas distribution mechanisms of ship engines are relevant, existing technical solutions do not fully meet modern requirements. The study is devoted to the development of promising ways to increase the reliability and efficiency of the gas distribution mechanism of ship engines, taking into account the extreme conditions of their operation. To solve the problem, a number of innovative solutions were proposed and substantiated, including the use of new high-temperature materials, such as ceramic composites and coatings that reduce wear. Optimization of the design and systems for changing the gas distribution phases, which adapt the engine operation to different loads, is also considered. The use of these technologies allows to increase the mechanical efficiency of the engine and significantly reduce specific fuel consumption. The proposed innovative design solutions, in particular optimized cam profiles and drive systems, allow to reduce vibrations and increase the accuracy of the mechanism. In addition, these solutions contribute to the reduction of emissions of harmful substances, in particular nitrogen oxides, which meets strict international environmental standards. The results of the study confirm that the implementation of the proposed solutions will allow to increase the reliability, fuel efficiency and environmental friendliness of ship engines. This is of great importance for the sustainable development of marine vehicles. The implementation of the results of the study will allow to reduce operating costs, reduce the risk of accidents and increase the fuel efficiency of ship engines. The data obtained can be used to modernize existing engines and design new, more reliable and environmentally friendly ones.

Keywords: environmental friendliness, efficiency, gas distribution mechanisms, internal combustion engine, maritime transport, reliability, ship power plants, transport.

Хлісва О.Я., Константинов О. І. Аналіз ефективності установки на основі органічного циклу Ренкіна на різних робочих тілах для рекуперації теплоти води охолодження двигуна Wärtsilä 12V46F

Актуальність роботи пов'язана з необхідністю підвищення ефективності суднових енергетичних установок. Робота присвячена енергетичному аналізу суднової установки на основі органічного циклу Ренкіна (ORC), яка живиться теплою водою охолодження двигуна Wärtsilä 12V46F. Проаналізовано ефективність двох конфігурацій ORC при змінній температурі забортної води тзв, а також ефективність ORC установки на основі регенеративного циклу для трьох робочих тіл: R601, R245fa та R1233zd(E). Показано, що при наявності регенеративного теплообмінника в контурі ORC установці, температура кипіння R601 приблизно на 2 К нижче, ніж для нерегенартивного ORC. Однак, загальна ефективність установки на основі регенеративного ORC вище на 6,9...10,8 %, ніж для нерегенеративного ORC. Значення ККД дійсного регенеративного ORC при однакових температурах джерела та приймача теплоти близькі для розглянутих робочих тіл

та змінюються від 0,08 до 0,14 при зменшенні тзв від 30 °C до 2 °C. Загальний ККД ORC установки на R601 вище приблизно на 2,5 %, ніж для R245fa (близьке значення й для R1233zd(E)) при роботі з низькою тзв = 2 °C. Однак, зі збільшенням тзв переваги R601 знижуються, при тзв = 10 °C його ефективність вже на 2,2 % вище, ніж R245fa, а при тзв = 30 °C – всього на 0,8 %. Вихідна електрична потужність ORC установки при 75 % навантаженні на двигун Wärtsilä 12V46F при застосуванні як робочого тіла R601 варіюється від 290 кВт при тзв = 30 °C до 520 кВт при тзв = 2 °C. Пентан R601 є найбільш раціональним робочим тілом у розглянутій ORC установці, порівняно з R245fa та R1233zd(E). Основний його недолік – горючість. Однак, вуглеводні як робочі тіла холодильних систем (як наслідок, й ORC установок) з 2024 року дозволені до використання на борту судна Lloyd's Register при забезпеченні відповідних мер безпеки.

Ключові слова: суднова енергетична установка; рекуперація вторинної теплоти; органічний цикл Ренкіна; термодинамічний аналіз; енергоефективність; регенеративний теплообмінник; робоче тіло

Khlieva O.Ya., Konstantinov O.I. Analysis of the Efficiency of an Organic Rankine Cycle-Based Unit Using Different Working Fluids for Heat Recovery of Wärtsilä 12V46F Engine Cooling Water

The study's relevance is related to the need to improve the efficiency of marine power plants. The study is devoted to the energy analysis of an Organic Rankine Cycle (ORC) ship power plant utilising the waste heat from the Wärtsilä 12V46F engine cooling water. The performance of two ORC configurations under variable seawater temperature (tsw), as well as the efficiency of a regenerative ORC for three working fluids: R601, R245fa, and R1233zd(E), were analysed. In the presence of a regenerative heat exchanger in the ORC circuit, the R601 boiling temperature is approximately 2 K lower than that of the non-regenerative ORC. However, the total efficiency of the regenerative ORC is 6.9...10.8% higher than that of a non-regenerative one. The regenerative ORC actual efficiency at the same heat source and heat sink temperatures is similar for all considered working fluids and varies from 0.08 to 0.14 as tsw decreases from 30 °C to 2 °C. The overall efficiency of the R601-based ORC is approximately 2.5% higher than that of R245fa (similar values for R1233zd(E)) when operating at a low tsw = 2 °C. However, with increasing tsw, the advantage of R601 decreases: its efficiency is 2.2% higher than that of R245fa at tsw = 10 °C, and it is just 0.8% higher at tsw = 30 °C. The net electrical power output of the ORC unit at 75% Wärtsilä 12V46F engine load when using R601 as a working fluid ranges from 290 kW at tsw = 30 °C to 520 kW at tsw = 2 °C. Pentane (R601) is the most rational working fluid for the considered ORC system compared to R245fa and R1233zd(E). Its main drawback is flammability. However, hydrocarbons as working fluids in refrigeration systems (and consequently in ORC plants) are

permitted for use onboard ships under Lloyd's Register since 2024, provided that appropriate safety measures are ensured.

Keywords: ship power plant, waste heat recovery; Organic Rankine Cycle; thermodynamic analysis; energy efficiency; regenerative heat exchanger, working fluid

Черемісін В.І., Санига В.В., Ігнатенко О.А. Підвищення термодинамічної ефективності газотурбінних двигунів морського призначення

Головними недоліками простих газотурбінних установок відкритого типу є низький ефективний коефіцієнт корисної дії та обмеження температури газів, які подаються на лопатки турбіни. Це обумовлює низьке значення термічного і ефективного коефіцієнтів корисної дії установки. Враховуючи суттєві переваги газотурбінних установок над двигунами внутрішнього згоряння - простота отримання обертальної форми механічної роботи, можливість отримання великих потужностей при малих питомих масогабаритних показниках, мобільність при пуску газотурбінних установок та їх придатність виступати в якості утилізаційного елемента двигунів внутрішнього згоряння, вони мають велике майбутнє. Тому запропоновано декілька удосконалень термодинамічного циклу газотурбінних установок. Насамперед, це такі удосконалень:

- попереднє охолодження повітря за допомогою утилізаційної холодильної установки перед його стисненням в компресорі, що зменшує роботу стиснення, а значить підвищує питому потужність газотурбінної установки;

- розширення газів в турбіні до тиску нижче атмосферного з їх охолодженням перед їх стисненням для викидання в оточуюче середовище, це збільшує роботу розширення газів в турбіні, а значить підвищує питому потужність установки;

- комбінація цих удосконалень - попереднє охолодження повітря і розширення газів до тиску менше атмосферного;

- комбінація цих удосконалень з відомими класичними удосконаленьми, наприклад, попереднє охолодження повітря перед стисненням в компресорі та регенерацією теплоти відпрацювавших газів турбіни і т.п.

В статті розглядається спосіб здійснення термодинамічного циклу газотурбінної установки, за яким гази розширюють в турбіні до тиску нижче атмосферного, який утворюють і підтримують в ресивері-охолоджувачі за допомогою вакуумного насоса, який також стискає відпрацювавши гази турбіни до атмосферного тиску після їх охолодження в ресивері холодноносієм утилізаційної абсорбційної холодильної установки, генератор пари якої нагрівають вихлопними газами турбіни.

Аналізуючи результати розрахунків можна зробити наступні висновки:

- зниження кінцевого тиску розширення газів в турбіні призводить до суттєвого підвищення корисної питомої роботи і термічного коефіцієнта

корисної дії модифікованої установки в порівнянні з базовим циклом, в якому гази розширюються до атмосферного тиску;

- при зменшенні кінцевого тиску помітно знижується температура газів після розширення їх в турбіні і відповідно після охолодження їх в ресивері-охолоджувачі;

- при значеннях кінцевого тиску розширення газів в турбіні для їх охолодження можна використовувати утилізаційну водо-аміачну холодильну установку, генератор пари якої нагрівається відпрацювавшими газами турбіни;

- при значеннях кінцевого тиску розширення газів необхідно використовувати холодильну установку каскадного типу, нижній ступінь якої потребує затрати зовнішньої додаткової роботи, що уповільнить зростання роботи і термічного коефіцієнта корисної дії модифікованих таким чином установок.

При великих масштабах використання і потужностях сучасних газотурбінних установок відкритого типу, впровадження пропонуемого удосконалення дозволить не тільки економити багато палива при їх експлуатації, але й покращити їх масо-габаритні показники. Кількість заощаджених при цьому коштів швидко окупить додаткові капітальні витрати, пов'язані з виробництвом більш складних за устроєм модифікованих пропонуємих чином газотурбінних установок.

Ключові слова: газотурбінний двигун, утилізаційна холодильна установка, розширення, термічний коефіцієнта корисної дії, питома потужність.

Cheremisin V.I., Sapiga V.V., Ignatenko O.A. Increasing the thermodynamic efficiency of marine gas turbine engines

The main disadvantages of simple open-type gas turbine plants are the low effective efficiency and the limitation of the temperature of the gases supplied to the turbine blades. This causes a low value of the thermal and effective efficiency of the plant. Considering the significant advantages of gas turbine units over internal combustion engines - the simplicity of obtaining a rotational form of mechanical work, the possibility of obtaining high capacities with small specific mass-dimensional indicators, mobility during start-up of gas turbine units and their suitability to act as a utilization element of internal combustion engines, they have a great future. Therefore, several improvements to the thermodynamic cycle of gas turbine units have been proposed. First of all, these are the following improvements:

- pre-cooling of air using a recycling refrigeration unit before its compression in the compressor, which reduces the compression work, and therefore increases the specific power of the gas turbine unit;

- expansion of gases in the turbine to a pressure below atmospheric with their cooling before their compression for discharge into the environment, this

increases the work of expansion of gases in the turbine, and therefore increases the specific power of the unit;

- a combination of these improvements - pre-cooling of air and expansion of gases to a pressure less than atmospheric;

- a combination of these improvements with known classical improvements, for example, pre-cooling of air before compression in the compressor and heat regeneration of the turbine exhaust gases, etc.

The article considers a method for implementing a thermodynamic cycle of a gas turbine plant, in which gases are expanded in the turbine to a pressure below atmospheric, which is formed and maintained in the receiver-cooler using a vacuum pump, which also compresses the turbine exhaust gases to atmospheric pressure after cooling them in the receiver with the coolant of a recycling absorption refrigeration plant, the steam generator of which is heated by the turbine exhaust gases.

Analyzing the results of the calculations, the following conclusions can be drawn:

- a decrease in the final pressure of the expansion of gases in the turbine leads to a significant increase in the useful specific work and thermal efficiency of the modified installation compared to the base cycle, in which the gases expand to atmospheric pressure;

- when the final pressure is reduced, the temperature of the gases after their expansion in the turbine and, accordingly, after their cooling in the receiver-cooler is noticeably reduced;

- at the values of the final pressure of the expansion of gases in the turbine, a waste water-ammonia refrigeration unit can be used to cool them, the steam generator of which is heated by the exhaust gases of the turbine;

- at the values of the final pressure of the expansion of gases, it is necessary to use a cascade-type refrigeration unit, the lower stage of which requires additional external work, which will slow down the growth of the work and thermal efficiency of the installations modified in this way.

Given the large scale of use and capacities of modern open-type gas turbine plants, the implementation of the proposed improvement will allow not only to save a lot of fuel during their operation, but also to improve their weight and dimensions. The amount of money saved will quickly pay off additional capital costs associated with the production of more complex gas turbine plants modified in the proposed way.

Keywords: gas turbine plant, utilizing refrigerating plant, broadening to vacuum, cooling of air, thermal coefficient of efficiency, specific power.

Козицький С.В., Бездітко А.А. Використання наноматеріалів – спосіб збільшення ресурсу морських механізмів

Підвищення надійності та довговічності суднових механізмів є одним з основних завдань сучасного суднобудування та ефективної експлуатації

флоту. Раніше для збільшення ресурсу суднових механізмів та зменшення втрат на тертя використовували мікронні добавки до мастильних матеріалів, для яких досягнення однорідності та стабільності було складним завданням.

Перспективним напрямком вирішення цієї проблеми є застосування нанотехнологій – галузі науки і техніки, спрямованої на отримання матеріалів, утворених елементами з розмірами в діапазоні 1-100 нанометрів. Фізичні та хімічні властивості нанорозмірних частинок суттєво відрізняються від відповідних їм макроскопічних частинок, що пов'язано з розмірними ефектами. підвищеною хімічною активністю та нерівноважним станом. Ці властивості наночастинок забезпечують матеріалам, виготовленим з них, збільшення твердості в 2-7 разів, міцності в 1,5-8 разів та плинності в 2-3 рази порівняно з традиційними матеріалами. Крім того, при використанні наночастинок швидкість осідання зменшується в 100-1000 разів, що значно покращує стабільність дисперсії наночастинок.

В статті розглянуті перспективи використання наноматеріалів компаній «XADO» та «NanoVit» до складу яких входять оксиди металів у нанорозмірному стані. Ці наноматеріали значно покращують міцність, зносостійкість та теплопровідність поверхонь тертя завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям. Ключовою перевагою цих матеріалів є їхня здатність утворювати захисні металокерамічні плівки, що знижують коефіцієнт тертя, запобігають зносу та відновлюють пошкоджені поверхні. Експериментальні дані свідчать про збільшення терміну служби механізмів у 1,5–2,5 рази, економію палива до 12% та зниження витрат на обслуговування.

Таким чином, використання нанотехнологій у суднобудуванні відкриває нові можливості для підвищення ефективності та довговічності суднових двигунів та механізмів, що є важливим кроком у розвитку сучасної морської галузі.

Ключові слова: наноматеріали, ХАДО, НАНОВІТ

Kozytskyi S.V., Bezditko A.A. Use of nanomaterials – a way to increase the resource of marine mechanisms

Increasing the reliability and durability of ship mechanisms is one of the main tasks of modern shipbuilding and efficient fleet operation. Previously, to increase the resource of ship mechanisms and reduce friction losses, micron additives to lubricants were used, for which achieving uniformity and stability was a difficult task.

A promising direction for solving this problem is the application of nanotechnologies – a field of science and technology aimed at obtaining materials formed by elements with sizes in the range of 1-100 nanometers. The physical and chemical properties of nanoscale particles significantly differ from their corresponding macroscopic particles, which is related to size effects, increased chemical activity and non-equilibrium state. These properties of nanoparticles provide

materials made from them with an increase in hardness by 2-7 times, strength by 1.5-8 times, and fluidity by 2-3 times compared to traditional materials. In addition, when using nanoparticles, the sedimentation rate is reduced by 100-1000 times, which significantly improves the stability of the nanoparticle dispersion.

The article discusses the prospects for using nanomaterials from the companies "XADO" and "NanoVit", which include metal oxides in the nanoscale state. These nanomaterials significantly improve the strength, wear resistance and thermal conductivity of friction surfaces due to their unique physicochemical properties. The key advantage of these materials is their ability to form protective metal-ceramic films that reduce the friction coefficient, prevent wear and restore damaged surfaces. Experimental data indicate an increase in the service life of mechanisms by 1.5–2.5 times, fuel savings of up to 12% and a reduction in maintenance costs.

The article discusses the prospects for using nanomaterials from the companies "XADO" and "NanoVit", which include metal oxides in the nanoscale state. These nanomaterials significantly improve the strength, wear resistance and thermal conductivity of friction surfaces due to their unique physicochemical properties. The key advantage of these materials is their ability to form protective metal-ceramic films that reduce the friction coefficient, prevent wear and restore damaged surfaces. Experimental data indicate an increase in the service life of mechanisms by 1.5–2.5 times, fuel savings of up to 12% and reduced maintenance costs.

Thus, the use of nanotechnology in shipbuilding opens up new opportunities for increasing the efficiency and durability of ship engines and mechanisms, which is an important step in the development of the modern maritime industry.

Keywords: nanomaterials, XADO, NANOVIT

Корх М.В., Журавльов Ю.І. Інновації у створенні креслень та схем суднових систем

У даній роботі досліджено перспективи розвитку інновацій у створенні креслень та схем суднових систем. Представлено фундаментальні аспекти цього процесу, зокрема основні принципи створення креслень суднових систем. Розглянуто сучасні інструменти та технології, а також їхній вплив на ефективність процесу суднобудування.

Важливою частиною дослідження є вивчення того, як новітні технології можуть відповідати стандартам, що сприяє підвищенню безпеки судноплавства та забезпечує конкурентоспроможність на глобальному ринку. Розробка креслень і схем суднових систем є регульованою галуззю, оскільки помилки у проектуванні можуть мати серйозні наслідки для безпеки судна, екіпажу та пасажирів.

У роботі описано основні стандарти і регламенти, яких дотримуються в суднобудуванні. Ці стандарти забезпечують єдність підходів до розробки креслень, що гарантує:

Сумісність обладнання: креслення різних постачальників легко інтегруються в єдину систему.

Зрозумілість креслень: уніфіковані позначення полегшують роботу технічного персоналу.

Мінімізацію помилок: стандартизація процесів знижує ризик проектних недоліків.

Такий підхід до стандартизації гарантує високу якість креслень, а також сприяє створенню безпечних і надійних суден.

Проведено аналіз, який показав, що останнім часом зростає інтерес до інновацій у створенні автоматизованих систем управління суднами. Це охоплює автоматизацію процесів управління та контролю, інтеграцію з системами управління вантажами та безпекою, що вимагає нових підходів до проектування креслень і схем.

Інноваційні технології дозволяють ефективніше використовувати нові матеріали для створення суднових систем, що сприяє зменшенню ваги, підвищенню міцності та зниженню витрат на обслуговування суден. Сучасні інженерні рішення у створенні схем суднових систем враховують новітні підходи до матеріалів і конструкцій, що покращує економічні та експлуатаційні характеристики суден.

У роботі висвітлено інноваційні технології, такі як використання програмного забезпечення для 3D-моделювання, хмарних платформ для спільної роботи, VR/AR для візуалізації та цифрових двійників для моніторингу. Ці технології значно змінили процес створення креслень і схем суднових систем. Вони забезпечують підвищену точність, скорочують час на проектування та монтаж, а також дозволяють передбачати потенційні проблеми ще до початку фізичного виробництва судна, що знижує ймовірність помилок і витрат.

Наведено приклади інновацій у створенні креслень та схем суднових систем, які демонструють переваги сучасних технологій порівняно з традиційними підходами. Зокрема, розглянуто застосування програмного забезпечення, хмарних платформ, VR/AR технологій та цифрових двійників.

У роботі також описано перспективи подальших досліджень. Фахівці прогнозують зростання застосування інновацій у найближчі роки, що сприятиме значному збільшенню виробничих можливостей і суттєвим змінам у морській галузі. Таким чином, сучасні технології дозволяють значно поліпшити якість і ефективність створення креслень, перетворюючи проектування на більш динамічний, інтерактивний і результативний процес.

Ключові слова: інноваційні технології, креслення, схеми, суднобудування.

Korkh M. V., Zhuravlov Yu.I. Innovation in the development of ship system drawings and schematics

This study examines the prospects for the development of innovations in creating drawings and schematics for ship systems. It presents the fundamental aspects of this process, particularly the key principles of creating ship system drawings. Modern tools and technologies, as well as their impact on the efficiency of shipbuilding processes, are analyzed.

A significant part of the research focuses on how the latest technologies comply with standards that enhance maritime safety and ensure competitiveness in the global market. The development of drawings and schematics for ship systems is a regulated field, as design errors can lead to serious consequences for the safety of the vessel, crew, and passengers.

The study describes the main standards and regulations followed in shipbuilding. These standards ensure a unified approach to developing drawings, which guarantees:

Equipment compatibility: drawings from different suppliers can be seamlessly integrated into a single system.

Clarity of drawings: standardized notations facilitate the work of technical personnel.

Minimization of errors: process standardization reduces the risk of design flaws.

Such an approach to standardization guarantees high-quality drawings and contributes to the creation of safe and reliable ships.

The analysis showed that increasing attention is being paid to innovations in developing automated ship management systems. This includes automation of management and control processes, integration with cargo and safety management systems, which also requires new approaches to designing drawings and schematics.

Innovative technologies enable more efficient use of new materials for ship system creation, reducing weight, increasing strength, and lowering maintenance costs. Modern engineering solutions in creating ship system schematics also consider new approaches to materials and structures, improving the economic and operational characteristics of ships.

The study highlights innovative technologies such as software for 3D modeling, cloud platforms for collaboration, VR/AR for visualization, and digital twins for monitoring. These technologies have significantly transformed the process of creating drawings and schematics for ship systems. They enhance accuracy, reduce design and assembly time, and allow potential issues to be identified before the physical production of the ship begins, thereby reducing errors and costs.

Examples of innovations in creating ship system drawings and schematics are provided, illustrating the advantages of modern technologies compared to traditional approaches. Specifically, the application of software, cloud platforms, VR/AR technologies, and digital twins is discussed.

The study also describes future research prospects. Experts predict a growing application of innovations in the coming years, leading to significant increases in production capabilities and substantial changes in the maritime industry. Thus, modern technologies significantly improve the quality and efficiency of creating drawings, transforming design into a more dynamic, interactive, and effective process.

Keywords: innovative technologies, drawings, schematics, shipbuilding.

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, підписуваних підписів і реферату.

Реферат двома мовами — українською та англійською — наводиться наприкінці рукопису та повинен містити: ФІО авторів, назву статті, скорочений зміст та ключові слова. Обсяг реферату кожною мовою 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, підписуваних 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 манільськими 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 Maritime 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 50.

Підписано до друку 25.09.2025. Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. 12,10. Наклад 100. Зам. № И12-12 52.

НУОМА, 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