

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
Київський інститут водного транспорту імені гетьмана
Петра Конашевича-Сагайдачного

ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

Збірник наукових праць

випуск 1 (42)

Київ
2025

Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2025. – Випуск 1 (42). – ___ с. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42>

У збірнику публікуються матеріали, що відображають наукову й методичну роботу викладачів і здобувачів Державного університету інфраструктури та технологій, закладів вищої освіти, фахівців підприємств і організацій водного транспорту.

Більшість публікацій присвячена проблемам галузі, експлуатації засобів водного транспорту, зокрема, розглядаються питання інфраструктури, технологій та організації транспортних процесів, впровадження сучасних технологій, математичного моделювання, екологічної безпеки, економічних аспектів діяльності річкового та морського транспорту й якісної підготовки фахівців з даного напрямку.

Збірник має тематичні розділи: «Судноводіння та енергетика суден», «Методика навчання», «Інформаційні технології».

Засновник: Державний університет інфраструктури та технологій

Адреса редакції: вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071

Телефон: +38(044) 482-51-38

E-mail редакції: vtduit@gmail.com; інформаційний сайт: <http://vt.duit.edu.ua>

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор.

Головний редактор – доктор технічних наук, професор Тимощук О.М.

Редакційна колегія:

Дубинець О.І. д.т.н., професор (ДУІТ); Ганношина І.М., к.т.н., Тихонов І.В., д.т.н., с.н.с., доцент (ДУІТ); Маранов О.В. к.т.н., доцент (ДУІТ); Давидов В.С. к.т.н., доцент (ДУІТ); Сьомін О.А., к.т.н (ДУІТ); Мельник О.В. к.т.н., доцент (ДУІТ); Горобченко О.М., д.т.н., професор (ДУІТ); Фомін О.В., д.т.н., професор (ДУІТ); Богом'я В.І., Заслужений винахідник України, д.т.н., професор (Київський університет інтелектуальної власності та права); (ДУІТ); Сагін С.В., д.т.н., професор (Одеська національна морська академія); Головань А. І., к.т.наук, доцент (Одеський національний морський університет); Варбанець Р.А., д.т.н., професор (Одеський національний морський університет); Чимшир В.І., д.т.н., професор (директор Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»); Оніщенко О.А., Заслужений діяч науки і техніки України, д.т.н., професор (Одеська національна морська академія); Кравченко Ю.В., д.т.н., професор (Київський національний університет імені Т.Г. Шевченка); Гасанов Юсиф Надир огли., д.т.н., професор (Азербайджанська Державна Морська Академія), Гасанов Вагіф Хажан огли., д.т.н., професор (Азербайджанська Державна Морська Академія), Садигов Вюгар Боюкага огли., к.т.н., доцент (Азербайджанська Державна Морська Академія)

Відповідальний секретар редколегії – Левченко О.В. к.е.н., доцент (ДУІТ)

Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Державного університету інфраструктури та технологій (протокол № 19 від 30.01.2025 р.)

Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
№ 1553, від 09.05.2024 р., протокол № 15

Збірник включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б», спеціальності – 271, 275), у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата з технічних наук/доктора філософії (Наказ Міністерства освіти і науки України від 28.12.2019 № 1643).

ЗМІСТ

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

Горалік Є.Т., Крюков М.М., Лупіна Т.О.

Дослідження руху рятувальних шлюпок вільного падіння впродовж фази обертання з урахуванням миттєвих значень сил тертя..... 6

Клочков Ю.П.

Особливості управління великотоннажними суднами при проході суецького каналу 15

Дубинець О.І., Маранов О.В.

Оптимізація процесу розходження суден методом динамічного програмування з урахуванням стохастичних факторів навігаційної обстановки 22

Левченко О.В., Ганношина І.М.

Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна 24

Войченко Т.О., Трофименко А.О., Рященко О.І., Лісовський С.В.

Моделювання управління процесами перевантаження на терміналах морських портів: розробка практичних пропозицій 28

Варбанець Р.А., Мінчев Д.С., Залож В.І.

Аналіз циклової нерівномірності для суднових дизельних двигунів в режимі реального часу 37

Врублевський Р.Є.

Дослідження впливу погдних умов на вміст алюмосилікатів в судовому паливі 46

Левченко О.В., Маранов О.В.

Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах 55

Тимощук О.М., Шапран Ю.Є.

Аналіз методів та засобів нейтралізації вібрації судового дизель-генератора 61

Васалатій Н.В., Монюшко М.М.

Вплив хмарності тропічної зони на безпеку судноплавства 73

Гончарук І.П., Головань А.І., Піменова А.Ю.

Аналіз і моделювання процесу руху судна під час заходу в камеру шлюзу 77

Гончарук І.П., Головань А.І.

Організаційні і технологічні рішення профілактики стресу та покращення психологічного стану моряків на судні 86

Засць А.Ю., Оберто Сантана Л.Е. Енергоефективність сучасних пропульсивних систем: порівняльний аналіз традиційних та азимутальних рушіїв в контексті океанського суднобудування	93
Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях	99
Калініченко Є.В. Порівняльний аналіз динамічних моделей поворотливості судна для прогнозування траєкторії руху	109
Кучеренко Н.В., Томчаковський Г. Г., Капочкіна М.Б., Калініченко Є.В. Умови формування мусонного вітру над індоокеанською аномалією сили тяжіння	115
Хуссейн Ю.М. Система підтримки прийняття рішень для управління операційними ризиками при вантажно-розвантажувальних роботах у портах	131
Фуклев О.І., Ярмач Метод управління маневруванням судна на мілководді	147
Голубєва С.М., Юрченко Є.М. Дослідження технологічних варіантів побудови електричних силових установок на водному транспорті	156
Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів	166
Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів	180
Захарченко Л.Л., Остапчук Т.В. Моделювання та управління судовими енергетичними установками на основі інтелектуальних технологій	195
Горбань А.В., Кучерук Г.Ю. Комплексний підхід щодо забезпечення логістичної стійкості мультимодальних перевезень	203
Науменко А.В., Капочкіна М.Б. Теорія і практика оптимізації проектування морських днопоглиблювальних робіт	210
Руснак Д.Ю. Аналіз методів забезпечення вимог щодо емісії в атмосферу сірчистих сполук з випускними газами суднових дизелів	227

МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

Двуліт З.П.

Застосування штучного інтелекту в освітньому процесі 241

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Богом'я В. І., Черемісіна Л. О., Ярмолатій А. В.

Загрози квантових обчислень для класичних криптографічних алгоритмів 248

Богом'я В. І., Черемісіна Л. О., Ярмолатій А. В., Галунько В.В.

Ефективна організація системи стандартів та правових норм
інформаційної безпеки 258

Горалік Є.Т., Крюков М.М., Лупіна Т.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ РЯТУВАЛЬНИХ ШЛЮПОК ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ВПРОДОВЖ ФАЗИ ОБЕРТАННЯ З УРАХУВАННЯМ МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ СИЛ ТЕРТЯ

В статті наведено короткий огляд досліджень руху рятувальних шлюпок вільного падіння (РШВП) при скиданні з судна, зокрема, розрахункові дослідження руху РШВП протягом фази обертання з урахуванням деяких конструкційних і експлуатаційних факторів виконано з використанням диференціальних рівнянь в узагальнених (полярних) координатах, отриманих за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду.

Розглянуто методику та результати дослідження руху РШВП, яка моделюється однорідним стрижнем, при сходженні з похилої рампи протягом фази обертання з урахуванням усереднених значень сил тертя.

Отримано вирази для нормальної реакції рампи та сили тертя в кожний момент руху протягом фази обертання, з використанням яких запропоновано розв'язувальну систему двох звичайних нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку.

Апробація запропонованого підходу здійснена для випадку моделювання шлюпки однорідним тонким стрижнем довжиною L . Отримано відповідну розв'язувальну систему чотирьох звичайних нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку у формі Коші в узагальнених координатах r і φ , для якої сформульовано задачу Коші, що розв'язувалась чисельно методом Рунге-Кутта четвертого порядку точності при значеннях кута нахилу рампи $\alpha = 35^\circ$ і $\alpha = 25^\circ$ для стрижнів довжиною 5, 10 і 15 м при початкових швидкостях 6, 8 і 10 м/с відповідно.

Отримані результати розрахунків відносної нормальної реакції рампи, тривалості фази обертання, кута нахилу, радіальної і кутової швидкості порівнюються з відповідними результатами розрахунків при усереднених значеннях сили тертя. Встановлено, що результати, отримані при врахуванні миттєвих значень сили тертя, мало відрізняються від результатів, отриманих при врахуванні їх усередненого значення. При цьому, характер зміни параметрів руху стрижня залежить від кута нахилу рампи α та довжини і швидкості стрижня на початку фази обертання.

Ключові слова: рятувальна шлюпка вільного падіння, похила рампа, плоско-паралельний рух, стрижень, рівняння Лагранжа другого роду, звичайні диференціальні рівняння, задача Коші, чисельне моделювання, метод Рунге-Кутта.

Мета роботи полягає в розробці та апробації методики дослідження руху рятувальних шлюпок вільного падіння протягом фази обертання з урахуванням миттєвих значень сил тертя в порівнянні з дослідженнями, виконаними з урахуванням усереднених значень цих сил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При моделюванні спуску рятувальних шлюпок методом вільного падіння їх рух в багатьох роботах зарубіжних і вітчизняних авторів [1-6] поділяється на 4 взаємопов'язані фази (етапи): ковзання по похилій рампі, обертання в кінці рампи, вільне падіння і вхід у воду. Найбільш складним серед фаз руху рятувальної шлюпки до удару об воду є фаза обертання, яка триває з моменту, коли центр мас опиняється над краєм опори (крайнім роликом рампи) до моменту сходу з рампи опорних поверхонь шлюпки [7, 8]. Рух рятувальної шлюпки протягом фази обертання зазвичай [1-6] описується в декартовій системі координат

системою трьох диференціальних рівнянь другого порядку, в кожне з яких входить наперед невідома нормальна реакція рамп. Аналітичний розв'язок таких рівнянь на сьогодні, нажаль, невідомий, тому вони розв'язуються чисельними методами з використанням відповідних комп'ютерних програм.

В роботах [9-13] для дослідження руху рятувальної шлюпки протягом фази обертання з урахуванням деяких конструкційних і експлуатаційних факторів (початкової швидкості, кута нахилу рамп, розташування центру мас шлюпки відносно опорної поверхні) використовуються більш прості системи двох диференціальних рівнянь в полярних координатах з полюсом, розташованим на нижньому кінці рамп, отримані за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду [14].

В роботі [15] розглянуто рух РШВП, що моделюється однорідним стрижнем протягом фази обертання в узагальнених (полярних) координатах (рис. 1) з урахуванням усередненого значення сили тертя. В якості узагальнених координат слугують радіус $r = OC$ – відстань від центру мас стрижня до краю опори і кут φ між горизонтальною віссю x і напрямком OC – віссю стрижня.

Кінетична енергія стрижня при його плоско-паралельному русі протягом фази обертання визначається з виразу:

$$T = \frac{I_{zc}\dot{\varphi}^2}{2} + \frac{mV_c^2}{2},$$

де $I_{zc} = \frac{mL^2}{12}$ – момент інерції стрижня відносно центру мас (m – маса, L – довжина стрижня), $V_c = \sqrt{\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2}$ – модуль вектора швидкості центру мас ($\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ – модуль радіальної швидкості центру мас, $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ – модуль кутової швидкості стрижня).

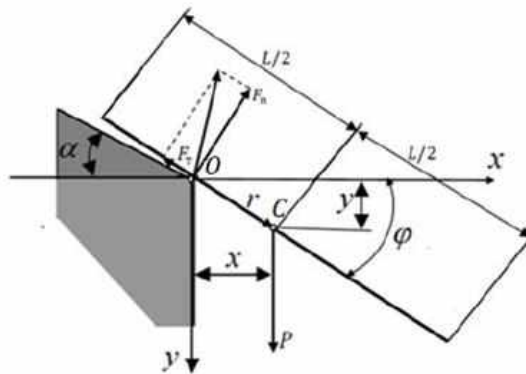


Рисунок 1 – Сходження однорідного стрижня з похилої опори з урахуванням тертя

Після підстановки вищенаведених виразів і алгебраїчних перетворень отримано наступну формулу для кінетичної енергії стрижня в узагальнених координатах:

$$T = \frac{mL^2}{12} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + \frac{m(r^2 + r^2\dot{\varphi}^2)}{2}.$$

В даному випадку рівняння Лагранжа другого роду мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} \right) - \frac{\delta T}{\delta r} &= Q_1, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} \right) - \frac{\delta T}{\delta \varphi} &= Q_2, \end{aligned}$$

де Q_1 і Q_2 – узагальнені сили по координатах r і φ .

Отримано вирази для похідних, що входять у ліві частини рівнянь Лагранжа:

$$\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} = m\dot{r}; \frac{d}{dt}\left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}}\right) = m\ddot{r}; \frac{\delta T}{\delta r} = mr\dot{\varphi}^2; \frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} = \frac{L^2}{12}m\dot{\varphi} + mr^2\dot{\varphi};$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}}\right) = 2mr\dot{r}\dot{\varphi} + \left(\frac{L^2}{12} + r^2\right)m\ddot{\varphi}; \frac{\delta T}{\delta \varphi} = 0.$$

де $\ddot{r} = \frac{d^2r}{dt^2}$ – модуль радіального прискорення центру мас, $\ddot{\varphi} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ – модуль кутового прискорення стрижня.

З їх урахуванням рівняння Лагранжа записуються так:

$$\begin{aligned} m\ddot{r} - mr\dot{\varphi}^2 &= Q_1; \\ 2mr\dot{r}\dot{\varphi} + \left(\frac{L^2}{12} + r^2\right)m\ddot{\varphi} &= Q_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Узагальнену силу Q_1 по координаті r визначили, розглянувши можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом δr узагальненої координати r (рис. 2а).

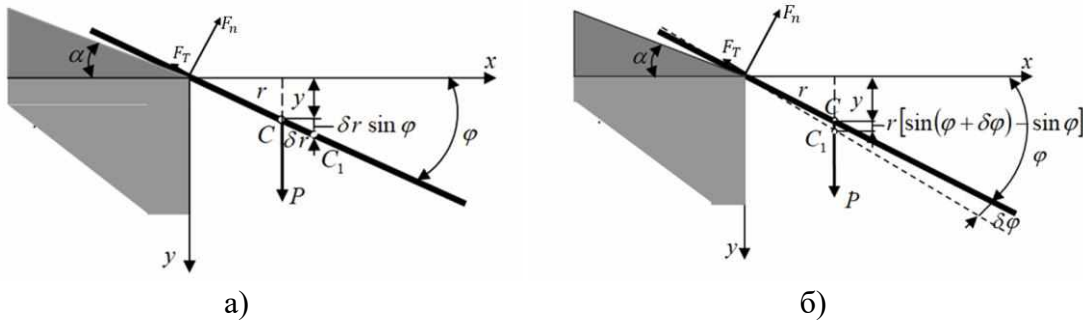


Рисунок 2 – Можливі переміщення системи, зумовлені приростом узагальнених координат:

а) узагальненої координати δr , б) узагальненої координати $\delta \varphi$

В початковий момент фази обертання нормальна реакція рампи F_n і сила тертя F_T мають максимальні значення, які визначаються за формулами:

$$F_n = mg \cos \alpha, \quad F_T = f mg \cos \alpha,$$

де g – прискорення вільного падіння, α – кут нахилу рампи, f – коефіцієнт тертя.

Поклавши силу тертя рівною половині від максимального її значення в початковий момент фази обертання $F_T = 0,5 f mg \cos \alpha$, з рівності роботи узагальненої сили Q_1 на можливому переміщенні δr сумі елементарних робіт всіх активних сил, прикладених до системи на цьому переміщенні, отримано:

$$\delta A = Q_1 \delta r = (mg \sin \varphi - f 0,5 mg \cos \alpha) \delta r.$$

Звідси

$$Q_1 = mg \sin \varphi - f 0,5 mg \cos \alpha.$$

Узагальнену силу Q_2 по координаті φ визначено, розглянувши можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом узагальненої координати $\delta \varphi$ (рис. 2б).

Робота узагальненої сили Q_2 на можливому переміщенні $\delta \varphi$ дорівнює сумі елементарних робіт всіх активних сил, прикладених до системи на цьому переміщенні:

$$\delta A = Q_2 \delta \varphi = mgr(\sin \varphi \cos \delta \varphi + \cos \varphi \sin \delta \varphi - \sin \varphi) \approx mgr \cos \varphi \delta \varphi,$$

оскільки $\cos \delta \varphi \approx 1$ і $\sin \delta \varphi \approx \delta \varphi$.

Звідси

$$Q_2 = mgr \cos \varphi.$$

Підставивши отримані вище вирази для узагальнених сил у рівняння Лагранжа, отримано наступну розв'язувальну систему диференціальних рівнянь другого порядку, яку приведено до нормальної форми Коші і розв'язано чисельно методом Рунге-Кутта.

$$\begin{aligned} \ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 &= g(\sin \varphi - 0,5f \cos \alpha); \\ 2r\dot{r}\dot{\varphi} + \left(\frac{L^2}{12} + r^2\right)\ddot{\varphi} &= gr \cos \varphi. \end{aligned} \quad (2)$$

Проведено розрахунки параметрів руху для стрижнів довжиною $L = 5, 10$ і 15 метрів при початкових швидкостях $6, 8$ і 10 метрів за секунду відповідно, кутах нахилу рампи $\alpha=35^\circ$ і $\alpha=25^\circ$ та значеннях коефіцієнту тертя рівних $0; 0,1$ і $0,2$.

Аналіз результатів розрахунків показав, що вплив тертя на параметри руху РШВП протягом фази обертання незначний і залежить від кута нахилу рампи. При зменшенні кута нахилу рампи вплив тертя на кут повороту стрижня і його кутову швидкість зростає, а на лінійну швидкість центру мас, навпаки, зменшується. При цьому, тертя в більшій мірі впливає на поступальний рух стрижня, ніж на його обертання.

Так, зростання часу скочування, кута нахилу стрижня, кутової швидкості та зменшення радіальної швидкості центру мас в усіх випадках при збільшенні коефіцієнту тертя від 0 до $0,2$ не перевищувало $2,75\%$, $1,16\%$, $3,34\%$ та $4,38\%$.

Таким чином, була підтверджена можливість використання запропонованого підходу для розрахунку параметрів руху РШВП при скиданні з судна з урахуванням усереднених значень сил тертя за допомогою чисельних експериментів.

Основні результати дослідження. Для врахування значення сили тертя між РШВП і рампою в кожний момент руху протягом фази обертання в даній роботі автори спиралися на рівняння Лагранжа другого роду (1). При цьому враховуючи, що кутове прискорення стрижня в кожний момент часу протягом фази обертання згідно основного рівняння динаміки тіла, що обертається відносно осі, визначається залежністю $\ddot{\varphi} = \frac{F_n r}{mL^2}$, то сила нормальної реакції рампи та сила тертя будуть обчислюватись за формулами $F_n = \frac{m \cdot L^2}{12} \cdot \ddot{\varphi} \cdot \frac{1}{r}$ і $F_T = f \cdot \frac{m \cdot L^2}{12} \cdot \ddot{\varphi} \cdot \frac{1}{r}$. Враховуючи останній вираз для сили тертя, в кожний момент часу протягом фази обертання отримуємо наступну систему розв'язувальних диференціальних рівнянь (3):

$$\begin{aligned} \ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 &= g \sin \varphi - f \cdot \frac{L^2}{12} \cdot \ddot{\varphi} \cdot \frac{1}{r} \\ 2r\dot{r}\dot{\varphi} + \left(\frac{L^2}{12} + r^2\right)\ddot{\varphi} &= gr \cos \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

Початкові умови:

$$r(0) = 0, \dot{r}(0) = V_0, \varphi(0) = \alpha, \dot{\varphi}(0) = 0. \quad (4)$$

Поклавши $z_1 = r$, $z_2 = \dot{r}$, $z_3 = \varphi$, $z_4 = \dot{\varphi}$, $a = L^2/12$, приводимо отриману систему диференціальних рівнянь до нормальної форми Коші:

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{dt} &= z_2, \quad \frac{dz_2}{dt} = z_1(z_4)^2 + g \sin z_3 - a \frac{f}{z_1} \cdot \frac{gz_1 \cos z_3 - 2z_1 z_2 z_4}{(z_1)^2 + a}, \\ \frac{dz_3}{dt} &= z_4, \quad \frac{dz_4}{dt} = \frac{gz_1 \cos z_3 - 2z_1 z_2 z_4}{(z_1)^2 + a}. \end{aligned} \quad (5)$$

Початкові умови мають вигляд

$$z_1(0) = 0, \quad z_2(0) = V_0, \quad z_3(0) = \alpha, \quad z_4(0) = 0. \quad (6)$$

Задачу Коші (5), (6) розв'язуємо за допомогою чисельного методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності при кроку в часі $\Delta t_n = 0.001$ с.

В табл.1 представлені результати розрахунків параметрів руху в кінці фази обертання для стрижнів довжиною $L = 5, 10$ і 15 метрів при початкових швидкостях $6, 8$ і 10 метрів за секунду відповідно, кути нахилу опорної поверхні $\alpha = 35^\circ$ і $\alpha = 25^\circ$ та значеннях коефіцієнту тертя, рівних 0 і $0,2$. В табл. 1 наведені також результати розрахунків при значенні коефіцієнту тертя $0,2$ при врахуванні середнього значення нормальної реакції рампи ($0,2^*$), отримані в роботі [15], та відносні різниці $\Delta\%$ цих результатів та результатів отриманих з урахуванням миттєвого значення сили тертя.

На рис. 3 представлені графіки зміни відносної нормальної реакції рампи при скочуванні стрижня довжиною п'ять метрів з початковою швидкістю 6 м/с при коефіцієнті тертя, рівному $0,2$ та кутах нахилу стрижня 35 і 25 градусів, а на рис. 4 – графіки зміни відповідних параметрів руху протягом фази обертання.

Як видно з рис. 3, графік відносної динамічної реакції при кути нахилу рампи 35° розташовується нижче відповідного графіка при кути нахилу рампи 25° . Це свідчить про збільшення сил тертя при зменшенні кута нахилу рампи, що призводить (див. рис. 4) до зменшення радіальної швидкості центру мас стрижня і збільшення часу скочування, кутової швидкості і кутового прискорення.

Таблиця 1 – Результати розрахунків параметрів руху стрижнів з урахуванням сил тертя

		f	$t, \text{с}$	φ°	$\dot{\varphi}, \text{с}^{-1}$	$\dot{r}, \text{м/с}$
$L=5 \text{ м}$ $\alpha = 35^\circ$	$V_0=6 \text{ м/с}$	0	0,356	39,38	0,396	8,112
		0,2	0,363	39,62	0,4066	7,908
		0,2*	0,364	39,61	0,407	7,809
		$\Delta\%$	-0,27	0,03	-0,1	1,25
$L=10 \text{ м}$ $\alpha = 35^\circ$	$V_0=8 \text{ м/с}$	0	0,526	39,73	0,291	11,13
		0,2	0,538	40,02	0,298	10,84
		0,2*	0,539	40,01	0,299	10,69
		$\Delta\%$	-0,19	0,02	-0,34	1,38
$L=15 \text{ м}$ $\alpha = 35^\circ$	$V_0=10 \text{ м/с}$	0	0,635	39,61	0,234	13,78
		0,2	0,649	39,87	0,2405	13,42
		0,2*	0,649	39,84	0,241	13,24
		$\Delta\%$	0,0	0,07	-0,21	1,34
$L=5 \text{ м}$ $\alpha = 25^\circ$	$V_0=6 \text{ м/с}$	0	0,368	30,21	0,460	7,677
		0,2	0,377	30,57	0,475	7,44
		0,2*	0,377	30,50	0,474	7,357
		$\Delta\%$	0,0	0,23	0,21	1,12
$L=10 \text{ м}$ $\alpha = 25^\circ$	$V_0=8 \text{ м/с}$	0	0,545	30,69	0,3383	10,5
		0,2	0,56	31,09	0,3496	10,16
		0,2*	0,56	31,05	0,3496	10,04
		0,2	0,0	0,13	0,0	1,18
$L=15 \text{ м}$ $\alpha = 25^\circ$	$V_0=10 \text{ м/с}$	0	0,657	30,53	0,2726	13,01
		0,2	0,675	30,904	0,2814	12,59
		0,2*	0,674	30,85	0,2814	12,44
		$\Delta\%$	0,15	0,17	0,0	1,19

*Дані роботи [15]

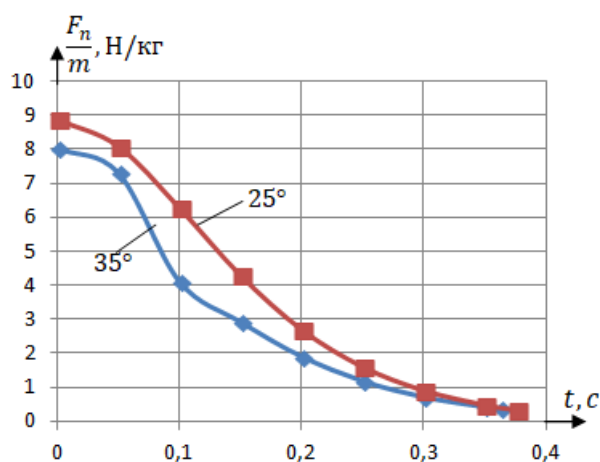
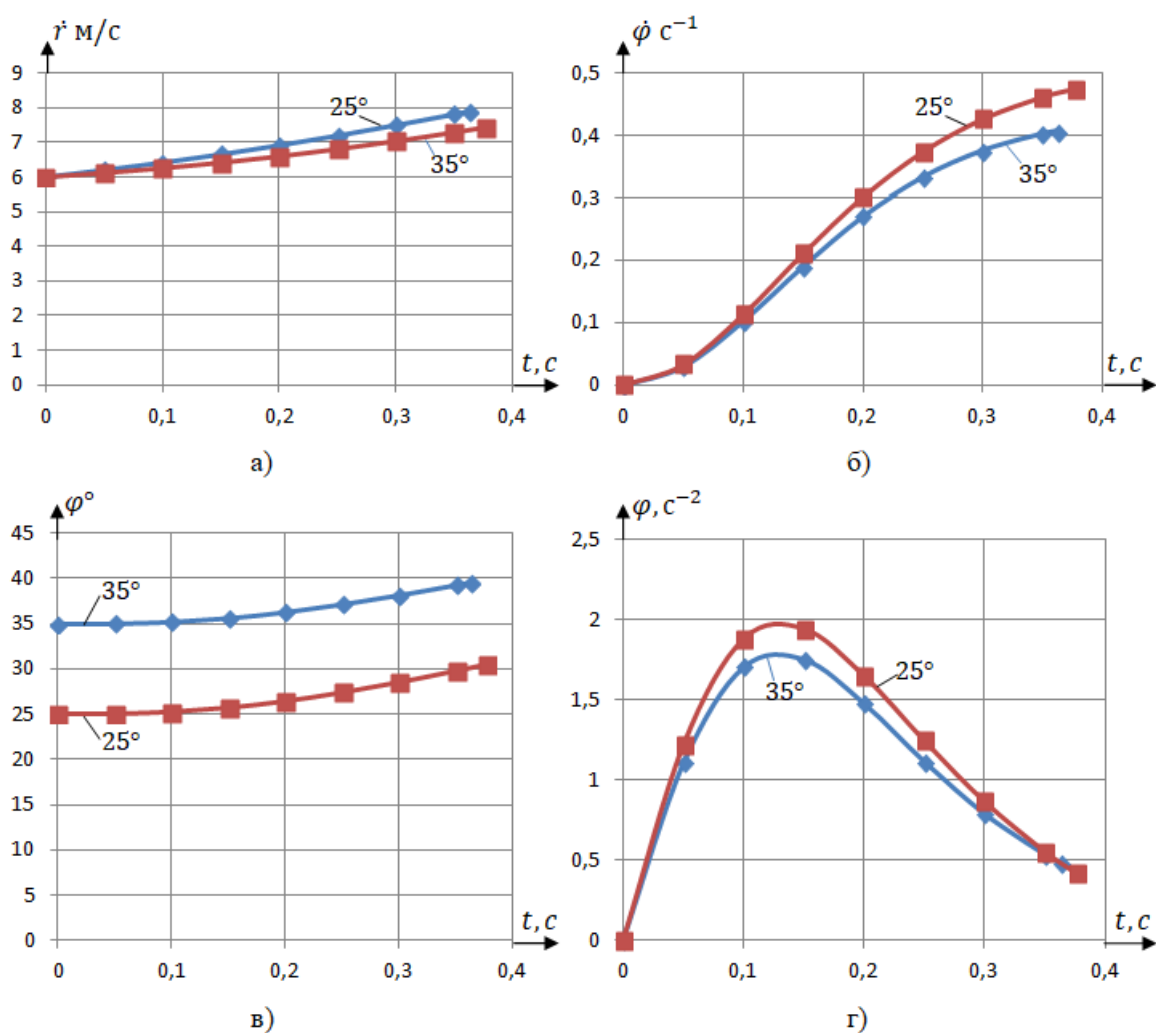


Рисунок 3 – Графіки зміни відносної нормальної реакції рампи протягом фази обертання

Рисунок 4 – Графіки зміни параметрів руху стрижня протягом фази обертання:
а) радіальна швидкість, б) кутова швидкість, в) кут нахилу, кутове прискорення

З представлених в табл.1 даних видно, що результати, отримані при врахуванні миттєвих значень сили тертя, мало відрізняються від результатів, отриманих при врахуванні усередненого значення цих сил, що підтверджує правильність аналізу характеру зміни сили тертя протягом фази

обертання [14]. При цьому характер зміни параметрів руху стрижня при миттєвих і усереднених значеннях сили тертя залежить від кута нахилу рампи α та довжини і швидкості стрижня.

Так, при $\alpha = 35^\circ$ час t фази обертання, обчислений при врахуванні миттєвого значення сили тертя, зменшується або залишається незмінним в порівнянні з часом, обчисленим при усередненій силі тертя ($\Delta\% = -0,27 \dots 0,00$), кутова швидкість в кінці фази обертання також зменшується ($\Delta\% = -0,10 \dots -0,21$), а кут повороту, навпаки, зростає ($\Delta\% = 0,03 \dots 0,07$) так само, як і радіальна швидкість ($\Delta\% = 1,25 \dots 1,38$).

При $\alpha = 25^\circ$ час t фази обертання, обчислений при врахуванні миттєвого значення сили тертя, залишається незмінним або зростає в порівнянні з часом, обчисленим при усередненій силі тертя ($\Delta\% = 0,00 \dots 0,15$), кутова швидкість в кінці фази обертання зростає або залишається без зміни ($\Delta\% = 0,21 \dots 0,00$), кут повороту також зростає ($\Delta\% = 0,13 \dots 0,23$) так само, як і радіальна швидкість ($\Delta\% = 1,12 \dots 1,19$).

Таким чином, використання при розрахунках миттєвих значень сили тертя в порівнянні з усередненим її значенням в найбільшій мірі впливає на величину радіальної швидкості центру мас стрижня.

Висновки. Запропонована методика дозволяє за допомогою чисельних експериментів проводити дослідження руху рятувальної шлюпки вільного падіння протягом фази обертання при сходженні з похилої рампи з урахуванням миттєвих значень сили тертя, початкової швидкості, довжини шлюпки та кута нахилу рампи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tasaki, R., Ogawa Atsushi, Tsukino, Y. Numerical Simulation and its Application on the Falling Motion of Freefall Lifeboats. *Journal of The Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 167, pp. 147-158, 1990.
2. Arai, M., Khondoker, M. R. H., Inoue, Y. Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat First Report : Analysis of Motion and Acceleration. *Journal of The Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 178, pp. 193-201, 1995.
3. Бугаенко, Б. А. Принципы проектирования и особенности конструирования судовых устройств и судовой техники морских технологий [Текст] / Б. А. Бугаенко, А. Ф. Галь. – Николаев : УГМТУ, 1995. – Ч. 2. – С. 86–101.
4. Reaz, M., and Khondoker, H., 1998, "Effects of Launching Parameters on the Performance of a Free-Fall Lifeboat," *Nav. Eng. J.*, 110(4), pp. 67–73.
5. Karim, M., Iqbal, K. S., Khondoker, M. R. H., & Rahman, S. M. H. (2011). Influence of falling height on the behavior of skid-launching free-fall lifeboat in regular waves. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4(1), pp. 77–88.
6. 616 Evaluation of Free-fall Lifeboats launch performance. Netherlands Regulatory Framework (NE RF) – Maritime. Retrieved from https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_1746_14/1/
7. Микитюк, В. Е. Расчет параметров движения шлюпки свободного падения при аварийном сбросе [Текст] / В. Е. Микитюк, Д. А. Миронов // Матер. конф. "Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов". – Николаев: НУК, 2007. – С. 99–100.
8. В.Е.Микитюк, Д.А.Миронов. Параметры движения шлюпки свободного падения перед приводнением / Матеріали І Міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» Миколаїв: - НУК, 2010. – С. 84-89.
9. Goralik J.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. Investigation of the rotation phase of a free-fall lifeboat movement. *International periodic scientific journal "Modern engineering and innovative technologies"*. Issue 12/Part2., pp. 65-76, 2020.
10. Є.Т. Горалік, М.М. Крюков. Математическое моделирование фазы вращения движения твердого тела при сходжении с наклонной рампы. *Прикладні питання математичного моделювання*. Т.3, № 2.2., 2020. С. 113-122.
11. Горалік Є.Т., Крюков М. М., Лупіна Т. О. Рівняння фази обертання руху тіла, що скочується з похилої плоскої опори, в декартових і узагальнених координатах. Матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф.

- «Математика в сучасному технічному університеті», Київ, 28–29 грудня 2020 р. — Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю. В., 2021. С 53-56.
12. Є.Т. Горалік, М.М. Крюков, Т.О. Лупіна. Рух рятувальної шлюпки вільного падіння при сходженні з похилої рампі. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. — К.: ДУІТ, 2021. — Випуск 2(33). — С.23-35.
 13. Є.Т. Горалік, М.М. Крюков, Т.О. Лупіна. Оцінка впливу зміщення центру мас рятувальної шлюпки вільного падіння відносно опорної поверхні на її рух при скиданні з судна. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. — К.: ДУІТ, 2022. — Випуск 2(33). — С.165-176.
 14. Теоретична механіка: підручник для студентів ВНТЗ/ кол. авторів за заг. ред. І.В. Кузьо. Харків: Фоліо, 2017. 780 с.
 15. Є.Т. Горалік, М.М. Крюков, Т.О. Лупіна. Вплив сил тертя на сходження рятувальної шлюпки вільного падіння з похилої рампі. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. — К.: ДУІТ, 2024. — Випуск 2 (40). — С.127-137.

REFERENCES

1. Tasaki, R., Ogawa Atsushi, Tsukino, Y.(1990) Numerical Simulation and its Application on the Falling Motion of Freefall Lifeboats. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 167, 1147-158. [in Japanese].
2. Arai,M., Khondoker, M. R. H., Inoue, Y. (1995). Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat First Report : Analysis of Motion and Acceleration. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 178, 193-201. [in English].
3. Bugayenko, B. A. (1995) “Printsipy proyektirovaniya i osobennosti konstruirovaniya sudovykh ustroystv i sudovoy tekhniki morskikh tekhnologiy” [Design principles and design features of ship devices and marine equipment of marine technology] [Tekst] / B. A. Bugayenko, A. F. Gal. Nikolayev : UGMTU, CH. 2, 86–101. [in Russian].
4. Reaz, M., and Khondoker, H.(1998). Effects of Launching Parameters on the Performance of a Free-Fall Lifeboat, Nav. Eng.J., Vol. 110(4), 67–73. [in English].
5. Karim, M. M., Iqbal, K. S., Khondoker, M. R. H., Rahman, S. M. H.(2011) Influence of Falling Height on the Behavior of Skid-Launching Free-Fall Lifeboat in Regular Waves. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 4, No. 1, 77-88. [in English].
6. Netherlands Regulatory Framework (NE RF) – Maritime. 616 Evaluation of Free-fall Lifeboats launch performance. Geldigheid: 22-06-1993 t/m. Status: Geldig vandaag. Retrieved from https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_1746_14/1/
7. Mykytyuk, V.E. (2007) “*Raschet parametrov dvyzheniya shliupky svobodnoho padeniya pry avaryinom sbrose*” [Tekst] [Calculation of the parameters of a free-fall boat during an emergency drop] / V. E. Mykytiuk, D. A. Myronov // Mater. konf. "Bezopasnost moreplavaniya y ee obespechenye pry proektyrovaniy y postroike sudov". – Nykolaev : NUK, 99–100. [in Russian].
8. V.E.Mykytyuk, D.A.Myronov. (2010) “*Parametry dvyzheniya shlyupky svobodnoho padeniya pered pryvodnemyem*” [Parameters of free fall boat motion before flooding] / Materialy I Mizhnar. nauk.-tekh. konf. «Innovatsiyi v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi» Mykolayiv: - NUK, 84-89. [in Russian].
9. Goralik J.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. (2020) Investigation of the rotation phase of a free-fall lifeboat movement. International periodic scientific journal "Modern engineering and innovative technologies". Issue 12/Part2., 65-76. [in Ukrainian].
10. Horalik Ye.T., Kriukov M.M. (2020) “*Matematycheskoe modelyrovanye fazy vrashcheniya dvyzheniya tverdoho tela pry skhozhdenniy s naklonnoi rampy*” [Mathematical modeling of the rotation phase of a solid body movement when descending from the inclined ramp]. Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia. Vol.3, No 2.2., 113-122. [in Russian].
11. Goralik Ye.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. (2021) “*Rivniannia fazy obertannia rukhu tila, shcho skochuietsia z pokhyloi ploskoi opory, v dekartovykh i uzahalnenykh koordynatakh*”. [Equation of the phase of rotation of the motion of a body rolling from an inclined flat support in Cartesian and generalized

- coordinates] *Materialy IX Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Matematyka v suchasnomu tekhnichnomu universyteti»* [Proceedings of Ninth International Scientific-Practical Conference “Mathematics in Modern Technical University”], Kyiv, 28–29 hrudnia 2020 r. — Vinnytsia: Vydavets FOP Kushnir Yu. V., 53-56. [in Ukrainian].
12. Goralik Ye.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. “*Rukh riatsuvalnoi shliupky vilnoho padinnia pry skhodzhenni z pokhyloi rampy*” [The movement of the freefall lifeboat when descending from the inclined ramp], *Vodnyi transport* [Water transport], *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii*. – K.: DUIT, 2021. – Vypusk 2(33), 23-35. [in Ukrainian].
 13. Goralik Ye.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. “*Otsinka vplyvu zmishchennia tsentru mas riatsuvalnoi shliupky vilnoho padinnia vidnosno opornoj poverkhni na yii rukh pry skydanni z sudna*” [Assessment of the impact of the displacement of the center of mass of the free-fall lifeboat relative to the support surface on its motion when dropping from the ship], *Vodnyi transport* [Water transport], *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii*. – K.: DUIT, 2022. – Vypusk 2(33), 165-176. [in Ukrainian].
 14. *Teoretychna mekhanika. Pidruchnyk* [Theoretical mechanics: textbook] (2017) / Count.authors per zag. Ed. I.V.Kuzio. – Kharkiv: Folio, 780 s. [in Ukrainian].
 15. Goralik Ye.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. “*Vplyv syl tertia na skhodzhennia riatsuvalnoi shliupky vilnoho padinnia z pokhyloi rampy*” [Effect of frictional forces on freefall lifeboat descent from inclined ramp], *Vodnyi transport* [Water transport], *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii*. – K.: DUIT, 2024. – Vypusk 2 (40), 127-137. [in Ukrainian].

Goralik J.T., Kryukov N.N., Lupina T.O.

STUDY OF THE FREE FALL LIFEBOATS MOVEMENT DURING THE ROTATION PHASE, TAKING INTO ACCOUNT INSTANTANEOUS VALUES OF FRICTIONAL FORCES

The article provides a brief overview of the free fall lifeboats movement studies during discharge from the vessel, in particular, the calculated studies of the lifeboats movement during the rotation phase, taking into account some structural and operational factors, which were performed using differential equations in generalized (polar) coordinates obtained using Lagrange equations of the second kind.

The method and results of studying the free fall lifeboats movement, which are simulated by a homogeneous rod, when descending from an inclined ramp, during the rotation phase, taking into account the average values of frictional forces, are considered.

Formulas for the normal reaction of the ramp and the frictional force at each moment of movement during the rotation phase are obtained, using which a solution system of two ordinary nonlinear differential equations of the second order is proposed.

The proposed approach was tested on the case of modeling a boat like a homogeneous rod of length L . A corresponding solution system of four ordinary nonlinear differential equations of the first order in the form of Cauchy in generalized coordinates r i φ was obtained, for which the Cauchy problem was formulated, which was solved numerically by the Runge-Kutt method of the fourth order of accuracy at the values of the ramp angle of inclination $\alpha=35^\circ$ and $\alpha=25^\circ$ for rods of length 5, 10 and 15 m at initial speeds of 6, 8 and 10 m/s, respectively.

The obtained results of calculations of the relative normal reaction of the ramp, the duration of the rotation phase, the angle of inclination, the radial and angular velocities are compared with the corresponding calculation results at the average values of the frictional force. It has been established that the results obtained taking into account the instantaneous values of the frictional force differ little from the results obtained when taking into account their average value. At the same time, the nature of the change in the parameters of the rod movement depends on the angle of inclination of the ramp α , and the length and speed of the rod at the beginning of the rotation phase.

Key words: free-fall lifeboat, inclined ramp, frictional force, Lagrange equations of the second kind, ordinary differential equations, Cauchy problem, numerical modeling, Runge-Kutt method.

Клочков Ю.П.

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ВЕЛИКОТОННАЖНИМИ СУДНАМИ ПРИ ПРОХОДІ СУЕЦЬКОГО КАНАЛУ

У статті розглянуто особливості управління великотоннажними суднами під час проходження Суецького каналу, одного з найважливіших морських шляхів, що з'єднує Середземне та Червоне моря. Проаналізовано технічні, навігаційні та природні виклики, з якими стикаються судноводії, зокрема обмежений простір для маневрування, вплив мілководдя, ефекти гідродинамічної взаємодії, висока парусність контейнеровозів, інтенсивний рух суден, а також несприятливі погодні умови, такі як сильний вітер, густий туман і піщані бурі. Особливу увагу приділено впливу конструктивних характеристик сучасних великотоннажних суден класу *Ultra Large Container Ships (ULCS)* на керованість в умовах вузьких каналів. Наголошено, що розміри таких суден значно перевищують граничні параметри каналу, що створює додаткові ризики, особливо під час зустрічного руху суден. У статті запропоновано низку рекомендацій для підвищення безпеки навігації. Зокрема, підкреслено необхідність перегляду існуючих правил плавання Суецьким каналом, з чітким розподілом відповідальності між капітаном і лоцманом та впровадженнім протоколів дій у надзвичайних ситуаціях. Запропоновано оптимізувати швидкісний режим руху суден, що дозволить зменшити гідродинамічні ризики, та застосовувати буксири для підтримки курсу, особливо у складних погодних умовах. Запропоновано впровадження спеціалізованих математичних моделей для розрахунку оптимальних траєкторій руху з урахуванням усіх ключових факторів: вітрових навантажень, осадки судна, метеорологічних умов та гідродинамічних ефектів. Реалізація цих заходів дозволить мінімізувати ризики аварій, підвищити ефективність судноплавства, забезпечити стабільне функціонування Суецького каналу та зберегти його стратегічне значення у глобальній транспортній системі.

Ключові слова: Суецький канал, судно, судноводії, великотоннажні судна, навігація, управління судном, безпека, судноводіння, маневрування, погодні умови.

Постановка проблеми. Суецький канал є однією з найважливіших судноплавних артерій світу, яка сполучає Середземне та Червоне моря, скорочуючи час доставки вантажів між Європою та Азією. Його загальна довжина становить 193,3 км, а ширина змінюється від 205 до 225 метрів на поверхні води та близько 121 метрів по дну каналу. Глибина каналу становить у середньому 24 метри, що дозволяє пропускати судна з максимальною осадкою до 20 метрів. Однак ці параметри є граничними, і будь-яке відхилення може створити загрозу для безпеки судноплавства. Сучасні великотоннажні судна, такі як контейнеровози класу *Ultra Large Container Ships (ULCS)*, можуть досягати довжини понад 400 метрів, ширини 60 метрів та висоти надводного борту близько 30 метрів. Водотоннажність таких суден перевищує 200 тисяч тонн. Їхні величезні розміри роблять процес маневрування надзвичайно складним, особливо в обмежених умовах Суецького каналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика управління суднами у складних навігаційних умовах отримала значну увагу серед науковців і практиків. Дослідження Драчова В.М. та Мальцева А.С. висвітлюють маневрені характеристики великотоннажних суден у вузьких каналах, тоді як Сизов В.Г. вивчав теоретичні аспекти впливу мілководдя на керованість суден. Роботи також підкреслюють значення точного прогнозування траєкторії руху судна, враховуючи особливості його конструкції та погодні умови. Разом з тим, необхідність розробки практичних рекомендацій для проходження Суецького каналу залишається актуальною.

Виклад основного матеріалу. Проходження Суецького каналу є надзвичайно складним завданням через низку факторів. Одним із головних є обмежений простір для маневрування. Ширина каналу у вузьких ділянках сягає лише 205-225 метрів, тоді як довжина сучасних контейнеровозів може перевищувати 400 метрів, а ширина, подекуди, сягає 60 метрів. Слід

зазначити, що з 60 – 95 кілометр каналу, дозволяється двохсторонній рух суден [1]. Наприклад, якщо будуть розминатись два судна шириною 50 метрів розминатимуться в каналі, то вільна відстань в каналі буде трохи більше 100 метрів. І це лише на поверхні води, а по дну каналу може бути набагато меншою (хоча б через те, що стінки каналу можуть зсуватися). Це означає, що навіть незначна помилка у розрахунках може призвести до серйозних наслідків, таких як пошкодження судна або блокування каналу. Показова подія сталася 29 вересня 2014 року, коли 324-метрове судно Colombo Express втратило керування та врізалось в борт схожого за розмірами судна Maersk Tanjong під час проходження Суецького каналу. Причина зіткнення офіційно не була розголошена. Однак повтор зіткнення за допомогою AIS показує, що Colombo Express намагався обігнати Maersk Tanjong, коли втратив керування. Це призвело до припущень, що причиною могла стати так званий ефект відбитої хвилі, коли асиметричний потік навколо судна, викликаний близькістю до берегів, спричиняє різницю тиску (принцип Бернуллі) між лівим і правим бортами [2]. У результаті на судно діє бічна сила, спрямована переважно до найближчого берега, а також момент, який зміщує ніс судна до центру водного шляху. Більш того, великотоннажні судна при русі з високою швидкістю набувають накопичений момент інерції, який при поворотах великих суден контейнеровозів, особливо різких, змушує вектор дії сили відхилятися від курсу судна до 30-40°, що викликає дрейф судна в протилежний бік повороту [3]. Саме це могло статись з судном Colombo Express. Спочатку воно прижалося до берега каналу, і коли судноводії вирішили різко повернути судно ближче до осі каналу, при перекладці керма в бік осі каналу, судно ще більше відхилилось до берегу через накопичений момент інерції, а потім в дію вступила гідродинамічна взаємодія з берегом, і відбита хвиля різко відштовхнула ніс судна в сторону осі каналу (рисунок 1), що й привело до зіткнення із судном Maersk Tanjong.



Рисунок 1 – Ситуація за декілька секунд до зіткнення суден Colombo Express та Maersk Tanjong

Контейнеровози ще й характеризуються високою парусністю як у завантаженому, так і в баластному стані, що є типовою особливістю цього типу суден. У завантаженому стані їх парусність збільшується через велику кількість контейнерів на палубі, тоді як у баласті – через значну площу надводного борту, високу надбудову та малу осадку. Зменшення підводного об'єму судна призводить до зниження опору води, що робить його більш вразливим до впливу вітру. На низькій швидкості, коли потік води, що потрапляє на перо керма, створює недостатній тиск, момент бокової сили руля часто не може компенсувати момент від дії вітру. У таких умовах навіть слабкий вітер може значно ускладнити керування судном. Сильний бічний вітер, характерний для регіону, може швидко вивести судно з рівноваги. Наприклад, пориви вітру можуть викликати бічний дрейф, що

призводить до відхилення від курсу та необхідності корекції. Саме так сталося з сумнозвісним контейнеровозом Ever Given у 23 березня 2021 року. Сильний вітер буквально за лічені хвилини поставив гігантське судно поперек каналу [4].

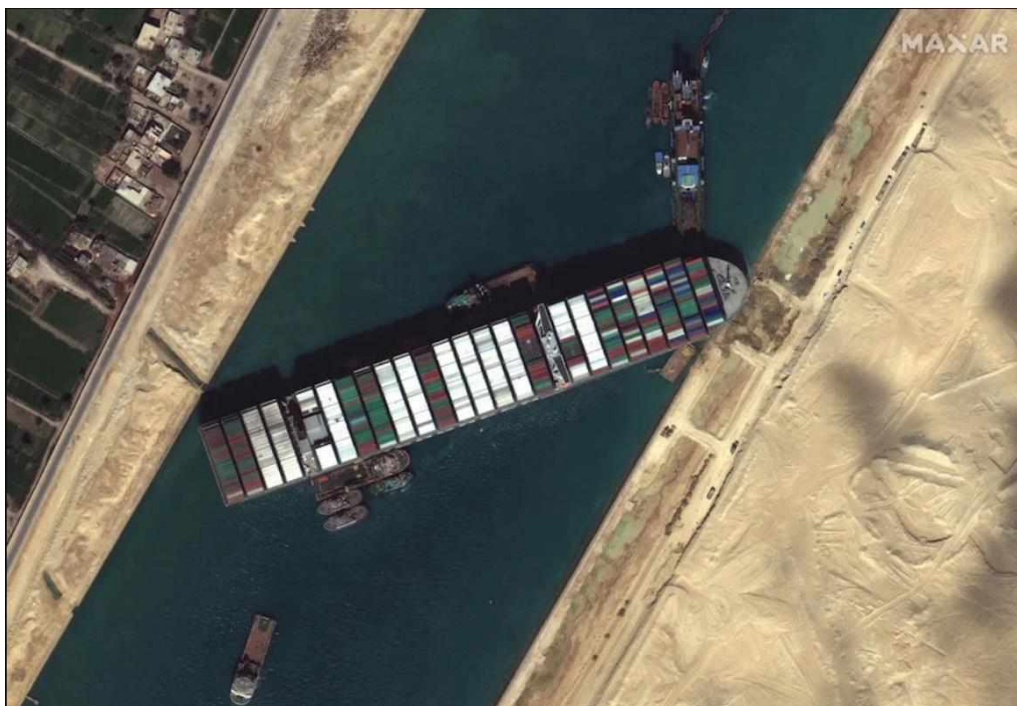


Рисунок 2 – Судно Ever Given, яке заблокувало Суецький канал

У зимовий період густий туман і часті дощі додатково ускладнюють ситуацію, обмежуючи видимість та ускладнюючи оцінку відстаней до інших суден чи берегів. Піщані бурі, характерні для літнього періоду, можуть раптово виникати, роблячи навігацію майже неможливою [5].

Крім того, мілководдя викликає гідродинамічне осідання судна, збільшуючи ризик контакту з дном. До цього додається ефект "берегового присмоктування", який може зміщувати судно з запланованого курсу. Механізм дії цього ефекту полягає в тому, що зменшення глибини води під кілем викликає зниження тиску води, що утримує судно, створюючи додаткову силу, яка зміщує його до берега.

Вплив течій також є важливим фактором. Суецький канал не має природного припливно-відпливного режиму, однак потоки води в ньому створюються через рух суден, природний нахил та сизигійні приливи в Середземному морі, які іноді спричиняють сильні течії в каналі в напрямку Червоного моря, які іноді сягають двох вузлів. Ці течії можуть змінювати напрямок і швидкість, що вимагає від екіпажу постійного моніторингу і швидкої реакції. Збільшення швидкості течії в вузьких ділянках каналу може викликати нестабільність курсу судна, що ще більше ускладнює маневрування [6].

Інтенсивний трафік у каналі, де щоденно проходить до 50 суден, створює додаткові виклики. Необхідність дотримання чіткого графіку руху обмежує можливості для маневрування, а будь-яка затримка може спричинити затори [7].

Для вирішення цих проблем рекомендується впровадження комплексу заходів для підвищення безпеки навігації. Одним із ключових рішень є використання сучасних електронних картографічних систем (ECDIS), які забезпечують високу точність прогнозування траєкторії руху. Такі системи дозволяють екіпажу в режимі реального часу оцінювати параметри руху судна, включаючи швидкість і гідродинамічні характеристики. Застосування ECDIS також допомагає враховувати погодні умови, що особливо важливо під час піщаних бур чи дощів.

Не менш важливим є редагування та оновлення всіх документів та інструкцій, пов'язаних з транзитом суден через канал. Необхідність внесення змін до правил плавання Суецьким каналом є вкрай важливою, щоб забезпечити чіткий розподіл відповідальності за безпеку судноплавства [8]. Сьогоднішні інструкції створюють правову невизначеність: лоцман бере на себе управління судном під час проходження каналу, але вся відповідальність за безпеку залишається за капітаном. Такий підхід може призводити до конфліктів у прийнятті рішень та створювати ризики у критичних ситуаціях. Чітке визначення ролей і обов'язків дозволило б уникнути двозначностей. Додатково, важливо передбачити чіткі протоколи дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій. Впровадження таких змін дозволить мінімізувати аварійні ризики та покращити безпеку судноплавства у цьому стратегічно важливому регіоні.

Оптимізація швидкісного режиму є ще одним важливим аспектом. Підтримання швидкості в межах 7-8 вузлів дозволить зменшити гідродинамічне осідання і забезпечити стабільність руху судна. Водночас залучення буксирів для корекції курсу, особливо у вітряних умовах, може суттєво знизити ризик зіткнень або осадження на міліну. Використання буксирів також може бути корисним у разі раптових змін погодних умов, коли судно потребує додаткової підтримки для утримання курсу.

Також, розробка спеціалізованих математичних моделей для розрахунку оптимальної траєкторії руху судна може значно спростити процес планування. Такі моделі враховують усі ключові фактори, включаючи вітрильність, осадку, гідродинамічні сили та метеорологічні умови. Завдяки цьому екіпаж матиме змогу більш точно прогнозувати поведінку судна в складних умовах. Крім того, автоматизація процесів дозволяє мінімізувати людський фактор, що є одним із ключових чинників аварій.

Висновки. Суецький канал є однією з найважливіших судноплавних артерій світу, проте експлуатація цього водного шляху сучасними великотоннажними суднами стикається з численними викликами. Обмежений простір для маневрування, вплив сильного вітру та течій, а також інтенсивний трафік створюють значні ризики для безпеки судноплавства. Приклади інцидентів, таких як зіткнення судна Colombo Express з Maersk Tanjong чи блокування каналу судном Ever Given, підкреслюють актуальність проблеми.

Для забезпечення безпеки необхідно оновити правила та протоколи навігації, зокрема чітко розподілити відповідальність між капітаном і лоцманом та передбачити протоколи дій у надзвичайних ситуаціях. Важливим є впровадження сучасних електронних систем, які дозволяють точно прогнозувати траєкторії руху суден і враховувати складні умови. Зменшення швидкості в критичних зонах каналу, а також залучення буксирів для підтримки курсу значно знизять ризики аварій. Додатково слід розробити математичні моделі для прогнозування поведінки суден в обмеженому просторі, що допоможе екіпажу краще підготуватися до можливих труднощів. Реалізація цих заходів сприятиме мінімізації ризиків, підвищенню ефективності судноплавства та забезпеченню стабільного функціонування Суецького каналу як ключового елементу світової транспортної системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Suez Canal Authority, Canal Characteristics, 2019, Ismailia, Egypt
2. Gary Peters, Sea collisions: investigation through simulation, [електронний ресурс]. – режим доступу до ресурсу: <https://www.ship-technology.com/author/gary-peterspmgoperations-com/>
3. Sergiienko V. V. In the emergency trap. Morvesti №12-2020. [електронний ресурс]. – режим доступу до ресурсу: <http://www.morvesti.com>.
4. United Arab Insurance Federation, «Insurance Report on Ever Given grounding in Suez Canal» //, 2021, с. 2-7.
5. United Kingdom Hydrographic Office, Mediterranean Pilot Vol. V (NP 49), p 220;
6. Сизов В.Г. Теория корабля [текст]: учебн. пособие / В.Г. Сизов. –Одесса: Феникс, 2003. – 92 с.

7. UN Trade and Development (UNCTAD), Suez and Panama Canal disruptions threaten global trade and development, 2024, [електронний ресурс].– режим доступу до ресурсу: <https://unctad.org/news/suez-and-panama-canal-disruptions-threaten-global-trade-and-development>;
8. Suez Canal Authority, Rules of Navigation//, 2020, p. 5.

REFERENCES

1. Suez Canal Authority, Canal Characteristics // 2019, Ismailia, Egypt
2. Gary Peters, Sea collisions: investigation through simulation, [electronic resource].– Access: <https://www.ship-technology.com/author/gary-peterspmgoperations-com/>
3. Sergiienko V. V. In the emergency trap. Morvesti №12-2020. [electronic resource].– Access: <http://www.morvesti.com>.
4. United Arab Insurance Federation, «Insurance Report on Ever Given grounding in Suez Canal» //, 2021, с. 2-7.
5. United Kingdom Hydrographic Office, Mediterranean Pilot Vol. V (NP 49), p 220;
6. Сизов В.Г. Теория корабля [текст]: учебн. пособие / В.Г. Сизов. –Одесса: Феникс, 2003. – 92 с.
7. UN Trade and Development (UNCTAD), Suez and Panama Canal disruptions threaten global trade and development, 2024, [electronic resource].– Access: <https://unctad.org/news/suez-and-panama-canal-disruptions-threaten-global-trade-and-development>;
8. Suez Canal Authority, Rules of Navigation//, 2020, Ismailia, Egypt, p. 5.

Klochkov. Y.P.

FEATURES OF CONTROL OF THE LARGE TONNAGE SHIPS WHILE NAVIGATING THE SUEZ CANAL

This article examines the features of control of the large-tonnage vessels while navigating the Suez Canal, one of the most critical maritime routes connecting the Mediterranean and Red Seas. It analyses technical, navigational, and environmental challenges faced by mariners, including limited manoeuvring space, shallow water effects, hydrodynamic interaction phenomena, high windage area of container ships, intensive vessel traffic, and adverse weather conditions such as strong winds, dense fog, and sandstorms. Special attention is given to the impact of the structural characteristics of modern Ultra Large Container Ships (ULCS) on manoeuvrability in narrow channels. It is emphasized that the dimensions of these vessels significantly exceed the canal's limiting parameters, creating additional risks, especially during two-way vessel traffic. The article proposes several recommendations for improving navigation safety. In particular, it highlights the need to revise existing navigation rules for the Suez Canal, with a clear distribution of responsibility between captains and pilots, and the introduction of emergency response protocols. It also suggests optimizing vessel speed to reduce hydrodynamic risks and employing tugs to assist in course maintenance, particularly in adverse weather conditions. The article recommends the development of specialized mathematical models to calculate optimal vessel trajectories, considering key factors such as wind loads, vessel draft, meteorological conditions, and hydrodynamic effects. The implementation of these measures will minimize accident risks, enhance navigation efficiency, ensure the stable operation of the Suez Canal, and maintain its strategic importance in the global transportation system.

Keywords: Suez Canal, vessel, mariner, large-tonnage vessels, navigation, ship management, safety, shiphandling, manoeuvring, weather conditions.

Дубинець О.І., Маранов О.В.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН МЕТОДОМ ДИНАМІЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ СТОХАСТИЧНИХ ФАКТОРІВ НАВІГАЦІЙНОЇ ОБСТАНОВКИ

У статті запропоновано новий підхід до оптимізації процесу запобігання зіткнення суден із застосуванням методу динамічного програмування, який враховує стохастичний характер навігаційної ситуації. Розроблено математичну модель процесу дивергенції, яка включає випадкові фактори середовища. Запропоновано алгоритм прийняття рішень на основі принципу оптимальності Беллмана. Запропоновано способи імітаційного моделювання, щоб підтвердити ефективність зазначеного методу для подальших досліджень. Розроблений спосіб потенційно забезпечує підвищення безпеки судноплавства в складних умовах при мінімізації витрат на контроль. Метою роботи є розробка концептуальної моделі для оптимізації розходження суден із використанням методу динамічного програмування та аналіз впливу стохастичних факторів на ефективність цього процесу. Результати цього дослідження демонструють перспективність використання методу динамічного програмування для оптимізації процесу розходження суден в умовах стохастичних факторів навігаційного середовища.

Ключові слова: безпека судноплавства, безпека судноводіння, стиснені води, запобігання зіткнення суден, динамічне програмування, стохастичні фактори, оптимізація, прийняття рішень, морський транспорт.

Вступ. Оптимізація процесу розходження суден є однією з ключових задач сучасної морської навігації, особливо в умовах високої інтенсивності руху в портових акваторіях та вузьких проходах. Зростаючі вимоги до безпеки мореплавства, а також необхідність підвищення енергоефективності та зменшення ризиків навігаційних аварій, потребують впровадження сучасних математичних методів для підтримки рішень.

Метод динамічного програмування, заснований на формулі Беллмана, дозволяє будувати ефективні траєкторії руху суден, враховуючи стохастичні фактори навігаційного середовища. Цей підхід дає можливість адаптивно реагувати на змінні умови, зокрема погодні явища, взаємодію з іншими суднами та технічні особливості конкретного судна.

Метою роботи є розробка концептуальної моделі для оптимізації розходження суден із використанням методу динамічного програмування та аналіз впливу стохастичних факторів на ефективність цього процесу.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить про значний інтерес до методів динамічного програмування в задачах морської навігації [1-3]. Зокрема, дослідження [4] демонструють ефективність методу Беллмана у плануванні безпечних траєкторій суден. Однак більшість досліджень зосереджені на детермінованих моделях, що обмежує їхню практичну застосовність у реальних умовах із високим ступенем невизначеності.

Роботи [5] та [6] акцентують увагу на необхідності врахування стохастичних факторів, таких як вітрові та течієві умови, для точнішого прогнозування навігаційної обстановки. Незважаючи на ці успіхи, залишається невирішеною проблема інтеграції стохастичних підходів із динамічним програмуванням у морській навігації [8-10].

Методологія. Основні етапи моделювання:

1. Формулювання задачі. Розглядається оптимізація траєкторії судна в координатах x, y, t за умови мінімізації функціоналу витрат:

$$J = \int_{t_0}^{t_n} (C(x, y, t) + P(x, y, t)) dt \quad (1)$$

де J — загальний функціонал витрат, який необхідно мінімізувати,

t_0, t_n — початковий і кінцевий моменти часу, відповідно;

$C(x, y, t)$ — функція витрат на рух судна залежно від просторових координат (x, y) і часу (t) . Наприклад, це може бути витрати пального або енергії;

$P(x, y, t)$ — ймовірність виникнення небезпечної ситуації (наприклад, зіткнення або виходу за межі безпечної зони) у заданій точці (x, y) у момент часу t .

2. Формула Беллмана. Для оптимізації використовується рекурентне рівняння Беллмана:

$$V(x, y, t) = \min_u [C(x, y, t) + E[V(x', y', t + 1)]] \quad (2)$$

де $V(x, y, t)$ — мінімальна вартість проходження з поточного стану (x, y, t) до кінцевого стану;

u — керування (наприклад, напрямок чи швидкість руху судна), яке вибирається для мінімізації витрат;

$E[V(x', y', t+1)]$ — математичне очікування значення функції вартості V у наступному стані $(x', y', t+1)$. Це дозволяє враховувати стохастичні фактори.

3. Стохастичні фактори. Модель включає випадкові впливи, такі як зміни швидкості вітру (v_w) та течії (v_c):

$$x' = x + v \times \cos \theta \times \Delta t + \epsilon_x \quad (3)$$

$$y' = y + v \times \sin \theta \times \Delta t + \epsilon_y \quad (4)$$

де x', y' — нові координати судна після переміщення;

x, y — поточні координати судна;

V — швидкість судна;

θ — курс судна (напрямок руху);

Δt — крок часу;

ϵ_x, ϵ_y — стохастичні збурення, які враховують невизначеність, викликану, наприклад, вітром чи течією.

Отже, процес розходження двох суден представляє собою стохастичну динамічну систему, в якій судна мають елементи руху (курс та швидкість) та місцеположення у просторі (координати) у визначений момент часу. Також, на динамічну систему впливають випадкові збурення, що характеризують невизначеність навігаційної обстановки. Для оптимізації процесу розходження двох зазначених суден можна застосувати метод динамічного програмування, що базується на принципі оптимальності Беллмана, враховуючі стохастичні збурення у системі. Таким чином, можна узагальнити наступний алгоритм прийняття рішень:

1. оцінка поточного стану системи;
2. прогноз розвитку ситуації з урахуванням стохастичних факторів;
3. розрахунок оптимального управління методом динамічного програмування;
4. реалізація керуючих впливів.

Результати та рекомендації. Запропоновані моделі можна використати для подальших досліджень, наприклад:

1. Адаптивна модель динамічного програмування. Модель базується на використанні формули Беллмана для побудови оптимальних траєкторій із врахуванням стохастичних факторів. Наприклад, судно має подолати ділянку з інтенсивним рухом на вході до порту при змінних умовах вітру та течії. Застосування формули Беллмана (2) дозволяє побудувати траєкторію, яка мінімізує ймовірність зіткнення, враховуючи ймовірність змін зовнішніх умов. У цьому випадку система може враховувати прогнозовані зміни швидкості течії та сили вітру (3, 4), а також маневри інших суден у зоні;

2. Інтеграція з навігаційними системами (ЕКНІС). Поєднання адаптивної моделі з ЕКНІС дозволить в реальному часі відображати оптимальні траєкторії на навігаційній карті. Наприклад, у високонавантаженої зоні портової акваторії капітан зможе отримувати вказівки щодо безпечного маневру, враховуючи дані AIS (автоматичної ідентифікаційної системи) та прогноз течій.

3. Моделювання портових зон. Для високонавантажених акваторій, таких як порт Шанхай, модель може застосовуватися для прогнозування впливу навантаження на розходження суден. Наприклад, враховуючи, що у певний період у порту перебуває 20 суден, система здатна передбачити найбільш безпечні маршрути для кожного з них, мінімізуючи ймовірність затримок.

Приклад можливого моделювання: судно класу Panamax рухається до порту в умовах змінної течії та зустрічного вітру. Зона вхідного каналу має ширину 500 метрів, а навігаційне середовище містить три інші судна. Завдання — мінімізувати витрати пального та ризик зіткнення.

Етапи моделювання:

1. Збір даних. Вхідні дані включають:

Швидкість судна (v) — наприклад, 12 вузлів.

Течія (v_c) — змінна, наприклад, в діапазоні 1–2 вузли.

Вітер (v_w) — змінна, наприклад, до 15 вузлів.

2. Оптимізація траєкторії. Формула Беллмана (2) використовується для визначення оптимальної траєкторії, що зменшує час у дорозі та ризики.

3. Візуалізація результатів. На карті ЕКНІС відображається оптимальний маршрут судна з урахуванням змінних умов.

Висновки. Результати цього дослідження демонструють перспективність використання методу динамічного програмування для оптимізації процесу розходження суден в умовах стохастичних факторів навігаційного середовища. Основні досягнення включають:

1. Розробка концептуальної моделі. Використання формули Беллмана дозволило створити математичний інструмент, який враховує динамічну природу навігаційного середовища та ймовірнісні ризики;

2. Стохастичний підхід. Застосування ймовірнісних методів забезпечує адаптацію моделей до змінних умов, таких як течії, вітрові навантаження та присутність інших суден;

3. Практична значущість. Розроблені підходи можуть бути використані для вдосконалення систем підтримки прийняття рішень на судах, зокрема у високонавантажених портових акваторіях.

Подальші можливості дослідження можуть включати:

1. Інтеграція із системами штучного інтелекту. Використання алгоритмів машинного навчання для автоматичного коригування маршрутів у реальному часі. Це дозволить розширити функціональність моделей, забезпечуючи ще вищу адаптивність до змін умов;

2. Розширення бази даних. Збір додаткових даних про навігаційні умови у різних регіонах світу, включаючи мілководні та арктичні зони. Це дозволить вдосконалити стохастичну складову моделей;

3. Реалізація у симуляційних середовищах. Тестування запропонованих моделей на морських тренажерах для оцінки їх ефективності в реальних сценаріях;

4. Розробка інтерфейсів для ЕКНІС. Інтеграція моделей у електронні картографічні системи для оперативного відображення оптимальних маршрутів та ризиків у реальному часі;

5. Застосування в автономному судноплаванні: Подальший розвиток моделей може забезпечити їх використання у системах автономних суден, що мінімізує вплив людського фактора на безпеку судноплавства;

6. Аналіз економічної ефективності: Проведення детального аналізу економічної доцільності впровадження розроблених моделей, зокрема оцінка зниження витрат на паливе та ризиків затримок.

Таким чином, дослідження формує базис для подальших інновацій у сфері морської навігації. Інтеграція запропонованих підходів у практику забезпечить підвищення безпеки судноплавства, оптимізацію ресурсів та зменшення негативного впливу на довкілля.

Dubynets O.I., Maranov O.V.

OPTIMIZATION OF THE VESSEL'S PASSING PROCESS USING THE DYNAMIC PROGRAMMING METHOD TAKING INTO ACCOUNT STOCHASTIC FACTORS OF THE NAVIGATIONAL ENVIRONMENT

The article proposes a new approach to optimizing the process of preventing ship collisions using the dynamic programming method, which takes into account the stochastic nature of the navigation situation. A mathematical model of the divergence process is developed, which includes random environmental factors. A decision-making algorithm based on the Bellman optimality principle is proposed. Simulation modeling methods are proposed to confirm the effectiveness of the specified method for further research. The developed method potentially provides increased navigation safety in difficult conditions while minimizing control costs. The aim of the work is to develop a conceptual model for optimizing ship divergence using the dynamic programming method and analyze the impact of stochastic factors on the effectiveness of this process. The results of this study demonstrate the prospects of using the dynamic programming method to optimize the ship divergence process under stochastic factors of the navigation environment.

Keywords: navigation safety, vessel collision prevention, dynamic programming, stochastic factors, optimization, decision-making.

ЛІТЕРАТУРА

1. Цимбал Н.Н., Бурмака І.А., Тюпиков Е.Е. Гибкие стратегии расхождения судов. Одесса: КП ОГТ, 2007. 424 с.
2. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами размещением на параллельной линии пути. Одесса: Фенікс, 2013. 180 с.
3. Пятаков Е.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака І.А., Булгаков А.Ю. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения. Херсон: Гринь Д.С., 2015. 312 с.
4. Лісовскі Дж. Методи керування грою в системі підтримки прийняття рішень навігатором. Архів транспорту. 2005. № 3-4, Вип. XVII. Р. 133-147.
5. Статерос Томас, Хауеллс Гарет, Макдональд-Маєр Клаус. Концепції, технології та методи навігації автономного уникнення зіткнення суден. Я. Навіг. 2008. 61, № 1, с. 129-142.
6. Бурмака І.А. Управління судами в ситуації небезпечного зближення / І.А. Бурмака, Е.Н. Пятаков, А.Ю. Булгаков – LAP LAMBERT Academic Publishing, – Саарбрюккен (Німеччина), – 2016. – 585 с.
7. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении / А.С. Мальцев. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
8. Xu X. Modeling of Ship Collision Risk Index Based on Complex Plane and Its Realization/ X. Xu, X. Geng, YQ Wen //TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, № 2, 2016, С. 251-256.
9. Кім Д. Уникнення зіткнення суден за допомогою розподіленого пошуку табу / Д. Кім, К. Хіраяма, Т. Окімото // TransNav, Міжнародний журнал з морської навігації та безпеки морського транспорту, том. 9, № 1, С. 23-29, 2015.
10. Hornauer S. Trajectory Planning with Negotiations for Maritime Collision Avoidance / S. Hornauer, A. Hahn, M. Blaich, J. Reuter // TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, № 3, 2015, С. 335-341.
11. Лісовскі Дж. Ігри та алгоритми прийняття рішень обчислювального інтелекту для уникнення зіткнень у морі/ Дж. Лісовскі // Праці. IEEE Int. конф. з технологій внутрішньої безпеки та безпеки. – 2005. – Гданськ. – Р. 71-78.
12. Петриченко Є.О. Розробка системи запобігання зіткненням з декількома цілями за допомогою еволюційних алгоритмів / Є.А. Петриченко // Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра. – 2014. – Всесвітній морський університет, Мальме, Швеція.
13. Zhang W. Maritime Collision Avoidance Path Planning by Dynamic Programming / W. Zhang, F. Goerlandt, P. Kujala // Безпека морського транспорту: морська навігація та безпека морського транспорту. – CRC Press, 2015. – С. 75-81.
14. Szlapczynski R. Новий метод планування маневрів уникнення зіткнень для ситуацій зустрічі з кількома цілями / R. Szlapczynski // Journal of Navigation. – 2008. – Вип. 61, № 2. – С. 307-321.
15. Там К. К. Алгоритми планування шляху для кораблів при зіткненні на близькій відстані / К. К. Там, Р. Бакнелл, А. Грейг // Журнал навігації. – 2009. – Вип. 62, № 3. – С. 455-472.

Левченко О.В., Ганношина І.М.

СИСТЕМА ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА МОСТИКУ СУДНА

Об'єктом досліджень є система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень капітаном та посадовими особами судна. Напрямком дослідження є пошук способів створення єдиного інформаційного простору для капітана судна і посадових осіб екіпажу з управління судном у різних умовах обстановки. Метою дослідження є розробка підходів до створення єдиної методологічної основи для розроблення та синтезу інформаційного оточення капітана судна і посадових осіб екіпажу для підтримки процесів прийняття рішень у різних умовах обстановки. Для досягнення мети пропонується створити інформаційне середовище підтримки прийняття рішень шляхом розробки комплексу інформаційних моделей на основі технології доповненої реальності, що дозволить підвищити обґрунтованість та оперативність прийняття рішень судноводієм та іншими посадовими особами екіпажу судна. Проведений аналіз автоматизованих систем керування судном засвідчив наявність розрізнених елементів, що відображають різні види інформаційних моделей. Створення єдиної інформаційної моделі навколишнього оточення на основі технологій доповненої реальності є можливим шляхом щодо подолання зазначених недоліків.

Ключові слова: інформаційна модель, доповнена реальність, тренажерна підготовка, професійна підготовка, траєкторія навчання, навігація, рух судна, безпека судноводіння, оточуюче середовище.

Вступ. Розвиток рівня автоматизації процесів керування рухом сучасних пасажирських і вантажних суден набуває все більшого значення. Причому райони й умови виконання завдань постійно змінюються і кількість відвідуваних портів розширюється. Використання нових видів спеціального обладнання чинить значний вплив на вибір і реалізацію прийомів судноводіння, а, як наслідок, і на стратегію виконання всієї місії судном. Можливість виконання місій у різних умовах визначає можливість використання пасажирських і вантажних суден як однієї зі складових загальної бізнесової операції з розв'язанням усього кола завдань, у т. ч. навігації, управління, безпеки руху.

Це призводить до того, що використання суден для виконання основного та допоміжних завдань вимагає розв'язання широкого кола проблем збору та обробки величезного потоку інформації. При цьому потоки інформації, що циркулює у системі, можуть бути розділені на зовнішні та внутрішні [1, 2]. Навігаційна інформація від усіх можливих різноманітних зовнішніх джерел, інформація про своє та оточуючі судна, про берегову обстановку, керівні документи, метеорологічна інформація, екологічна, гідрографічна та ін. у сукупності складають зовнішні потоки інформації [3]. До внутрішньої інформації відноситься інформація навігаційна, радіолокаційна, про стан систем судна, дані про стан вантажу та ін.

Уся множина оброблюваної системою управління інформації надалі використовується для оцінювання обстановки та прийняття рішень на управління судном і забезпечення виконання завдання посадовими особами.

Інформаційна насиченість процесів підтримки прийняття рішень посадовими особами вимагає проведення оцінювання їхніх можливостей з опрацювання інформації, пошуку способів усунення надмірності та створення комфортних інформаційних умов для прийняття рішень [4].

На теперішній час все різноманіття розв'язуваних завдань у різних умовах реалізується на одному і тому ж наборі інформаційних моделей, реалізованих у вигляді єдиного інформаційного комплексу містка суден [5].

Такий підхід знижує здатність до адаптивного формування інформаційних моделей залежно від обстановки, що складається, і відображення необхідної інформації для розв'язуваних завдань. Це призводить до зниження ефективності та оперативності прийняття рішень посадовими особами суден і їхньої інформаційної обізнаності.

Подолання такого стану речей можливе завдяки застосуванню нових підходів до побудови системи інформаційного забезпечення діяльності капітана та посадових осіб суден і використанні нових підходів до оброблення інформації, що реалізовано на базі інтелектуальних технологій у складі наявних і перспективних комплексів засобів автоматизації у складі автоматизованих систем керування судном [6-7].

Аналіз літератури. На теперішній час існує кілька підходів до створення автоматизованих систем управління судном. Перший із них передбачає часткову автоматизацію деяких процесів керування, наприклад, руховою установкою або рухом судна тощо [2].

Іншим підходом передбачається комплексна автоматизація всіх процесів, що забезпечують управління всіма системами судна, включно з навігаційними [3].

Обидва ці підходи передбачають використання різних засобів відображення інформації. Але їх об'єднує єдине – це відсутність розв'язання завдань створення єдиного інформаційного простору, особливо, коли це стосується створення єдиного інформаційного простору надводної, підводної і наземної поверхні, а також обстановки у повітряному просторі.

Тому актуальним напрямком дослідження є пошук способів створення єдиного інформаційного простору для капітана судна і посадових осіб екіпажу з управління судном у різних умовах обстановки.

Метою цієї статті є розробка підходів до створення єдиної методологічної основи для розроблення та синтезу інформаційного оточення капітана судна і посадових осіб екіпажу для підтримки процесів прийняття рішень у різних умовах обстановки.

Основна частина. На теперішній час у складі систем керування судном, у т. ч. автоматизованих, є розрізнені засоби відображення індивідуального використання, що відображають інформацію про стан різних систем судна та ситуації в оточуючому середовищі, наприклад, навігаційну обстановку, стан і режими роботи рухової установки, стан окремих систем таких, як холодильна, кондиціонування та ін., положення інших надводних об'єктів тощо.

Такий підхід до створення та реалізації системи відображення вимагає від капітана, його помічників, інших посадовців постійного перебування в стані підвищеного психо-емоційного навантаження. Особливо це є актуальним в умовах проходження судном каналів, вузькостей, у портах та наближенні до них, в складних погодних умовах тощо. Такі ситуації вимагають у посадовців підтримання у свідомості актуальної концептуальної моделі про стан судна і навколишнього оточення. Безумовно, зовнішні умови і навантаження знижують темп оновлення концептуальної моделі. Наслідком таких дій є зниження оперативності й обґрунтованості прийняття рішень з управління судном і реагування на зміну навколишньої обстановки.

Одним із можливих підходів до подолання виниклих проблем є використання технологій доповненої реальності, що доповнюватимуть обмежені можливості засобів відображення інформації.

Так, інтеграція напівпрозорих екранів із засобами відображення інформації судового містка дасть змогу значно розширити інформаційне поле. Результатом такого об'єднання стане комплексування інформації про навколишню обстановку і про стан внутрішніх систем судна, що надходить від різних джерел, тобто створення гібридного відображення.

Для посадових осіб судна (капітана, помічників, старшого механіка, судноводіїв) у процесі прийняття рішень більш значущою є інформація про навколишнє оточення. Тоді на екранах, вмонтованих в ілюмінатори, можливе відображення інформації про надводну обстановку, повітряну обстановку, інші судна та об'єкти, які неможливо бачити візуально або їхнє бачення ускладнене. Також може бути відображена лоцманська інформація, області плавання з різними обмеженнями. Наприклад, можна відображати дані про зони, заборонені для плавання, відображення державних кордонів, територіальні води, мілини, банки та іншу інформацію (рис. 1).

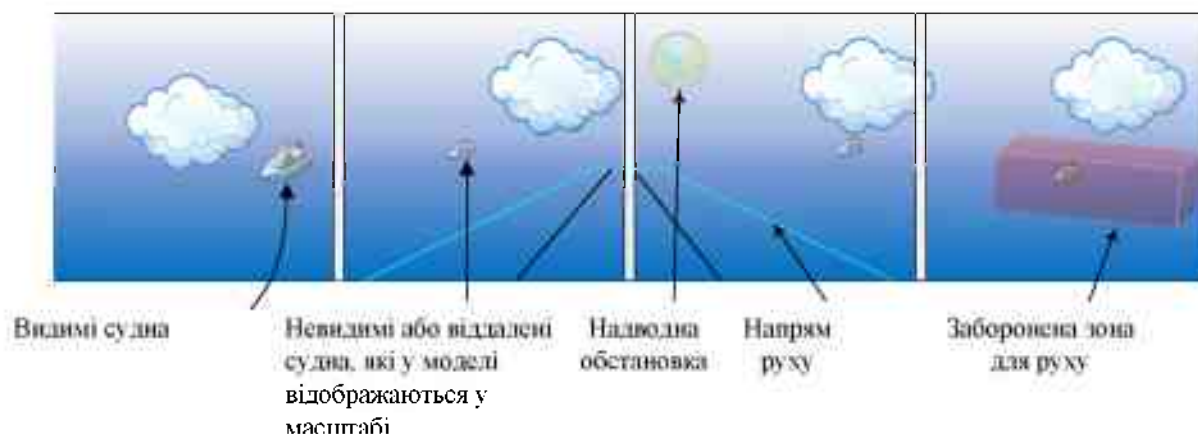


Рисунок 1 – Варіант побудови системи відображення інформації з елементами доповненої реальності

Окремою проблемою вважається формальне подання процедур відбору інформації та її відображення у складі інформаційної моделі. Ця проблема ще більш ускладнюється при додаванні до цієї моделі елементів доповненої реальності. Для опису векторів стану об'єкта й обстановки у відповідні моменти часу $X[k]$ (або $X[k+1]$) можна застосувати загальне рівняння переходів для послідовної трансформації моделі відображення [1, 2]:

$$X[k+1] = \Psi(X, Q, D, t)X[k] + \Xi(t)Q(k) + \Lambda(t)\Omega[k], \quad (1)$$

де $\Psi(X, Q, D, t)$ - функція переходу, що враховує зміни стану об'єкта управління;

$Q(k)$ - вектор керуючих впливів;

$\Omega[k]$ - вектор збурювальних впливів обстановки;

$\Xi(t)Q(k)$ и $\Lambda(t)\Omega[k]$ - векторні інтегральні перетворення керуючих і збурювальних впливів.

Використання подібного підходу дасть змогу підвищити інформаційну обізнаність в умовах недостатньої видимості, а також зберегти ситуаційну обізнаність у разі виходу з ладу навігаційного або радіолокаційного обладнання або систем обміну інформацією, що матиме значний вплив на ефективність управління судном.

Такий підхід також доцільно використовувати при практичній підготовці моряків, розширювати можливості тренажерів, розробляти індивідуальні траєкторії навчання і тренування курсантів і досвідчених моряків.

Висновки. Проведений аналіз автоматизованих систем керування судном засвідчив наявність розрізнених елементів, що відображають різні види інформаційних моделей. Вони призначені для обробки інформації про різні компоненти зовнішньої обстановки і стан систем судна. Наявність не повністю пов'язаних та взаємодіючих моделей вимагає від посадових осіб екіпажу великих зусиль щодо підтримання інформаційної обізнаності та знижує ефективність і оперативність прийнятих рішень. Створення єдиної інформаційної моделі навколишнього оточення на основі технологій доповненої реальності є можливим шляхом щодо подолання зазначених недоліків. Крім того, заявлений підхід підвищить ефективність діяльності екіпажу в різних умовах обстановки та дозволить створювати зручні засоби для проведення тренажерної підготовки зі значно наближеним до реалій фоном завдань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Демінський А.В. Аналіз стану аварійності водного транспорту в Україні і постановка завдання з удосконалення методів оцінки та управління ризиками виникнення і запобігання аварійних морських подій Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. К.: ДУІТ, 2023. Випуск 2(37). С. 85-96. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.09> (дата звернення: 11.11.2024).
2. Ярмач В.Л. Метод управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання аварійним морським подіям і зниження можливих збитків від них у системі управління безпекою судноплавства Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2023. Т. 1 (71). С. 4-9. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.004>.
3. Froholdt, L. L. (2015). "I see you on my radar": Displays of the confirmatory form in maritime technologically mediated interaction. The Sociological Review, 64(3), 468–494.
4. Milgram, P. Ataxonomy of mixed reality visual displays / P. Milgram, F. Kishino // IEICE Trans. Information systems, vol. E77-D, No.12, 1994. -P. 1321 - 1329.
5. Milgram, P., Ballantyne, J. "Real – world teleoperation via environment modelling" Proc. 7th International Conference (ICAT'97), 1999, P. 1-9.
6. M. Mylly, The European Maritime Safety Agency. High Level Conference on Cyber Security in Civil Aviation: Cyber Risks in Maritime Community. Krakow: EMSA, 2017.
7. The Future of e-Navigation in the North Sea Region. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.accseas.eu/project-information/> (дата звернення: 15.11.2024).

Levchenko O.V., Hannoshyna I.M.

INFORMATION SUPPORT SYSTEM FOR DECISION-MAKING PROCESSES ON THE BRIDGE OF A SHIP

The object of research is the information support system for decision-making processes by the captain and ship's officers. The direction of research is the search for ways to create a single information space for the ship's captain and crew officers to manage the ship in different conditions. The purpose of the research is to develop approaches to creating a single methodological basis for the development and synthesis of the information environment of the ship's captain and crew officers to support decision-making processes in different conditions. To achieve the goal, it is proposed to create an information environment for decision-making support by developing a set of information models based on augmented reality technology, which will increase the validity and efficiency of decision-making by the ship's captain and other ship's crew officers. The analysis of automated ship control systems showed the presence of separate elements that reflect different types of information models. Creating a single information model of the surrounding environment based on augmented reality technologies is a possible way to overcome these shortcomings.

Keywords: *information model, augmented reality, simulator training, professional training, learning trajectory, navigation, vessel movement, navigation safety, environment.*

Войченко Т.О., Трофименко А.О., Рященко О.І., Лісовський С.В.

МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ НА ТЕРМІНАЛАХ МОРСЬКИХ ПОРТІВ: РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ ПРОПОЗИЦІЙ

Метою статті є розробка пропозицій щодо моделювання управління процесами перевантаження на терміналах морських портів для підвищення ефективності їх функціонування. Поставлена мета досягається шляхом розробки комплексу різноманітних моделей для формалізації процесів переміщення вантажів на терміналах морських портів. Встановлено, що одним із способів зниження витрат на розвиток перевантажувальних потужностей у морських портах та покращення їх техніко-економічних показників може стати впровадження ефективної системи координаційного управління технологічними процесами на транспортних вузлах. Тому процеси переміщення вантажів на транспортних вузлах розглядаються як об'єкти моделювання, що дозволяють знаходити оптимальні варіанти перевантаження та розвантаження вантажів. Разом з тим дослідження в галузі управління перевантажувальними процесами морських портів показали, що на сьогоднішній день немає єдиного рішення для ефективного управління даними процесами. У статті проведено системний аналіз цих процесів, створено структуру дерева цілей, що відображає цілі та функції системи управління, виявлено множини завдань, спрямованих на зменшення комплексних витрат. Через аналіз перевантажувальних процесів у морському порту було встановлено систему критеріїв, яка відображає технічні характеристики перевантажувальних комплексів та набір параметрів перевантажувальних процесів. Також було створено семантичну модель, яка дозволяє сформувати предметну область перевантажувальних процесів у морському порту та представити її у вигляді моделі станів перевантажувальних процесів, яка визначає напрямки руху вантажів усередині порту та зміни станів системи управління перевантажувальними процесами. Найбільш суттєвим результатом є саме модель станів перевантажувальних процесів у терміналі морського порту. Дана модель дозволяє відображати напрямок руху вантажів і моделювати процес перевезення всередині порту, що забезпечує можливість визначати зміни у стані системи управління перевантажувальними процесами. Крім того, створена модель дозволяє виявляти можливі напрями покращення ефективності перевантажувальних процесів.

Ключові слова: термінал морського порту, управління, перевантаження, вантаж, декомпозиція, моделювання, модель станів.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку перевезень зростає потреба в доставці вантажів з дотриманням жорстких вимог до термінів, якості транспортування і зниження витрат на транспортно-складські операції. Транспортні вузли грають важливу роль у транспортній системі, так як саме в них починається і закінчується доставка вантажів, а також перевантаження вантажу з одного виду транспорту на інший. Незважаючи на те, що в Україні введені в експлуатацію нові портові перевалочні комплекси, вітчизняні порти задовольняють потреби в перевантажувальних потужностях значно менше необхідного рівня [1]. Тому оптимізація управління перевантажувальними процесами порту та його інфраструктури на основі сучасних інформаційних та комп'ютерних технологій є важливим напрямком підвищення ефективності перевезень. Однак для забезпечення ефективного функціонування перевантажувального комплексу необхідно враховувати взаємозв'язок між багатьма технічними, економічними і соціальними показниками, на які можуть впливати численні фактори.

Ще однією характерною особливістю перевантажувальних процесів у морському порту є їх постійний розвиток. Це пов'язано зі зміною потреб у перевантаженні вантажів і зміною ситуації в порту і регіонах, які він обслуговує. У зв'язку з цим необхідна максимальна формалізація процесів прийняття рішень з оперативно-диспетчерського управління перевантажувальними процесами, їх модернізації та реорганізації. Ефективна система координаційного управління технологічними процесами на транспортних вузлах може стати одним із шляхів зниження витрат на розвиток перевантажувальних потужностей у морських портах і поліпшення їх експлуатаційних і техніко-економічних показників. Тому процеси перевантаження на транспортних вузлах розглядаються як об'єкти моделювання, що дозволяють вирішувати завдання оптимального управління різними варіантами перевантаження і розвантаження вантажів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато вчених досліджують шляхи ефективності функціонування морських портів, зокрема питання перевантаження вантажів (навантаження/розвантаження) [2 - 14].

Наприклад, у роботі [2] проаналізовано сучасний стан та особливості розвитку морських портів в Україні. Доведено необхідність реформування морських торговельних портів у напрямках, що знайшли відображення у комплексних стратегічних документах морської політики України.

У роботі [3] визначено, що пряме перевантаження – це новий спосіб перевантаження контейнерів, при якому частина перевантажувальних контейнерів завантажується безпосередньо на плавучі бази з фідерних суден, а не буферизується в місці зберігання. Для його ефективної реалізації необхідно вирішити кілька питань, пов'язаних з прийняттям рішень, одним з яких є виділення спальних місць і складських приміщень. Інтегрована модель призначена для оптимізації розподілу причалів, складських площ і плану прямої перевантаження одночасно. Мета – мінімізувати експлуатаційні витрати вантажних автомобілів і портових кранів, а також витрати на затримку суден. Для вирішення цього завдання розроблений евристичний алгоритм. Наведено чисельні експерименти, що ілюструють правильність запропонованої моделі та алгоритмів. Результати показують, що режим прямого перевантаження дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати. Модель враховує переваги як для операторів терміналів, так і для перевізників, стимулюючи використання прямого перевантаження як ефективного методу підвищення ефективності перевантаження і, таким чином, підвищення конкурентоспроможності контейнеровозів.

Предметом статті [4] є процес розвантаження і навантаження суден на морських контейнерних терміналах. Оскільки проблеми прийняття рішень у контейнерних терміналах носять динамічний характер і повинні з часом переоцінюватися в залежності від стану деяких важливих базових факторів (таких як судна, крани або характеристики місць зберігання), проблема формулюється як марківський процес прийняття рішень (MDP). Завдання полягає в тому, щоб забезпечити оптимальну послідовність рішень, які повинні бути прийняті в кожен момент часу в період вантажно-розвантажувальних робіт, щоб мінімізувати загальний час простою швартових кранів і транспортних засобів, призначених для обслуговування контейнеровоза. У цій статті також розроблено імітаційну модель для перевірки та оцінки оптимальної політики, наданої MDP.

У роботі [5] зазначено, що світова торгівля неухильно зростає, а управління транспортом і логістикою день за днем стикається з безліччю проблем. Контейнерні перевезення є одним з тих напрямків, управління яким стало основним завданням через свою важливу роль у забезпеченні якості обслуговування вантажних перевезень. У даній статті автори описують систему моніторингу та управління в режимі реального часу, призначену для автоматизації управління морськими термінальними контейнерами. Запропоноване рішення базується на використанні технологій Інтернету речей (IoT) та великих даних для створення системи, що надає розширені функції для різних аспектів управління контейнерною логістикою. Оскільки реалізація запропонованої системи передбачає використання різних інструментів та технологій, було проведено порівняльне дослідження кількох технологій та інструментів, пов'язаних з IoT та великими даними, з метою вибору відповідних. Автори також прийняли багаторівневу архітектуру для запропонованої системи, і в статті вони представили сферу застосування, роль та набір інструментів для кожного шару.

У статті [6] сформульована двокритеріальна задача розподілу причалів зі стохастичним часом обробки суден. Для розв'язання задачі пропонується евристика на основі еволюційного алгоритму й алгоритм скорочення фронту Парето на основі моделювання. Дослідження показують, що запропонований підхід передбачає рішення, які перевищують ті, де використовується очікуване значення часу обробки судна.

Таким чином, дослідження у сфері управління перевантажувальними процесами у морських портах підтверджують, що на даний момент не існує однозначного рішення, яке б дозволило ефективно керувати такими процесами.

Метою статті є розробка пропозицій щодо моделювання управління процесами перевантаження на терміналах морських портів для підвищення ефективності їх функціонування.

Основні результати дослідження. Відсутність в Україні портів, які мають інтегровані інтелектуальні логістичні системи, створює перешкоди для ефективної взаємодії учасників процесу обробки вантажів. Для вирішення цього завдання необхідно розробити високоефективну транспортно-логістичну інфраструктуру, яка забезпечить швидкість і надійність надання транспортних послуг, в тому числі з використанням інтелектуальних транспортних систем. При розвитку такої інфраструктури також необхідно формалізувати процеси управління вантажними операціями в морських портах. При цьому одним з важливих етапів формалізації є етап моделювання відповідних процесів.

У рамках формування пропозицій щодо моделювання процесів управління процесами перевантаження в терміналах морського порту у даній статті:

- 1) проведено комплексний аналіз процесів перевантаження в терміналах морського порту у рамках розробки моделі декомпозиції функцій, що виконуються у процесі перевантажування вантажів (навантаження/розвантаження);
- 2) розроблена ієрархічна модель цілей системи управління процесом перевантаження;
- 3) створена система критеріїв, що відображає технічні характеристики перевантажувальних комплексів з метою забезпечення ефективності оцінки цих систем;
- 4) розроблена семантична модель процесу перевантаження, що описує предметну область об'єкта управління;
- 5) розроблено модель управління процесами перевантаження;
- 6) розроблено модель станів, яка дає можливість оцінити зміни станів системи управління процесами перевантаження.

Декомпозиція функцій на рис. 1, яка відображає процеси перевантаження вантажів у морських портах, дозволяє створити модель портового терміналу і розділити її на набір P окремих вантажно-розвантажувальних пунктів

$$P = \{p_i\}, i = \overline{1,5}, \quad (1)$$

де p_1 – причал (завантаження/розвантаження);

p_2 – перенесена платформа (завантаження/розвантаження);

p_3 – склад (завантаження/розвантаження);

p_4 – місце для обробки транспортних засобів (завантаження/розвантаження);

p_5 – залізнична станція (завантаження/розвантаження).

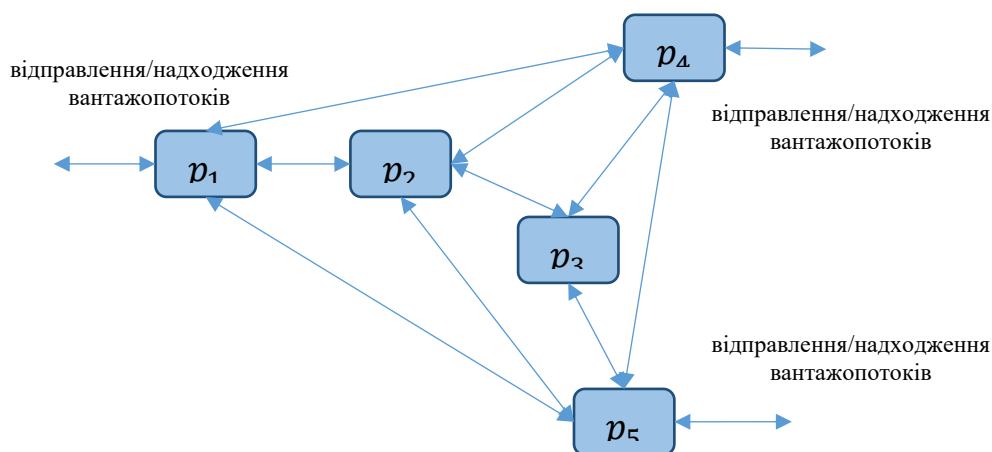


Рисунок 1 – Модель декомпозиції функціонування перевантажувальних процесів на терміналах морських портів

Ієрархічна модель цілей системи управління перевантажувальним процесом (рис. 2) вказує на те, що основною метою такої системи є підвищення ефективності управління перевантажувальними процесами в морському порту.

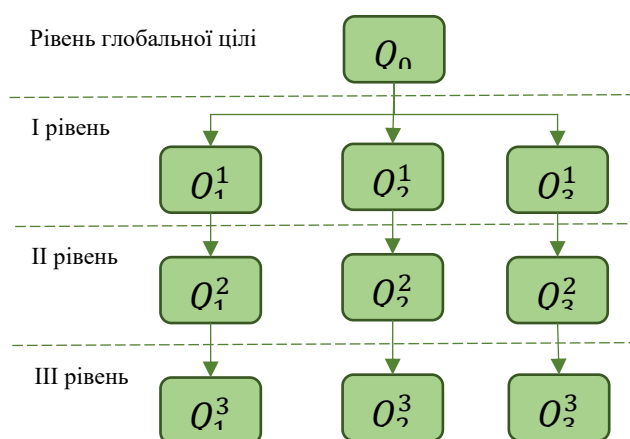


Рисунок 2 – Ієрархічна модель цілей системи управління процесами перевантаження

Глобальна ціль являє собою кортеж, який складається з таких компонент:

$$Q_0 \Rightarrow \langle Q_1^1, Q_2^1, Q_3^1 \rangle, \quad (2)$$

де Q_1^1 – своєчасне завантаження і розвантаження;

Q_2^1 – удосконалення організації процесів перевантаження;

Q_3^1 – оптимізація управління процесами обробки.

Згодом кожна ціль уточнюється відповідно до типу кінцевого продукту:

$$\langle Q_1^1, Q_2^1, Q_3^1 \rangle \Rightarrow \langle Q_1^2, Q_2^2, Q_3^2 \rangle, \quad (3)$$

де Q_1^2 – збільшення обсягу вантажів, що перевозяться;

Q_2^2 – підвищення ефективності вантажних процесів;

Q_3^2 – зниження комплексних витрат на процеси перевантаження.

Дані кортежі розглядаються як компоненти простору ініціації цілей:

$$\langle Q_1^2, Q_2^2, Q_3^2 \rangle \Rightarrow \langle Q_1^3, Q_2^3, Q_3^3 \rangle, \quad (4)$$

де Q_1^3 – удосконалення організації та технології вантажних операцій;

Q_2^3 – вирішення проблеми планування обробки вантажів;

Q_3^3 – мінімізація витрат на перевалку вантажів.

Представлена система критеріїв K_0 (рис. 3) містить дві групи елементів:

- технічні характеристики перевантажувальних комплексів K_2^1 ;
- допоміжні технологічні елементи K_1^1 .

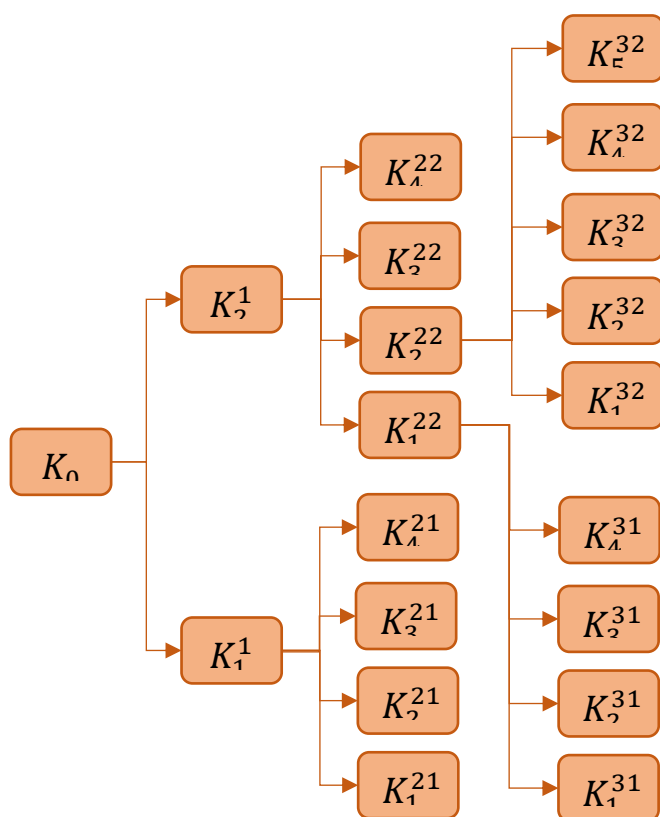


Рисунок 3 – Система критеріїв, що відображають технічні характеристики перевантажувальних комплексів

Формально запропоновану систему критеріїв представляється таким виразом:

$$\begin{aligned} K_0 = \{K_1^1, K_2^1\} &= \{K_1^{21}, K_2^{21}, K_3^{21}, K_4^{21}\} \cup \{K_1^{22}, K_2^{22}, K_3^{22}, K_4^{22}\}, \\ K_1^{22} &= \{K_1^{31}, K_2^{31}, K_3^{31}, K_4^{31}\}, \\ K_2^{22} &= \{K_1^{32}, K_2^{32}, K_3^{32}, K_4^{32}, K_5^{32}\} \end{aligned} \quad (5)$$

де $K_1^{21} \in K_1^1$ – засоби зв'язку;

$K_2^{21} \in K_1^1$ – силові та освітлювальні електромережі;

$K_3^{21} \in K_1^1$ – водопровід;

$K_4^{21} \in K_1^1$ – інші допоміжні технологічні елементи;

$K_1^{22} \in K_2^1$ – транспортні засоби;

$K_{12}^{22} \in K_2^1$ – підйомна-транспортна техніка;

$K_3^{22} \in K_2^1$ – склади;

$K_4^{22} \in K_2^1$ – пірси;
 $K_1^{31} \in K_1^{22}$ – залізничний транспорт;
 $K_2^{31} \in K_1^{22}$ – автомобільний транспорт;
 $K_3^{31} \in K_1^{22}$ – водний транспорт;
 $K_4^{31} \in K_1^{22}$ – інший транспорт;
 $K_1^{32} \in K_2^{22}$ – кран;
 $K_2^{32} \in K_2^{22}$ – навантажувач;
 $K_3^{32} \in K_2^{22}$ – конвеєр;
 $K_4^{32} \in K_2^{22}$ – елеватор;
 $K_5^{32} \in K_2^{22}$ – інше обладнання.

На основі системи критеріїв (5) розроблено семантичну модель процесу перевантаження, що описує предметну область об'єкта управління у вигляді кортежу

$$PP = \langle O, B, T, D, R, C \rangle, \quad (6)$$

де O – множина опорних елементів;

$B = \{b_i | i = \overline{1, n}\}$ – множина пірсів, $b_i = \{l_b^i, d_b^i\}$, l_b^i – довжина пірсу, d_b^i – глибина пірсу;

$T = \{t_h | h = \overline{1, l}\}$ – множина транспортних засобів, $t_h = \{N_t^h, G_t^h\}$, N_t^h – тип та G_t^h – вантажопідйомність транспортних засобів;

$D = \{d_j | j = \overline{1, s}\}$ – множина складів, $d_j = \{e_d^j, w_d^j, k_d^j\}$, e_d^j – ємності, w_d^j – площа, k_d^j – вид складу;

$R = \{r_q | q = \overline{1, m}\}$ – множина вантажно-розвантажувальної техніки;

$C = \{c_p | p = \overline{1, g}\}$ – множина вантажопотоків.

Кортеж (6) дозволяє сформувати процес перевантаження в морському порту і представити його у вигляді моделі. Розроблена модель управління процесами перевантажування формально представлена у вигляді

$$MPP = \{TP, ITP, OTP, FTP, AL\}. \quad (7)$$

У даній моделі під об'єктом моделювання TP розглядається процес перевантаження морського порту і перевантажувальних комплексів, які безпосередньо здійснюють свою діяльність.

ITP – вхідні параметри, що містять параметри елементів семантичної моделі перевантажувальних процесів і дані для розрахунку витрат на процеси перевантаження.

OTP – вихідні параметри (оптимальний план транспортування вантажу, цільова функція, що мінімізує складні витрати).

FTP – функція переведення (алгоритми пошуку плану перевезення за заданими значеннями критеріїв вибору).

AL – правила виведення засобів містять систему обмежень на перевагу особи, яка приймає рішення.

Розроблена модель станів перевантажувальних процесів (рис. 4) показує, що в порту є такі підсистеми, як причал, залізнична станція, фронтальна платформа, місце обробки вагонів і склад. Такими підсистемами у транспортному вузлу порту є пункти завантаження і розвантаження. Ці моменти на рис. 4 представлені вершинами графа станів $V(S, E)$ і складають множину вершин (станів)

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}, N = \overline{1, 5} \quad (8)$$

і множину дуг (напрямків (варіантів) перевезення вантажів усередині порту)

$$E = \{E_{12}, E_{21}, \dots, E_{45}, E_{54}\}. \quad (9)$$

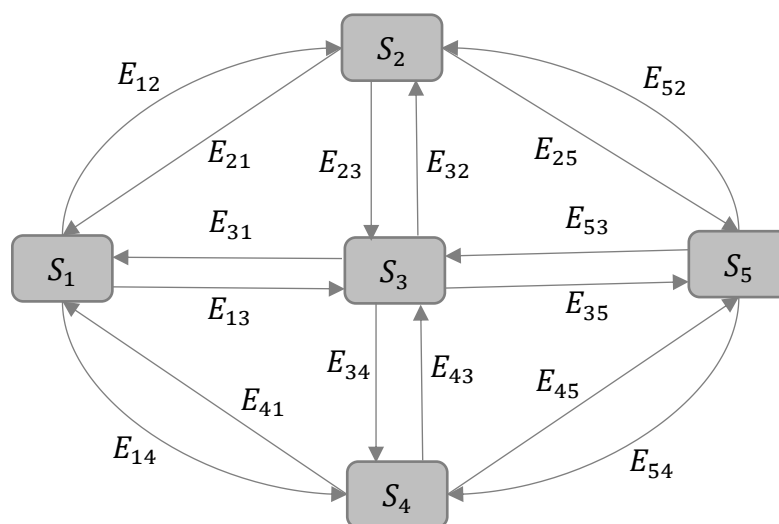


Рисунок 4 – Модель станів перевантажувальних процесів у терміналі морського порту

Під станом системи управління перевантажувальними процесами розуміється знаходження вантажного потоку у певній вершині графа. Коли вантажний потік переміщується з однієї точки в іншу, відбувається зміна стану системи. Модель станів дозволяє відображати напрямки руху вантажів і моделювати процес перевезення всередині порту, що дає змогу визначити зміни в стані системи управління перевантажувальними процесами. Розроблена модель також дозволяє виявляти напрями поліпшення ефективності перевантажувальних процесів.

Висновки. Дослідження, проведені в галузі управління перевантажувальними процесами морських портів, засвідчили, що наразі не існує єдиного рішення, яке дало б змогу ефективно управляти перевантажувальними процесами. У зв'язку з цим, у статті проведено системний аналіз перевантажувальних процесів, створено структуру дерева цілей, яка відображає цілі та функції системи управління перевантажувальними процесами, виявлено множину завдань, спрямованих на скорочення комплексних витрат. На основі аналізу перевантажувальних процесів у морському порту було встановлено систему критеріїв, що відображають технічні характеристики перевантажувальних комплексів, яка дає змогу визначити набір параметрів перевантажувальних процесів. Було створено семантичну модель, яка дозволяє сформувати предметну область перевантажувальних процесів у морському порту та представити її у вигляді моделі станів перевантажувальних процесів, що визначає напрямки руху вантажів усередині порту та зміни станів системи управління перевантажувальними процесами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стратегія розвитку морських портів України на період до 2038. URL: http://publications.chamber.ua/2018/Infrastructure/Strategy_2038.pdf (дата звернення: 02.10.2024)
2. Reshetkov D.M. Development and use of power ports of ukraine on an innovative basis. *SWorldJournal*. 2018. № 04-01. С. 64–68. URL: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2020-04-01-012> (дата звернення: 02.10.2024).
3. Zeng Q., Feng Y., Chen Z. Optimizing berth allocation and storage space in direct transshipment operations at container terminals. *Maritime Economics & Logistics*. 2017. Vol 19, No. 3. P. 474–503. URL: <https://doi.org/10.1057/mel.2016.2> (дата звернення: 02.10.2024).
4. Rida M. Modeling and Optimization of Decision-Making Process During Loading and Unloading Operations at Container Port. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014. Vol. 39, No. 11. P. 8395–8408. URL: <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1328-8> (дата звернення: 02.10.2024).

5. Kaderi F. A., Koulali R., Rida M. Automated management of maritime container terminals using internet of things and big data technologies. *SCA '19 : Proceedings of the 4th International Conference*, Casablanca, Morocco, 2–4 October 2019. New York, USA, 2019. URL: <https://doi.org/10.1145/3368756.3369046> (дата звернення: 02.10.2024).
6. The berth allocation problem with stochastic vessel handling times / J. Karafa et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 65, No. 1-4. P. 473–484. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4186-0> (дата звернення: 02.10.2024).
7. Bielli M., Boulmakoul A., Rida M. Object oriented model for container terminal distributed simulation. *European Journal of Operational Research*. 2006. Vol. 175, No. 3. P. 1731–1751. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.037> (дата звернення: 02.10.2024).
8. Logistics node design and control over the whole life cycle based on web based simulation / A. Bruzzone et al. *International journal of internet manufacturing and services*. 2007. Vol. 1, No. 1. P. 32–50.
9. Shabayek A. A., Yeung W. W. A simulation model for the Kwai Chung container terminals in Hong Kong. *European Journal of Operational Research*. 2002. Vol. 140, No. 1. P. 1–11. URL: [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(01\)00216-8](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(01)00216-8) (дата звернення: 02.10.2024).
10. Efficient Solution Algorithms for Factored MDPs / C. Guestrin et al. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2003. Vol. 19. P. 399–468. URL: <https://doi.org/10.1613/jair.1000> (дата звернення: 02.10.2024).
11. Kim K. H., Park Y.-M. A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal of Operational Research*. 2004. Vol. 156, No. 3. P. 752–768. URL: [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(03\)00133-4](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(03)00133-4) (дата звернення: 02.10.2024).
12. Kim K. H., Kim H. B. The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2002. Vol. 36, No. 9. P. 821–835. URL: [https://doi.org/10.1016/s0191-2615\(01\)00033-9](https://doi.org/10.1016/s0191-2615(01)00033-9) (дата звернення: 02.10.2024).
13. Lee B. K., Kim K. H. Optimizing the block size in container yards. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2010. Vol. 46, No. 1. P. 120–135. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.07.001> (дата звернення: 02.10.2024).

REFERENCES

1. Stratehiia rozvytku morskyykh portiv Ukrainy na period do 2038 [Strategy for the development of seaports of Ukraine for the period until 2038]. URL: http://publications.chamber.ua/2018/Infrastructure/Strategy_2038.pdf (accessed: 02.10.2024) (in Ukrainian)
2. Reshetkov, D. M. (2018). Development and use of power ports of Ukraine on an innovative basis. *SWorldJournal*, 04-01, 64–68. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2020-04-01-012> (accessed: 02.10.2024)
3. Zeng, Q., Feng, Y., & Chen, Z. (2017). Optimizing berth allocation and storage space in direct transshipment operations at container terminals. *Maritime Economics & Logistics*, 19(3), 474–503. <https://doi.org/10.1057/mel.2016.2> (accessed: 02.10.2024)
4. Rida, M. (2014). Modeling and optimization of decision-making process during loading and unloading operations at container port. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(11), 8395–8408. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1328-8> (accessed: 02.10.2024)
5. Kaderi, F. A., Koulali, R., & Rida, M. (2019). Automated management of maritime container terminals using internet of things and big data technologies. In *Proceedings of the 4th International Conference on Smart City Applications. Association for Computing Machinery*. <https://doi.org/10.1145/3368756.3369046> (accessed: 02.10.2024)
6. Karafa, J., Golias, M. M., Ivey, S., Saharidis, G. K. D., & Leonardos, N. (2012). The berth allocation problem with stochastic vessel handling times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(1-4), 473–484. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4186-0> (accessed: 02.10.2024)
7. Bielli, M., Boulmakoul, A., & Rida, M. (2006). Object oriented model for container terminal distributed simulation. *European Journal of Operational Research*, 175(3), 1731–1751. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.037> (accessed: 02.10.2024)

8. Bruzzone, A., Longo, F., Massei, M., Saetta, S., & van Gelder, L. (2007). Logistics node design and control over the whole life cycle based on web based simulation. *International Journal of Internet Manufacturing and Services*, 1(1), 32–50.
9. Shabayek, A. A., & Yeung, W. W. (2002). A simulation model for the Kwai Chung container terminals in Hong Kong. *European Journal of Operational Research*, 140(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(01\)00216-8](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(01)00216-8) (accessed: 02.10.2024)
10. Guestrin, C., Koller, D., Parr, R., & Venkataraman, S. (2003). Efficient solution algorithms for factored MDPs. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 19, 399–468. <https://doi.org/10.1613/jair.1000> (accessed: 02.10.2024)
11. Kim, K. H., & Park, Y.-M. (2004). A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal of Operational Research*, 156(3), 752–768. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(03\)00133-4](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(03)00133-4) (accessed: 02.10.2024)
12. Kim, K. H., & Kim, H. B. (2002). The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(9), 821–835. [https://doi.org/10.1016/s0191-2615\(01\)00033-9](https://doi.org/10.1016/s0191-2615(01)00033-9) (accessed: 02.10.2024)
13. Lee, B. K., & Kim, K. H. (2010). Optimizing the block size in container yards. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(1), 120–135. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.07.001> (accessed: 02.10.2024)

Voichenko T.O., Trofymenko A.O., Riashchenko O.I., Lisovskiy S.V.

MODELLING OF THE MANAGEMENT OF TRANSSHIPMENT PROCESSES AT SEAPORT TERMINALS: DEVELOPMENT OF PROPOSALS

The aim of the article is to develop proposals for modelling the management of transshipment processes at seaport terminals to improve the efficiency of their functioning. This goal is achieved by developing a set of various models to formalise the processes of cargo movement at seaport terminals. It has been established that one of the ways to reduce the costs of developing transshipment capacities in seaports and improve their technical and economic indicators may be the introduction of an effective system of coordinating management of technological processes at transport hubs. Therefore, the processes of cargo movement at transport hubs are considered as objects of modelling, which allow finding optimal options for cargo handling and unloading. At the same time, research in the field of management of transshipment processes at seaports has shown that today there is no single solution for the effective management of these processes. The article carries out a systematic analysis of these processes, creates a structure of a goal tree that reflects the goals and functions of the management system, and identifies a set of tasks aimed at reducing complex costs. Through the analysis of transshipment processes in a seaport, a system of criteria was established that reflects the technical characteristics of transshipment complexes and a set of parameters of transshipment processes. A semantic model has also been created that allows to form the subject area of transshipment processes in a seaport and present it in the form of a transshipment process state model that determines the direction of cargo movement within the port and changes in the states of the transshipment process management system. The most significant result is the model of transshipment processes in the seaport terminal. This model allows displaying the direction of cargo movement and modelling the process of transportation within the port, which makes it possible to identify changes in the state of the transshipment management system. In addition, the created model allows identifying possible ways to improve the efficiency of transshipment processes.

Key words: *seaport terminal, management, transshipment, cargo, decomposition, modelling, state model.*

Варбанець Р.А., Мінчев Д.С., Залож В.І.

АНАЛІЗ ЦИКЛОВОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ ДЛЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

У дослідженні представлено методологію оцінки рівномірності роботи суднового дизельного двигуна на основі аналізу параметрів, що розраховуються в режимі реального часу за часовими діаграмами тиску та вібродіаграмами впорскування палива і закриття клапанів. Запропоновано методи експрес-діагностики основних систем двигуна шляхом аналізу серії послідовних робочих циклів. Представлено новий комплексний показник – індекс циклової нерівномірності що забезпечує інтегральну оцінку рівномірності роботи двигуна в режимі реального часу. Для кількісного визначення нерівномірності застосовано дисперсійний аналіз відхилень основних параметрів робочого процесу. Запропоновано критерії оцінки рівномірності процесу впорскування палива та роботи газорозподільного механізму на основі дисперсійного аналізу фронтів вібросигналів. Розроблена методика дозволяє не лише діагностувати нерівномірність робочих циклів, але й оптимізувати налаштування систем двигуна з контролем результатів безпосередньо під час експлуатації. Система діагностики в режимі реального часу забезпечує реєстрацію та обробку сигналів тиску в циліндрі протягом послідовності робочих циклів, що дозволяє виявляти та кількісно оцінювати відмінності параметрів на етапах стиснення та згоряння. Паралельно проводиться числовий аналіз вібродіаграм на ділянках впорскування палива та закриття клапанів. Порівняльний аналіз вібросигналів на етапі стиснення дозволяє виявляти порушення в роботі клапанного механізму, тоді як дослідження вібродіаграм на ділянці згоряння забезпечує діагностику нестабільності функціонування паливної апаратури високого тиску. Практична цінність роботи полягає у створенні комплексної методології оперативної діагностики технічного стану суднового дизельного двигуна, що дозволяє виявляти відхилення в роботі основних систем та своєчасно вживати необхідних коригувальних заходів.

Ключові слова: індекс циклової нерівномірності, дизельний двигун, згоряння палива, робочий процес, діагностика, механізм газорозподілу.

Постановка проблеми. Сучасні суднові дизельні двигуни являють собою складні технічні системи, ефективність роботи яких безпосередньо впливає на експлуатаційні та економічні показники морського транспорту. Одним із ключових викликів в експлуатації цих агрегатів є забезпечення рівномірності робочих циклів, що суттєво впливає на ефективний ККД та потужність силової установки. Так, при дослідженні серії індикаторних діаграм одного циліндра виявляються коливання максимальних тисків згоряння P_{max} , а детальніший аналіз демонструє зміни тисків наприкінці стиснення P_{comp} та варіації середнього індикаторного тиску $IMEP$. Дослідження показують, що циклової зміни не обмежуються окремими точками максимального тиску згоряння чи кінця стиснення, а проявляються вздовж усієї кривої індикаторної діаграми. Така нерівномірність робочого процесу переважно виникає через функціонування двох критично важливих систем двигуна, що відповідають за якість згоряння палива у циліндрі: системою високого тиску подачі палива та системою керування газорозподільними клапанами.

Проблема нерівномірності робочих циклів набуває особливої актуальності в контексті зростаючих вимог до екологічності та енергоефективності морського транспорту. Існуючі системи моніторингу та діагностики робочого процесу дизельних двигунів не забезпечують комплексного підходу до оцінювання варіативності індикаторних діаграм у режимі реального часу, що ускладнює своєчасне виявлення та попередження відхилень у роботі двигуна.

Відсутність ефективних методів оперативної діагностики циклової нерівномірності призводить до зниження ефективного ККД двигуна, збільшення механічних навантажень на його компоненти та підвищення рівня шкідливих викидів. Особливо гостро ця проблема проявляється при роботі двигуна на перехідних режимах та в умовах змінного навантаження, характерних для морської експлуатації.

Існуючі методики оцінювання параметрів робочих циклів зазвичай базуються на аналізі середнього індикаторного тиску та інших усереднених показників, що не дозволяє виявити короточасні відхилення максимальних тисків та локальні нестабільності в роботі окремих циліндрів. Це створює потребу в розробці нових підходів до діагностування, які б забезпечували можливість детального аналізу часових діаграм тиску в режимі реального часу.

Таким чином, актуальним завданням є розробка методів та засобів діагностики нерівномірності робочих циклів судових дизельних двигунів, які дозволять підвищити ефективність їх експлуатації та забезпечити своєчасне виявлення порушень у роботі систем високого тиску подачі палива та керування газорозподільними клапанами.

Зазначені обставини визначають необхідність проведення досліджень, спрямованих на вдосконалення систем діагностування судових дизельних двигунів та розробку нових критеріїв оцінювання нерівномірності робочих циклів в режимі «швидкого сканування».

Метою роботи є розробка критеріїв оцінювання циклової нерівномірності роботи судового дизельного двигуна в режимі реального часу на основі аналізу діаграм тиску в циліндрі та вібродіаграм систем паливоподачі й газорозподілу.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. Проблема нерівномірності робочих циклів дизельних двигунів знаходиться в центрі уваги багатьох дослідників. Аналіз публікацій за останні роки дозволяє виділити основні напрямки досліджень.

Проблема циклічної нерівномірності робочого процесу дизельних двигунів привертає увагу багатьох дослідників. Фундаментальні положення щодо причин виникнення та особливостей прояву нерівномірності робочих циклів викладені в роботі *Heywood J.B.* [1], де автор систематизував основні фактори, що впливають на стабільність робочого процесу.

Longwic R., Sen A.K. та ін. [2] дослідили вплив різних видів палива на характер циклічних коливань. Використовуючи аналіз, автори виявили, що для альтернативних палив характерні стійкі довгоперіодичні коливання, тоді як при роботі на звичайному дизельному паливі такі коливання спостерігаються лише при високих обертах.

Особливості прояву циклічної нерівномірності при роботі на дизельно-етанольних сумішах досліджені *Gürgen S., Ünver B., Altın İ.* [3]. Встановлено, що додавання етанолу призводить до підвищення коефіцієнта варіації середнього індикаторного тиску COV_{imep} .

Вплив альтернативних палив на циклову нерівномірність детально досліджено в роботі *Shi J., Wang T.* та ін. [5]. Автори експериментально довели, що використання синтетичного палива з підвищеним цетановим числом забезпечує зниження циклової нерівномірності на 15..20% порівняно зі звичайним дизельним паливом. В роботі [6] автори *Wang X., Zhao H.* провели моделювання циклової нерівномірності для гібридного двигуна внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням та контрольованим самозайманням.

Wagner R., Edwards K., Daw C.S. [7] запропонували методологію контролю циклової нерівномірності в одноциліндровому бензиновому двигуні зі стехіометричним паливом. Розвиток цього напрямку представлений в роботі *Hunicz J.* [4], де досліджено вплив періоду перекриття клапанів на стабільність робочого процесу.

Методи діагностування циклової нерівномірності розвинуті в роботах *Sen A.K., Litak G.* [8] та *Maurya R.K., Agarwal A.K.* [9]. Авторами запропоновано використання різних методів обробки даних для виявлення характерних особливостей циклових коливань.

Значний внесок у розуміння механізмів циклової нерівномірності внесли дослідження *Koizumi I., Gyakushi N., Takamoto Y.* [10], які встановили, що варіації тиску в циліндрі пов'язані зі

збільшенням періоду затримки займання при холодному пуску двигуна. Zhong L. та ін. [11] спостерігали циклові коливання в паливній системі дизельних двигунів.

Аналіз публікацій показує, що незважаючи на значний обсяг досліджень, проблема діагностування нерівномірності робочих циклів в режимі реального часу залишається актуальною і потребує подальшого вивчення. Особливу увагу слід приділити розробці ефективних методів оцінювання рівномірності роботи двигуна на основі аналізу індикаторних діаграм.

Викладення основного матеріалу.

Нерівномірність робочих циклів значною мірою обумовлена коливаннями в системі подачі палива. Ці коливання проявляються через варіації об'єму впорскуваного палива в кожному циклі, кута випередження подачі палива φ_{adv} , а також змінну тривалість самого процесу впорскування $\Delta\varphi_{inj}$. Подібні коливання призводять до змін ключових робочих параметрів двигуна в кожному циклі. Зокрема, спостерігаються відхилення середнього індикаторного тиску $IMEP$ та індикаторної потужності $IPOWER$, що негативно впливає на експлуатаційні характеристики. При цьому зміни індикаторної потужності циліндра майже прямо пропорційні відсотковому відхиленню циклової подачі палива. В результаті це призводить до посилення вібраційного навантаження та зниження ефективного ККД двигуна.

Вимірювання та аналіз тиску в циліндрі впродовж послідовних робочих циклів дозволяє проводити порівняльну оцінку параметрів на ділянках стиснення та згоряння з подальшою кількісною оцінкою виявлених відхилень.

Аналіз вібродіаграм на ділянках впорскування палива і ділянках закриття клапанів також може бути проведений чисельно. Зіставлення вібродіаграм на етапі стиснення дозволяє визначити ступінь нерівномірності функціонування клапанного механізму. Аналогічне порівняння на етапі згоряння забезпечує оцінку стабільності роботи компонентів паливної апаратури високого тиску.

Діагностування технічного стану двигуна за показником нерівномірності робочих циклів потребує забезпечення сталого навантажувального режиму. Особливість експлуатації суднових дизельних установок полягає у постійній зміні навантаження під впливом зовнішніх факторів. Тому для достовірної оцінки нерівномірності необхідно виділяти інтервали рівномірної роботи з урахуванням інерційності двигуна.

Для аналізу візьмемо серію з m індикаторних діаграм ($j=1..m$), отриманих за умови сталого навантаження головного двигуна $S60MC-C$, див. рис. 1. Максимальний тиск для j -го циклу P_{maxj} та усереднений максимальний тиск за всі m циклів $\overline{P_{max}}$ визначаються як:

$$P_{maxj} = \max(P_{ij}); \quad \overline{P_{max}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_{maxj} \quad (1)$$

де $i=1..N$ – кількість точок в одному циклі при записі індикаторної діаграми; m - кількість записаних циклів; j - індекс циклу.

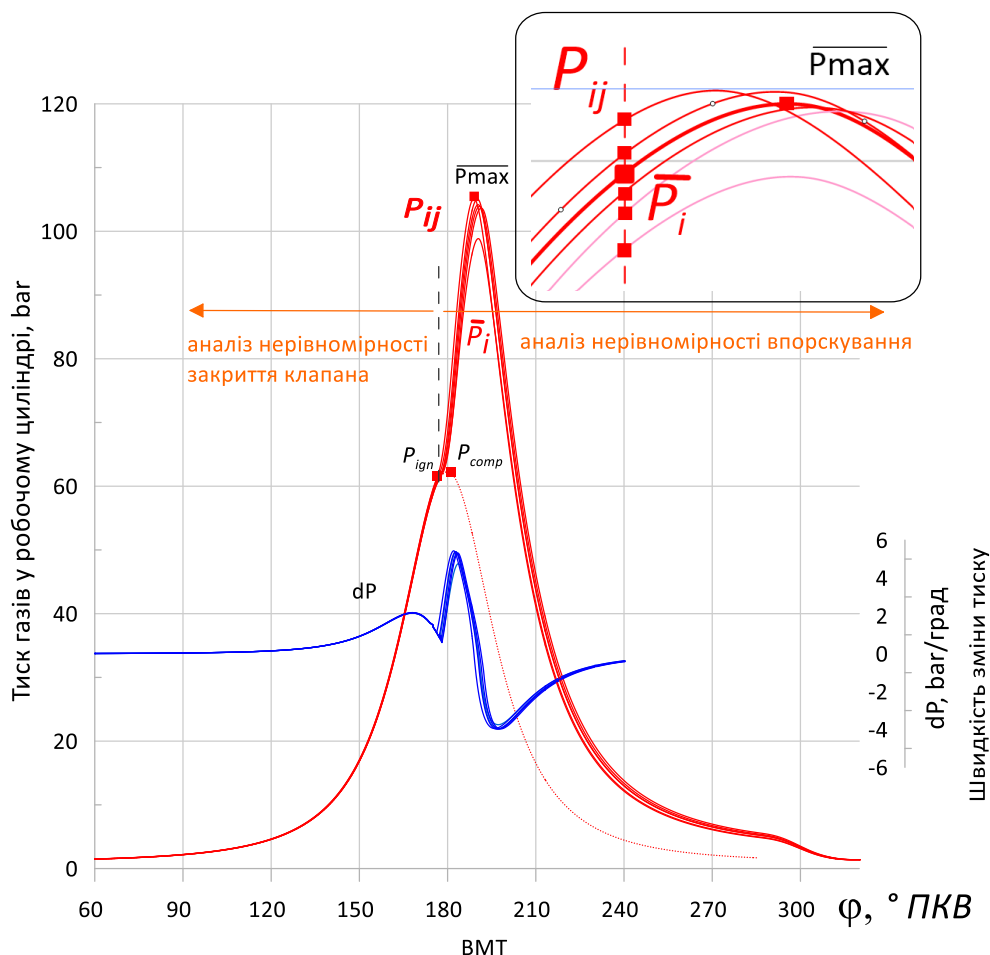


Рисунок 1. Нерівномірність робочих процесів малообертового двигуна S60MC-C на діаграмах тиску

При аналізі нерівномірності робочих циклів застосовується широко визнаний критерій COV – коефіцієнт варіації [8, 12]. Даний критерій дозволяє здійснити оцінку по всій індикаторній діаграмі, формуючи графік значень COV_{P_i} , як оцінку нерівномірності роботи двигуна. Математично коефіцієнт варіації робочих циклів визначається як відсоткове відношення стандартного відхилення до усередненого значення тиску:

$$COV_{P_i} = \frac{\sigma_{P_j}}{P_j} * 100\% \quad (2)$$

Традиційний підхід, описаний в літературі [5], базується на аналізі максимальних значень коефіцієнта варіації $COV_{P_{max}}$. Проте, на нашу думку, комплексний аналіз доцільно розширити дослідженням як поточних значень (що відображається діаграмою COV_{P_i}), так і середніх показників $\overline{COV_{P_j}}$. Діаграма поточних значень COV_{P_i} дозволяє локалізувати ділянки з найбільшими відхиленнями робочих циклів. На основі розташування цих ділянок можна визначити джерело нестабільності – чи то система впорскування палива, чи механізм газорозподілу.

$$COV_{P_{max}} = \max(COV_{P_i}) \%; \quad (4)$$

$$\overline{COV_{P_j}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N COV_{P_i} \%; \quad (5)$$

Для всебічної оцінки циклової нерівномірності двигуна пропонується використання єдиного комплексного показника – індекса нерівномірності робочих циклів за тиском (*cycles irregularity index, CII_p*). Цей критерій забезпечує узагальнену характеристику циклової нерівномірності роботи двигуна:

$$CII_p = \sqrt{\overline{COV_{P_j}} * COV_{P_{max}}}, \% \quad (6)$$

Індекс нерівномірності CII_p представляється у відсотковому вираженні. За результатами порівняльного аналізу теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень (див. рис. 2), цей критерій демонструє свою практичну цінність як ефективний інструмент для інтегральної оцінки міжциклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*).

Порівняльний аналіз трьох діагностичних критеріїв представлено на рис. 3 та в табл. 1. Дослідження охоплює різні типи двигунів: малообертового двотактного *MAN S60MC-C*; чотиритактного суднового головного двигуна *WUXI*; чотиритактного суднового дизель-генератора *Wartsila 16V32* і лабораторних чотиритактних двигунів: *Deutz 226* (2021 року випуску) та *NVD24* (1970 року випуску).

Таблиця 1. Порівняння критеріїв COV та CII_p для п'яти типів двигунів

	<i>6S60MC-C</i>	<i>Wärtsilä 16V32</i>	<i>WUXI</i>	<i>NVD</i>	<i>WeiChai</i>
$\overline{COV_{P_j}} \%$	0.943	0.980	0.852	1.906	0.451
$CII_p \%$	1.822	3.977	3.759	4.778	1.168
$COV_{P_{max}} \%$	3.524	16.142	16.594	11.976	3.025

Результати досліджень виявили суттєві відмінності в показниках циклової нерівномірності досліджуваних двигунів. Зокрема, встановлено високий рівень нерівномірності для лабораторного двигуна *NVD24* з тривалим терміном експлуатації. Натомість новий двигун *WeiChai* (*Deutz 226*) продемонстрував очікувано низькі показники нерівномірності робочих циклів. При цьому всі три критерії оцінки ($COV_{P_{max}}$, $\overline{COV_{P_j}}$ та CII_p) для двигуна *WeiChai* показали значно нижчі значення порівняно з іншими двигунами.

Комплексна оцінка трьох діагностичних критеріїв ($COV_{P_{max}}$, $\overline{COV_{P_j}}$ та CII_p) підтвердила ефективність узагальненого показника CII_p як інтегральної характеристики міжциклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*). Цей показник забезпечує достовірну якісну оцінку рівномірності роботи двигуна під навантаженням та може використовуватися для оперативної діагностики, див. рис. 2.

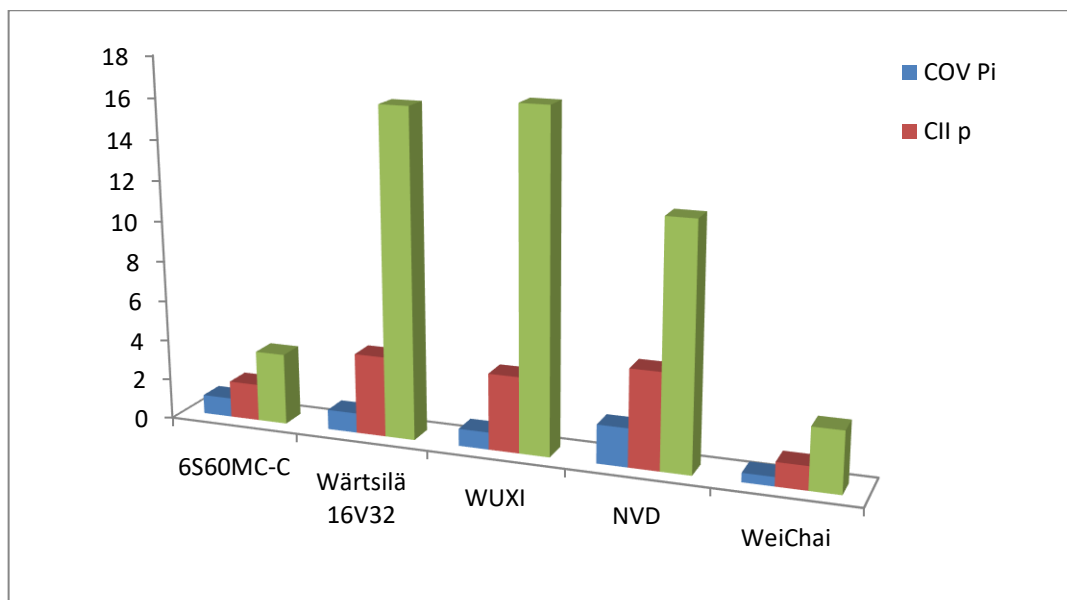


Рисунок 2 – Порівняння критеріїв $COV_{P_{max}}$, $\overline{COV_{P_j}}$ та CII_p (%) для п'яти типів двигунів

Оцінка нерівномірності впорскування палива в циліндр. Аналіз нестабільності процесу впорскування палива в циліндр здійснюється через дослідження фазових характеристик фронтів вібросигналу форсунок. Методологія реєстрації та обробки вібродіаграм форсунок та клапанів газорозподільного механізму детально висвітлена в роботах [13-16].

Одноточна реєстрація сигналів тиску та вібрації з подальшим зіставленням робочих циклів дозволяє визначити дисперсію фазових характеристик – кута випередження впорскування φ_{adv} та тривалості впорскування $\Delta\varphi_{inj}$, див. рис. 3.

На відміну від оцінки міжциклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*) тиску в циліндрі, де використовуються відносні критерії у відсотках, аналіз нерівномірності впорскування палива та роботи механізму газорозподілу потребує абсолютних значень. Такі відхилення вимірюються в кутових градусах повороту колінчастого вала (°ПКВ).

Використання абсолютних значень забезпечує чітку інтерпретацію відхилень фаз впорскування палива між циліндрами. Наприклад, розкид тривалості впорскування $\Delta\varphi_{inj}=3,5$ °ПКВ свідчить про критичну нестабільність процесу, тоді як значення $\Delta\varphi_{inj}=0,3$ °ПКВ вказує на його високу стабільність. Для характеристики циклової нерівномірності кута випередження впорскування застосовується дисперсія відхилень передніх фронтів початкових імпульсів на вібродіаграмах впорскування:

$$\Delta\varphi_{adv} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\varphi_{advj} - \overline{\varphi_{advj}})^2} \quad (7)$$

де m – деяка кількість вібродіаграм ($j=1..m$), φ_{advj} – значення кута випередження впорскування в j -тому циклі, $\overline{\varphi_{advj}}$ – середнє значення кута випередження впорскування.

Аналогічно і для тривалості впорскування палива в циліндр. Циклова нерівномірність тривалості впорскування палива визначається через дисперсію відхилень часових інтервалів між передніми фронтами імпульсів на вібродіаграмах процесу впорскування:

$$\Delta\varphi_{inj} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\varphi_{inj j} - \overline{\varphi_{inj j}})^2} \quad (8)$$

де $\varphi_{inj\ j}$ – тривалість впорскування в j -тому циклі, $\overline{\varphi_{inj\ j}}$ – середня тривалість впорскування.

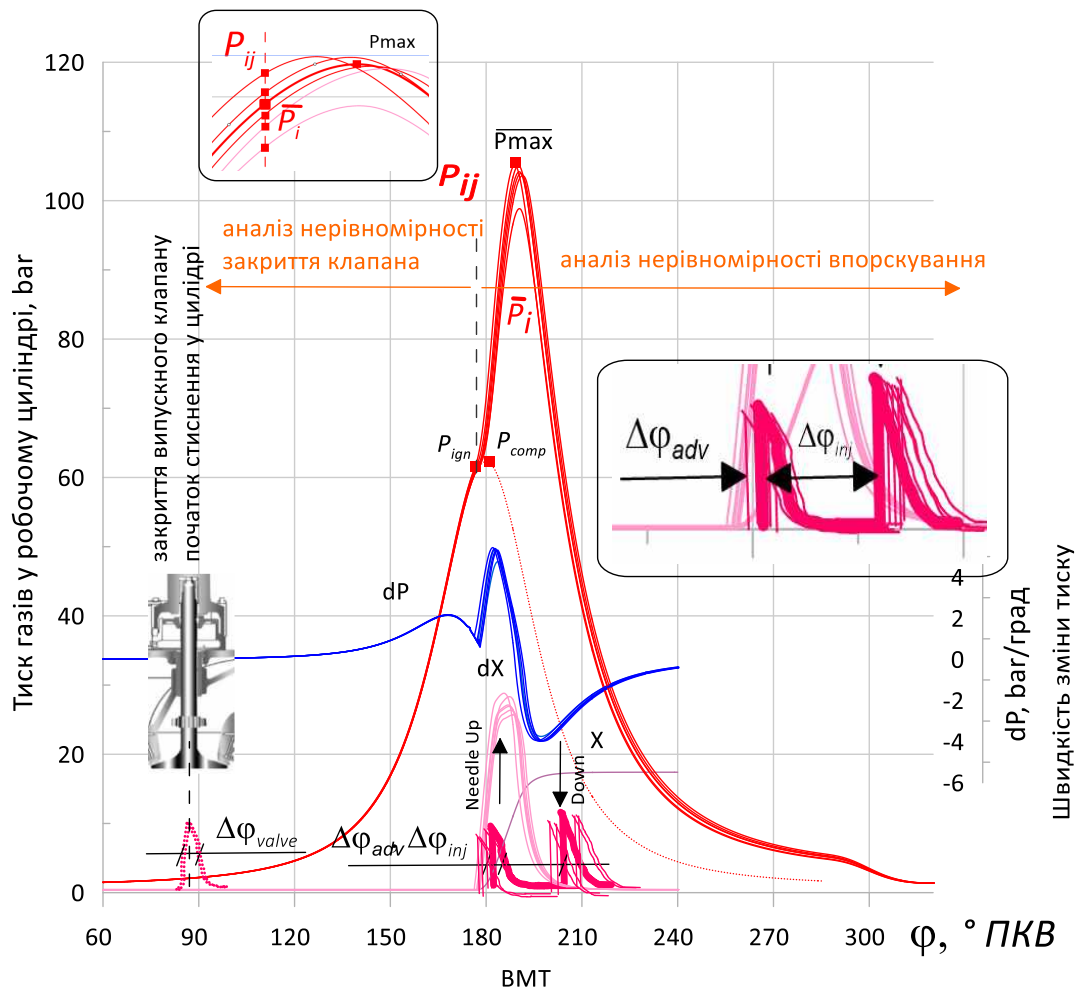


Рисунок 3 – Нестабільність робочих процесів малообертового двигуна *S60MC-C* на діаграмах тиску та вібродіаграмах

Для визначення циклової нерівномірності кутів закриття клапанів застосовується дисперсія відхилень фаз максимумів віброімпульсів клапанів на вібродіаграмах впорскування [5]:

$$\Delta\varphi_{valve} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\varphi_{valvej} - \overline{\varphi_{valvej}})^2} \quad (9)$$

де φ_{valvej} – кут закриття клапана в j -тому циклі, $\overline{\varphi_{valvej}}$ – середнє значення кута закриття клапана. Всі кутові величини вимірюються в градусах повороту колінчастого вала (°ПКВ).

В процесі експлуатації різних моделей двигунів доцільно використовувати систему граничних значень циклової нерівномірності з кольоровим маркуванням (зелений, жовтий, червоний діапазони). Приклад такої системи для двигуна *S60MC-C* наведено на рис. 4, де встановлено граничні значення нерівномірності кута випередження впорскування палива.

$\Delta\varphi_{adv}$

< 0.5 °CA

0.6 ÷ 2.5 °CA

> 2.6 °CA

Рисунок 4 – Візуальний контроль критерію циклової нерівномірності кута випередження
впорскування палива для двигуна *S60MC-C*

Графічне представлення критеріїв міжциклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*) у реальному часі забезпечує зручність експлуатаційного контролю на етапі до вирішення завдання синхронізації даних.

Висновки. Розрахунок критеріїв циклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*) можливий у режимі реального часу шляхом аналізу часових діаграм до етапу синхронізації даних (тобто до перетворення даних тиску в циліндрі з функції часу у функцію кута повороту колінчастого вала). Режим діагностики суднових двигунів у реальному часі надає суттєві переваги, забезпечуючи можливість безперервного аналізу функціонування циліндро-поршневої групи, паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу безпосередньо в експлуатаційних умовах. Такий підхід дозволяє здійснювати точне регулювання вказаних механізмів та верифікувати ефективність налаштувань під час роботи двигуна.

Для всебічної оцінки стабільності роботи двигуна у режимі реального часу запропоновано критерій циклової нерівномірності (CII_p , %), що виступає як комплексний діагностичний критерій. Нерівномірність роботи паливної апаратури та механізму газорозподілу оцінюється за допомогою критеріїв, що базуються на дисперсійному аналізі фронтів вібродіаграм.

Здатність проводити безперервний аналіз циклової нерівномірності надає принципово нові діагностичні можливості порівняно з поширеними в морській галузі системами відкладеного діагностичного аналізу. Такий підхід забезпечує негайне виявлення відхилень у роботі двигуна та дозволяє оперативно вживати необхідних коригувальних заходів, що суттєво підвищує надійність експлуатації суднових енергетичних установок.

REFERENCES

1. Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Education.
2. Longwic, R., Sen, A. K., Górski, K., Lotko, W., & Litak, G. (2011). Cycle-to-cycle variation of the combustion process in a diesel engine powered by different fuels. *Journal of Vibroengineering*, 13(1), 120-127. URL: <https://www.extrica.com/article/10448>.
3. Gürgen, S., Ünver, B., & Altın, İ. (2016). Experimental Investigation of Cyclic Variations in Diesel Engine Using Ethanol-Diesel Fuel Blends. In *Proceedings of The Second Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation*, 729-734.
4. Hunicz, J. (2014). On Cyclic Variability in a Residual Affected HCCI Engine with Direct Gasoline Injection during Negative Valve Overlap. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 359230, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/359230>.
5. Shi, J., Wang, T., Zhao, Z., Wu, Z., & Zhang, Z. (2019). Cycle-to-Cycle Variation of a Diesel Engine Fueled with Fischer-Tropsch Fuel Synthesized from Coal. *Applied Sciences*, 9, 2032-2045. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102032>.
6. Wang, X., & Zhao, H. (2022). Modelling Study of Cycle-To-Cycle Variations (CCV) in Spark Ignition (SI)-Controlled Auto-Ignition (CAI) Hybrid Combustion Engine by Using Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) and Large Eddy Simulation (LES). *Energies*, 15(12), 4478. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124478>.
7. Wagner, R., Edwards, K., & Daw, C. S. (2006). On the Nature of Cyclic Dispersion in Spark Assisted HCCI Combustion (SAE Technical Paper No. 2006-01-0418). SAE International. DOI: <https://doi.org/10.4271/2006-01-0418>.
8. Sen, A. K., Litak, G., Taccani, R., & Radu, R. (2008). Wavelet analysis of cycle-to-cycle pressure variations in an internal combustion engine. *Chaos, Solitons & Fractals*, 38(3), 886-893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2007.01.041>.

9. Maurya, R. K., & Agarwal, A. K. (2013). Experimental investigation of cyclic variations in HCCI combustion parameters for gasoline like fuels. *Applied Energy*, 111, 310-323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.002>.
10. Koizumi, I., Gyakushi, N., & Takamoto, Y. (1977). Study on the cycle-by-cycle variation in diesel engines. *Bulletin of JSME*, 20, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsme1958.20.869>.
11. Zhong, L., Singh, I. P., & Han, J. (2003). Effect of Cycle-to-Cycle Variation in the Injection Pressure in a Common Rail Diesel Injection System on Engine Performance (SAE Technical Paper No. 2003-01-0699). SAE International. DOI: <https://doi.org/10.4271/2003-01-0699>.
12. Wang, Y., Xiao, F., Zhao, Y., Li, D., & Lei, X. (2015). Study on cycle-by-cycle variations in a diesel engine with dimethyl ether as port premixing fuel. *Applied Energy*, 143, 58-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.079>.
13. Minchev, D., Varbanets, R., Zalozh, V., Ahiev, M., & Psariuk, S. (2023). Improvement of the fuel combustion model in a digital twin application for diesel engines. *Transport Development*, 4(19), 108-124. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.09>.
14. Minchev, D., Varbanets, R., Aleksandrovska, N., & Pisintsaly, L. (2021). Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues. *Acta Polytechnica*, 61(3), 428-440. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435>.
15. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., Zalozh, V., Kyrylash, O., & Tarasenko, T. (2024). Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*, 31(3), 71-84. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>.
16. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., & Zalozh, V. (2024). Real-time parametric diagnostics of marine diesel engines. *Internal Combustion Engines*, 1(2024), 69-75. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>.

Varbanets R., Minchev D., Zalozh V.

REAL-TIME ANALYSIS OF CYCLE-TO-CYCLE VARIATIONS FOR MARINE DIESEL ENGINES

This study presents a methodology for assessing marine diesel engine operational stability based on real-time analysis of parameters calculated from pressure and vibro diagrams. Methods for rapid diagnostics of main engine systems through the analysis of consecutive working cycles are proposed. A new comprehensive indicator - the Cycle Irregularity Index (CII) - has been developed, providing an integrated assessment of engine operational stability in real-time. Variance analysis of key operating process parameters' deviations is employed for quantitative determination of irregularity. The study proposes criteria for evaluating the stability of fuel injection process and valve timing mechanism based on dispersion analysis of vibration signal fronts. The developed methodology not only enables diagnostics of cycle-to-cycle variations but also allows optimization of engine systems settings with immediate performance monitoring during operation. The real-time diagnostic system provides recording and processing of in-cylinder pressure signals throughout a sequence of working cycles, enabling detection and quantitative assessment of parameter variations during compression and combustion phases. Simultaneously, numerical analysis of vibro diagrams is performed at fuel injection and valve closure intervals. Comparative analysis of vibration signals during the compression phase enables detection of valve gear malfunctions, while examination of vibration diagrams during the combustion phase provides diagnostics of high-pressure fuel equipment instability. The practical value of this work lies in developing a comprehensive methodology for operational diagnostics of marine diesel engine technical condition, enabling detection of deviations in main systems' operation and timely implementation of necessary corrective measures.

Keywords: cycle irregularity index, diesel engine, fuel combustion, working process, diagnostics, valve timing mechanism.

Врублевський Р.Є.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОГОДНИХ УМОВ НА ВМІСТ АЛЮМОСИЛІКАТІВ В СУДНОВОМУ ПАЛИВІ

У сучасних умовах судноплавства наявність алюмосилікатів у судновому паливі становить значну проблему, що впливає на надійність та ефективність роботи суднових двигунів. Збільшення концентрації цих частинок, особливо в епоху використання низькосірчистого пального, створює значні експлуатаційні та економічні виклики для судновласників та операторів. Використання ефективних систем підготовки пального, зокрема сепараторів, сучасних фільтраційних технологій та інтеграції систем автоматичного моніторингу, є необхідним для забезпечення стабільної роботи двигунів і зменшення ризиків пошкодження. Системи очищення та контролю за вмістом алюмосилікатів в судновому паливі не завжди справляються з цією задачею а особливо в умовах несприятливих погодних умов.

Незважаючи на численні дослідження, вплив погодних умов на ефективність очищення пального досі не отримав належної уваги. З метою усунення цього пробілу та глибшого розуміння механізмів впливу погодних факторів на рівень забруднення пального, було вирішено провести експеримент у реальних умовах експлуатації судна. Цей підхід дозволяє не лише кількісно оцінити наявність алюмосилікатів у паливі, але й дослідити динаміку їх змін залежно від погодних умов.

Експеримент доводить що аномально високі рівні алюмосилікатів та інших твердих домішок у паливі спричинені потраплянням домішок із дна танків через коливання та перемішування під час хитаючи або різких маневрів у несприятливих погодних умовах. Результати нашого дослідження можуть стати основою для вдосконалення систем очищення пального та впровадження систем візуального контролю за вмістом алюмосилікатів у паливі в режимі реального часу, що дозволить оперативно відстежувати рівень забруднень та мінімізувати їхній негативний вплив.

Ключові слова: дослідження, погодні умови, алюмосилікати, суднове паливо.

Вступ. У сучасних умовах судноплавства наявність алюмосилікатів у судновому паливі становить значну проблему, що впливає на надійність та ефективність роботи суднових двигунів. Збільшення концентрації цих частинок, особливо в епоху використання низькосірчистого пального, створює значні експлуатаційні та економічні виклики для судновласників та операторів. Використання ефективних систем підготовки пального, зокрема сепараторів, сучасних фільтраційних технологій та інтеграції систем автоматичного моніторингу, є необхідним для забезпечення стабільної роботи двигунів і зменшення ризиків пошкодження. Системи очищення та контролю за вмістом алюмосилікатів в судновому паливі не завжди справляються з цією задачею а особливо в умовах несприятливих погодних умов.

Постановка проблеми. Як було зазначено вище, проблема забруднення суднового пального алюмосилікатами залишається надзвичайно актуальною для сучасної морської індустрії. Незважаючи на численні дослідження, вплив погодних умов на ефективність очищення пального досі не отримав належної уваги. З метою усунення цього пробілу та глибшого розуміння механізмів впливу погодних факторів на рівень забруднення пального, ми вирішили провести експеримент у реальних умовах експлуатації судна. Цей підхід дозволяє не лише кількісно оцінити наявність алюмосилікатів у паливі, але й дослідити динаміку їх змін залежно від погодних умов. Результати нашого дослідження можуть стати основою для вдосконалення систем очищення пального.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнім часом у відповідь на проблему забрудненого пального та більш жорсткі вимоги до якості пального галузь пропонує різні рекомендації. Серед них – використання дрібнокомірчастих фільтрів із розміром комірки 10 мкм, які допомагають значно знизити вміст забруднень у паливі [13]. Суднове нафтове паливо

представлено кількома марками, які можуть відрізнятися за своїми характеристиками. Деякі з цих характеристик можуть змінюватися під час підготовки пального на борту судна, що потребує надійно спроектованої системи очищення [7]. Підготовка пального зазвичай здійснюється через використання комбінації сепараторів, фільтрів і відстійників. Під час бункерування паливо закачується в резервуари, звідки воно перекачується у відстійники, що забезпечують 24–48 годин роботи судна. За цей час частки осідають на дно резервуарів. Однак під час роботи судна або при використанні тарілчастого сепаратора каталітичні частинки можуть не встигати осідати через недостатній час перебування в потоці [2, 13]. Тому для мінімізації ризиків рекомендується регулярно зливати осад із відстійних та видаткових танків [8]. Сепаратори, також відомі як очисники, забезпечують основну фазу очищення пального. Вони видаляють воду, великі частки та інші забруднення. Сучасні сепаратори здатні видаляти майже 100% каталітичних частинок розміром понад 15 мкм за умови правильної експлуатації. Проте дрібніші частинки, розміром менше 3 мкм, часто залишаються в паливі навіть при оптимальних налаштуваннях [1-6]. Щільність, в'язкість, температура пального та швидкість потоку є критично важливими факторами, що визначають ефективність сепараторів. Використання низькосірчистого пального, яке стало основним із 2020 року, внесло додаткові виклики, оскільки різні марки пального потребують адаптації параметрів сепараторів для збереження їх ефективності [14]. Додатковою складністю є те, що низькосірчисте паливо часто має гірші змащувальні властивості, що підвищує ризик абразивного зносу двигунів [10-12]. Це вимагає від екіпажу глибшого розуміння процесів підготовки пального, щоб знизити ризики для двигунів та забезпечити їхню стабільну роботу [7-9]. Регулярне технічне обслуговування, правильне використання сепараторів і постійний моніторинг якості пального є ключовими заходами для мінімізації ризиків, пов'язаних із забрудненням пального [3, 13]. Швидкість потоку пального через сепаратор безпосередньо впливає на ефективність його очищення. Простими словами, зменшення швидкості потоку дозволяє центрифугі більше часу для видалення забруднень, підвищуючи ефективність сепарації [1, 7]. Традиційно потік встановлювався на рівні, що відповідає 100% максимального споживання пального двигуном із запасом потужності. Однак сучасні умови експлуатації, такі як практика "малих ходів", коли судна працюють із меншою потужністю, створюють можливість знизити витрату пального, оптимізувавши параметри сепарації [14-16]. Зростаючий рівень каталітичних частинок у бункерному паливі, особливо після введення низькосірчистих палив у 2020 році, викликає занепокоєння. Нові властивості паливних сумішей і змішування різних видів пального значно ускладнюють процес розділення. Алюмосилікати залишаються постійною проблемою, яка потребує ретельного тестування кожної партії пального, щоб запобігти можливим пошкодженням двигунів [7, 13]. Окрім забруднень, стабільність і сумісність нових паливних сумішей також є критичними параметрами, що впливають на ефективність роботи сепараторів. Несумісність може призводити до утворення шламу, що ускладнює процес сепарації та викликає проблеми у машинному відділенні [10]. Для підтримання оптимальної ефективності сепарації важливо контролювати робочі параметри, такі як температура та швидкість потоку, які визначають в'язкість і щільність пального [1, 2]. Використання безперервного управління витратою пального дозволяє адаптувати роботу сепараторів до реальних умов експлуатації. Крім того, у випадках змішаного використання сепараторів рекомендується паралельна робота резервних систем для зменшення навантаження на кожен сепаратор і підвищення якості очищення [3]. Практика "малих ходів" стала популярною серед контейнеровозів та інших трансокеанських вантажних суден. Робота на нижчій за максимальну швидкості дозволяє зменшити витрату пального, підвищити ефективність сепарації та водночас знизити витрати на обслуговування систем очищення [14, 18]. Ця стратегія, поєднана з належним моніторингом якості пального, є ефективним інструментом для запобігання пошкодженням двигунів та підтримання їхньої продуктивності в умовах сучасного судноплавства [2, 8]. Фільтри є ключовим елементом у системі підготовки пального, доповнюючи функціонал сепараторів. Після проходження через сепаратори паливо надходить до видаткового резервуара, а перед подачею в двигун проходить через фільтри, які служать останнім захисним бар'єром. Вони захоплюють залишкові частинки, які могли пройти через сепаратор або були перенесені потоком далі по системі. Зниження тиску у фільтрах може вказувати на низку проблем, зокрема некоректну роботу сепаратора або забруднене бункерне

паливо [7, 13]. Сучасні системи фільтрації включають використання дрібнокомірчастих фільтрів із розміром комірок до 10 мкм із функцією автоматичного зворотного промивання. Це підвищує ефективність видалення частинок і дозволяє краще адаптуватися до умов експлуатації [1]. Існують два основні типи фільтрації: глибинна та поверхнева. У глибинній фільтрації частинки затримуються всередині фільтруючого матеріалу, що потребує його регулярної заміни. Поверхнева фільтрація передбачає затримання частинок на поверхні дрібнокомірчастої сітки, яка може очищатися автоматично [8].

Ефективність системи фільтрації залежить не лише від конструктивних особливостей, але й від регулярного технічного обслуговування. Екіпажі повинні проводити тестування пального на борту судна та в лабораторіях, щоб врахувати особливості нових видів пального, які можуть містити більше забруднень, таких як алюмосилікати [15]. Регулярне очищення танків і сепараторів є критично важливим, особливо в умовах неспокійного моря, яке може перемішати осад і переважати системи сепарації [2]. Для моніторингу кількості алюмосилікатів у паливі використовуються спеціалізовані тест-набори. Наприклад, Cat Fines Check (рис. 1) дозволяє швидко оцінити вміст частинок у залишковому паливі безпосередньо на місці. Це дає змогу екіпажу оперативно перевіряти зразки пального до та після сепарації, а також перед подачею в двигун. Такий підхід допомагає знизити ризики абразивного зносу, забезпечуючи стабільну роботу двигуна [19]. Виявлення таких проблем, як падіння тиску або зниження ефективності роботи двигуна, може свідчити про присутність алюмосилікатів або інших забруднень у паливі. Негайна реакція на ці ознаки дозволяє уникнути серйозних пошкоджень і скоротити експлуатаційні витрати [3, 7].



Рисунок 1 – Центрифуга та мікроцентрифужні пробірки з різним вмістом алюмосилікатів з тест-набору Cat Fines Check [36]

Відповідні зразки НФО готуються і розбавляються в скляних флаконах. Після цього пластикові мікроцентрифужні пробірки заповнюються отриманою сумішшю зі скляних флаконів і реагентом. Мікроцентрифужні пробірки поміщаються в центрифугу в паралельному положенні (при непарній кількості пробірок необхідно використовувати заповнену пластикову пробірку для балансування центрифуги). Рекомендується промаркувати кожну мікроцентрифужну пробірку, щоб знати, який зразок НФО контролюється. Через 10 хвилин зразки можна вийняти з центрифуги, і результати стануть видимими — можна оцінити рівень присутності алюмосилікатів. Приклад показує ступінь наявності алюмосилікатів у мазуті до і після сепарації. Візуальну кількісну оцінку можна провести за допомогою порівняльної таблиці, що входить до складу набору [17]. Виробники суднового обладнання активно працюють над вирішенням проблеми високого вмісту алюмосилікатів у судновому паливі. Компанії Alfa Laval та Wesfalia, які є світовими лідерами у виробництві обладнання для підготовки пального, пропонують передові технічні рішення. Зокрема, Wesfalia розробила установку Wesfalia Cat Fines Master, тоді як Alfa Laval презентувала цілий ряд високоефективних систем для обробки пального [1, 7]. Однією з головних проблем сучасних суден є робота систем підготовки пального на максимальній потужності навіть при невеликих навантаженнях, наприклад, під час роботи "на малих ходах". Alfa Laval вирішує це питання через об'єднання компонентів у єдину лінію підготовки пального та їх адаптацію до фактичного навантаження двигуна. Використання системи управління насосами FlowSync дозволяє регулювати витрати пального в сепараторах відповідно до поточного навантаження. Це не тільки знижує

енергоспоживання насосів і сепараторів, але й підвищує ефективність очищення пального, зменшуючи ризик потрапляння каталітичних частинок у двигун [2, 3]. Сепаратори Alfa Laval на базі технології Alcap™ здатні обробляти більш щільні види пального (до 1010 кг/м³ при 15 °C) без використання гравітаційного диска, що розширює їх функціональні можливості. Завдяки спеціальним конструктивним рішенням ці сепаратори працюють з широким діапазоном палив без додаткового регулювання, забезпечуючи більш ефективне відокремлення частинок з низькою швидкістю осадження [7, 13]. Додатковим фактором підвищення ефективності сепарації є температура пального, яка прямо впливає на його в'язкість. Вища температура знижує в'язкість пального, що покращує його розподіл у барабані сепаратора, дозволяючи видаляти навіть дрібні частинки [2, 10]. Завдяки цим технічним удосконаленням системи підготовки пального можуть ефективніше очищувати паливо, адаптуючись до сучасних викликів судноплавної галузі, таких як збільшений вміст алюмосилікатів і різноманітність видів пального [12].

Формулювання цілей статті. Дослідити в реальних умовах судна зміну концентрації алюмосилікатів при несприятливих погодних умовах та проаналізувати вплив алюмосилікатів на паливну апаратуру та апаратуру системи очищення палива.

Основні результати дослідження. У даному дослідженні ми використовували прилад MobilServ CCM Kit, спеціально розроблений для швидкої та ефективної оцінки вмісту частинок у залишкових паливних сумішах. Mobil Serv CCM Kit – це сучасна система аналізу мастильних та паливних матеріалів, що дозволить нам оперативно отримувати дані про стан палива та мастила безпосередньо на борту судна. Ця система допомагає виявляти проблеми, такі як недостатнє або надмірне змащення, знос компонентів і наявність каталітичних залишків, що сприяє оптимізації подачі циліндрового мастила та зменшенню експлуатаційних витрат. Аналізи проводяться у кілька етапів. Зразок збирається у чисту пластикову пляшку з комплекту, щоб гарантувати точність результатів. Далі, зразки реєструються за допомогою технології "scan-and-go", яка прискорює процес та підвищує точність введення даних. Після реєстрації зразки піддаються аналізу з використанням рентгенофлуоресцентної технології (XRF), яка дозволяє виявити вміст металів і визначити концентрацію алюмосилікатів, що є особливо важливо для уникнення абразивного зносу двигуна. Результати аналізу стають доступними протягом кількох хвилин після обробки. Отримані дані включають детальний звіт з рекомендаціями щодо подальшої оптимізації подачі мастила та інших параметрів для підвищення ефективності роботи двигуна. Однією з головних переваг Mobil Serv CCM є можливість проведення аналізу на вміст алюмосилікатів, які є критично небезпечними для двигунів через абразивні властивості. Визначення та моніторинг рівня алюмосилікатів допомагають запобігати серйозним ушкодженням і підтримувати належну роботу судових систем. Маючи таку систему на борту було вирішено провести експеримент та отримати розуміння щодо впливу погодних умов на ефективність очищення пального. Експеримент проводився протягом 27 днів на суховантажному судні «ST-CERGUE» з дедвейтом 60 696 тонн, обладнаному двотактним малооборотним двигуном Wartsila 6RT-flex50-D. Пальне типу VLSFO було забункеровано в порту Слускіл, Нідерланди (рис. 2).

Згідно з Bunker Delivery Note, вміст сірки в паливі становив 0,48%, тоді як вміст алюмосилікатів зафіксовано на рівні 57 ppm. Після отримання аналізів зразків пального від лабораторії VPS, було виявлено підвищений вміст алюмосилікатів та мікробактерій. Рекомендована температура сепарації для забезпечення оптимальної роботи обладнання становить 78°C. Варто зазначити, що останнє очищення паливних танків проводилося 9 місяців тому, що підкреслює необхідність регулярного технічного обслуговування та моніторингу стану паливних резервуарів.



Рисунок 2 – Процес аналізу зразків палива за допомогою приладу MobilServ CCM Kit

Отримані результати дозволили нам виявити закономірності, які можуть бути використані для оптимізації роботи паливного фільтруючого обладнання. Це, в свою чергу, сприятиме зниженню витрат на експлуатацію суден і покращенню загальної ефективності системи підготовки пального.

Експеримент розпочався 1 вересня 2024 року. Результати експерименту відображено на рис. 3. Проби пального бралися щодня протягом 27 днів о 10:00. Перші три дні, з 1 по 3 вересня, характеризувалися спокійними погодними умовами: на судні не було хитавиці, і його рух залишався стабільним. Вміст алюмосилікатів у пробах після сепарації залишався в межах допустимих норм, а продуктивність сепараторів становила 1200 літрів на годину.

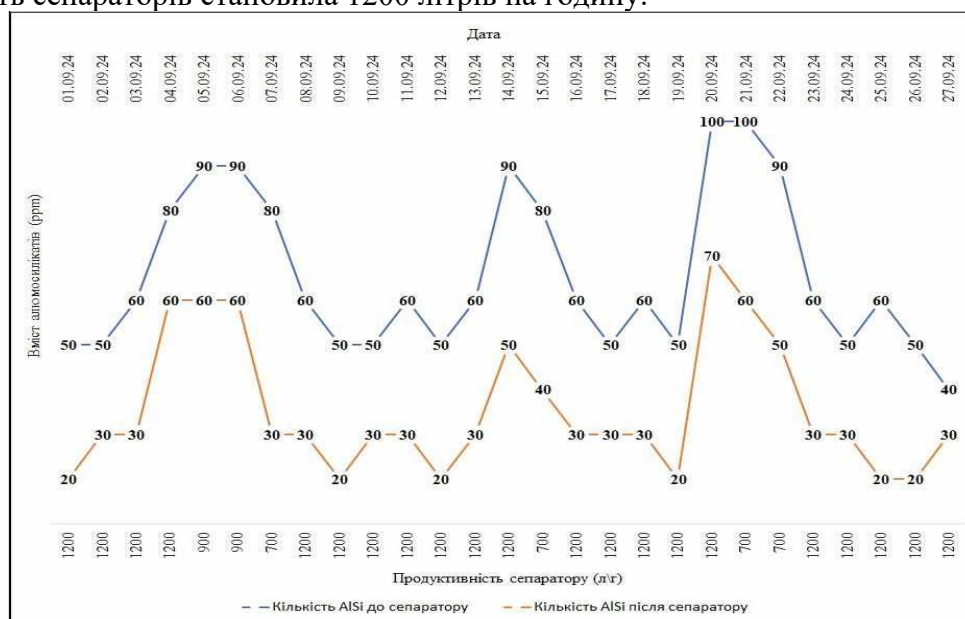


Рисунок 3 – Графік отриманий з результатів дослідження кількості алюмосилікатів до та після сепаратору та його продуктивність впродовж експерименту.

Однак з 4 вересня погодні умови почали погіршуватися, з'явилася хитавиця, що вплинуло на вміст алюмосилікатів у пробах пального. Як видно на рис. 3, вміст частинок у пробах пального до і після сепаратора почав зростати. У відповідь на це було прийнято рішення зменшити продуктивність сепаратора до 900 літрів на годину. Проте, як показав графік, суттєвих змін не відбулося, а, навпаки, ситуація дещо погіршилася. Протягом періоду з 5 по 6 вересня ситуація

залишалася стабільною. 7 вересня хитавиця дещо зменшилася, і було ухвалено рішення про подальше зниження продуктивності сепаратора до 700 літрів на годину. Після відбору проб і проведення аналізу виявлено позитивні зміни: замість 60 ppm, які спостерігалися протягом попередніх трьох днів, після зниження продуктивності та покращення погодних умов на виході з сепаратора зафіксовано 30 ppm. З 8 по 13 вересня на судні панували спокійні погодні умови, хитавиця була практично відсутня, і судно рухалося без різких маневрів. Проте 14 вересня судно змінило курс, і хитавиця відновилася. Як можна помітити на графіку, вміст алюмосилікатів на вході в сепаратор підвищився до 90 ppm, а на виході — до 50 ppm, що свідчить про проблеми з якістю пального. У зв'язку з цим було знову ухвалено рішення про зниження продуктивності до 700 літрів на годину. 15 вересня хитавиця продовжувалася, і аналіз проб показав зниження вмісту до 80 ppm на вході в сепаратор та до 40 ppm на виході. Протягом періоду з 16 по 19 вересня спостерігалися спокійні погодні умови; хитавиця відсутня, судно рухалося без різких маневрів, а продуктивність сепаратора становила 1200 літрів на годину.

Аналіз проб демонстрував 60-50 ppm на вході та 30-20 на виході з сепаратора. 20 вересня почався потужний шторм, що викликав значну хитавицю. Як видно на рис. 3, відбулося значне збільшення вмісту твердих домішок: аналіз показав 100 ppm на вході та 70 ppm на виході. У зв'язку з цим було прийнято рішення знову знизити продуктивність сепаратора до 700 літрів на годину. 21 вересня аналіз показав незначне поліпшення ситуації: на вході в сепаратор вміст домішок залишився сталим на рівні 100 ppm, а на виході зменшився до 60 ppm. 22 вересня погодні умови та продуктивність сепаратора залишалися сталими, знову спостерігалися умови шторму та продуктивність 700 л/г. Аналіз проб показав 90 ppm на вході та 50 ppm на виході, що свідчить про невелике покращення — рівень алюмосилікатів зменшився на 10 ppm. З 23 по 27 вересня спостерігалася спокійна погода, а продуктивність сепаратора знову становила 1200 л/г. Аналіз проб показав 60-50 ppm на вході в сепаратор та 30-20 на виході. 27 вересня 2024 року експеримент був завершено, і результати дослідження стали основою для нашої подальшої оптимізації процесів підготовки пального.

Згідно з оглядом результатів експерименту рис. 3, можна зробити висновок, що в умовах хитавиці та частих різких поворотів судна спостерігається підвищення рівня алюмосилікатів та важких домішок у паливі. Важливо відзначити, що хоча зменшення продуктивності роботи сепаратора позитивно впливає на кількість важких домішок і алюмосилікатів в очищеному паливі, їх рівень все ще залишається значно вищим за рекомендовані заводом-виробником норми, які складають 15 ppm. Також варто зазначити, що під час аномально високих показників наявності алюмосилікатів та інших твердих домішок фільтруючі елементи автоматичного паливного фільтра зазнавали значного забруднення (рис. 4).



Рисунок 4 – Автоматичний фільтр після 2 годин роботи при високому рівні алюмосилікатів в паливі (Джерело: фотографії з судового архіву).

У звичайних умовах роботи фільтр проходив промивку 6-8 разів на добу. Однак у період підвищення рівня алюмосилікатів, коли спостерігалася хитавиця, фільтр почав промиватися 30-40 разів на добу. Це призвело до багаторазової безрезультатної промивки та продувки фільтруючих елементів, а також до значної перевитрати пального.

Варто підкреслити, що короткий проміжок часу, доступний для обслуговування касет з фільтруючими елементами, є критично недостатнім для проведення якісної заміни на запасний набір. Також слід зазначити, що 25 вересня 2024 року на допоміжному дизель-генераторі №3, який залишався єдиним працюючим генератором під час рейсу та експерименту, спостерігалися проблеми. Планова моточистка генератора була завершена 27 серпня 2024 року, а загальний час роботи після моточистки становив 289 годин. Протікання з паливної системи стали постійними, що свідчило про порушення герметичності паливних насосів (рис. 5). Це стало ще однією ознакою того, що система паливopідготовки потребує вдосконалення для запобігання подібним ситуаціям у майбутньому.



Рисунок 5 – Стан паливних насосів під час інспекції (Джерело: фотографії з судового архіву).

Розбірка також виявила наявність абразивного зносу у вигляді подряпини на всій довжині втулки, а також абразивний знос компресійних кілець. Також ми зафіксували погіршення стану хону циліндрів, відзначивши наявність неглибоких слідів абразивного зносу на поверхнях втулок і компресійних кілець у циліндрах 1, 2 та 6 (рис. 6). Це свідчить про серйозні проблеми з якістю пального або ефективністю його очищення, які могли спричинити підвищений знос. Інспекція паливних насосів виявила аномальний знос прецизійних пар насосів. Це свідчить про те, що проблеми з якістю пального могли також вплинути на роботу паливних насосів, приводячи до підвищеного зносу їх компонентів.



Рисунок 6 – Циліндрові втулки під час інспекції (Джерело: фотографії з судового архіву)

Таким чином, результати проведеної нами ревізії вказують на необхідність термінових заходів для покращення системи підготовки пального та зниження ризиків, пов'язаних із абразивним зносом і забрудненням, що негативно впливають на роботу двигуна.

Висновок. Підсумовуючи результати експерименту, можна зробити висновок, що аномально високі рівні алюмосилікатів та інших твердих домішок у паливі можуть бути спричинені потраплянням домішок із дна танків через коливання та перемішування під час хитаючи або різких маневрів у несприятливих погодних умовах. Системи обробки пального, такі як сепаратори та штатні автоматичні фільтри, не завжди здатні забезпечити ефективну очистку через надмірну

кількість забруднень, що призводить до перевитрат пального та підвищеного зносу ключових компонентів двигуна, зокрема втулок, компресійних кілець та прецизійних пар паливних насосів. Результати нашого дослідження можуть стати основою для вдосконалення систем очищення пального та впровадження систем візуального контролю за вмістом алюмосилікатів у паливі в режимі реального часу, що дозволить оперативно відстежувати рівень забруднень та мінімізувати їхній негативний вплив.

Vrublevskyi R.

A STUDY OF THE INFLUENCE OF WEATHER CONDITIONS ON THE ALUMINOSILICATE CONTENT IN MARINE FUEL

In today's maritime industry, the presence of aluminosilicates in marine fuel poses a significant challenge, affecting the reliability and efficiency of marine engines. The increasing concentration of these particles, especially in the era of low-sulfur fuel, creates significant operational and economic challenges for ship owners and operators. The use of effective fuel treatment systems, such as separators, advanced filtration technologies, and integrated automatic monitoring systems, is necessary to ensure the stable operation of engines and reduce the risk of damage. However, fuel cleaning and monitoring systems for aluminosilicate content in marine fuel do not always cope with this task, especially in adverse weather conditions.

Despite numerous studies, the impact of weather conditions on the effectiveness of fuel cleaning has not received adequate attention. To address this gap and gain a deeper understanding of the mechanisms by which weather factors affect fuel contamination levels, it was decided to conduct an experiment under real ship operating conditions. This approach allows not only to quantitatively assess the presence of aluminosilicates in the fuel but also to study the dynamics of their changes depending on weather conditions.

The experiment proves that abnormally high levels of aluminosilicates and other solid impurities in the fuel are caused by the ingress of impurities from the bottom of the tanks due to sloshing and mixing during rolling or sharp maneuvers in adverse weather conditions. The results of our research can serve as a basis for improving fuel cleaning systems and implementing real-time visual monitoring systems for aluminosilicate content in fuel, which will allow for the timely tracking of contamination levels and minimizing their negative impact.

Key words: research, weather conditions, aluminosilicates, marine fuel

ЛІТЕРАТУРА

1. Alfa Laval, 2019. Centrifugal Separators: S Flex Modules. Available from: Alfa Laval.
2. Barczak, M., & Pawlowski, L., 2019. Reduction of Catalytic Fine Particles in Marine Fuels. *Energy Procedia*, 142, pp. 1137-1144.
3. Fink, R., & Schmidt, H., 2020. Innovative Filtration Methods for Marine Fuels. *Fuel Processing Technology*, 198, pp. 105-117.
4. Garcia, L., 2019. Contaminant Control for Enhanced Marine Engine Life. *Maritime Technology Journal*, 8(2), pp. 54-68.
5. International Union of Marine Insurance, 2024. Cat Fines Pack. JHC Report - Marine Engine Damage due to Catalytic Fines in Fuel. Available from: IUMI.
6. Jansen, S., et al., 2021. Effect of Heavy Fuel Oil Aluminosilicates on Engine Wear. *Journal of Petroleum Engineering*, 144(3), pp. 203-216.
7. Johnson, R., 2020. *Marine Engine Reliability: Issues and Solutions*. Elsevier, Amsterdam.
8. Kawamura, T., & Tanaka, H., 2021. Optimizing Engine Performance by Reducing Catalyst Particles in Fuel. *Journal of Marine Fuel Research*, 33(3), pp. 176-185.
9. Lewis, P. D., & Crowley, B., 2019. Wear of Engine Components Due to Aluminosilicate Contamination. *Marine Science and Engineering Review*, 21(4), pp. 392-412.
10. MacDonald, R., & Keegan, P., 2020. *Marine Engines: A Practical Guide*. Routledge, New York.

11. MAN Diesel & Turbo, 2017. Cleaning of Heavy Fuel Oil and Maximum 0.10% Sulphur Fuels. Service Letter SL2017-638/DOJA. Available from: Tribocare.
12. MAN Energy Solutions, 2019. Fuel Tank Cleaning - Supplement to SL2019-670. Service Letter SL2019-674/JAP. Available from: MAN ES.
13. Mann, R., & Stokes, L., 2021. Filtration Efficiency for Aluminosilicate Removal in Marine Fuels. *Journal of Naval Engineering*, 12(1), pp. 95-110.
14. Martin, J., & Stanley, W., 2020. Minimizing Wear Due to Fuel Contaminants. *Proceedings of the 20th International Symposium on Marine Fuel*, IME, Athens, pp. 240-256.
15. Smith, G., & Wallace, D., 2020. Analysis of Engine Cylinder Wear under Catalytic Fines Contamination. *Journal of Engineering Tribology*, 13(4), pp. 315-331.
16. Tanaka, Y., & Oshima, K., 2019. Cleaning Efficiency of Marine Fuel Systems for Aluminosilicate Removal. *Journal of Ship Engineering*, 17(1), pp. 132-148.
17. Vecom Marine, 2020. Test Kit Cat Fines Check. Available from: Vecom Marine.
18. Vrublevskiy, R. Y., Akimov, O. V., & Alfimov, V. O., 2024. Enhancing the Efficiency of Marine Engines through Cleaning and Monitoring the Aluminosilicate Content in Fuel. *Modern Information and Innovative Technologies in Transport (MINTT – 2024) [Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference (May 29–31, 2024, Odessa)]*. Odessa: Kherson State Maritime Academy, pp. 204–205.
19. Watts, S. (ed.), 2019. *Essential Marine Engine Operations: Methods and Techniques*. Routledge, London.

Левченко О.В., Маранов О.В.

ПОТОЧНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МАНЕВРЕНОСТІ СУДЕН ТА ЇХНЬОЇ ГІДРОДИНАМІКИ В ОБМЕЖЕНИХ ВОДАХ

Метою дослідження є оцінка сучасного стану питання прогнозування маневреності суден і їхньої гідродинаміки в обмежених водах. Для досягнення мети дослідження вивчено історію розвитку цієї галузі знань та вказані основні досягнуті на цьому шляху результати. На основі проведеного аналізу встановлений реальний стан прогнозування маневреності суден в обмежених водах і проблемні питання їхньої гідродинаміки на мілководних ділянках. Питання прогнозування руху суден є пріоритетним у зв'язку зі збільшенням розмірів суден і вимогами щодо підвищення їхньої енергоефективності. Для цього необхідно мати сучасні надійні обчислювальні методи через можливість проведення постійних морських випробувань і модельних експериментів. Розглянуто та проаналізовано історію розвитку питання прогнозування маневреності суден і їхньої гідродинаміки в обмежених водах. Наведені відомі результати різних підходів щодо математичного моделювання гідродинамічних сил у рівняннях руху маневрених суден. Показано основні проблеми ускладнення математичних моделей маневрування. Виділено місце багатовимірних поліномів, що впливають з розкладів в ряд Тейлора, виражають гідродинамічні сили в термінах специфічних для судна гідродинамічних коефіцієнтів інерції та демпфування різного порядку. Показано шляхи, на основі яких дослідники на базі фізичних уявлень, математичних властивостей і досліджень чутливості створили структуру моделі для довільних маневрів керма з трьома ступенями свободи в заданій робочій точці. Ретельно розглянуто внесок дослідників у врахування ефекту мілководдя у загальну процедуру моделювання руху судна. Показано, що на відміну від морських випробувань, маневрові випробування в стиснутих умовах пропонують аналіз гідродинамічних сил на судах в ідеалізованих умовах течії з точки зору жорсткої кінематики тіла, керуючих впливів і глибини води. Дослідження підтверджує, що моделювання складних течій навколо суден, які виникають при маневруванні на мілководді, все ще є складним завданням з точки зору моделювання та залучення обчислювальних ресурсів.

Ключові слова: безпека судноводіння, безпека судноплавства, стиснені води, прийняття рішень, морська справа, метод оцінки, управління судном, безпека, прийняття рішень, екіпаж судна, безпека на морі, навігація, навігаційна безпека.

Постановка проблеми. Фахівці в галузі суднової гідродинаміки вже протягом доволі тривалого часу вивчають дані питання прогнозування маневреності суден. Причому дослідження поділяють на два достатньо виокремлені напрямки – прогнозування маневреності суден у відкритому морі й у обмеженому просторі. У відкритому морі, яке являє собою стохастичне середовище, проходить основна частина морських подорожей. Тому дослідники вивчають вплив всього середовища і окремих випадкових факторів на прогнозування характеристик рушіїв і хвильових рухів судна. Але, крім протяжних відкритих морських ділянок, судно рухається також у прибережних районах і на підходах до портів. Ці ділянки характеризуються обмеженістю ефектами гідродинамічної взаємодії суден, що ускладнює їхнє маневрування і рух важчий, а також значно збільшує небезпеку у порівнянні з відкритим морем.

Різкий сплеск інтересу до загальних питань прогнозування маневрування та його органічної складової – маневрування в обмежених водах – викликано такими причинами:

1) суттєве відставання темпів розвитку інфраструктури водних шляхів від швидкості зростання розміром суден. У цьому зв'язку, адміністрації водних шляхів дуже зацікавлені в прогнозуванні руху суден з точки зору входу в порти і системи каналів

2) широке застосування тренажерів для управління суднами для навчання морського персоналу і для аналізу судноплавства. Для перевірки результатів моделювання необхідна дуже висока точність моделювання руху суден;

3) перехід до «зеленого» судноплавства вимагають ретельної оцінки щодо мінімальної потреби в енергії задля забезпечення безпечної та економічної експлуатації судна в несприятливих умовах. Наслідком цього є загальне зменшення енергетичних установок, що безпосередньо відобразиться на обрисі перспективних суден, їхній ефективності і безпечності в експлуатації, особливо з урахуванням впливу хвиль і мілководдя на маневреність суден;

4) методи потенційної течії все ще залишаються ефективним інструментом для гідродинамічного аналізу. Але вибухоподібний розвиток обчислювальних ресурсів і чисельних методів створили конкурентну альтернативу експериментам – аналіз на основі моделювання. З давніх часів основу моделі маневрування суден на мілководді складала експериментальна гідродинаміка. Методи, повністю засновані на моделюванні, майже не застосовувалися через їхню недостатню надійність і продуктивність. Висока складність моделювання турбулентності, ефектів вільної поверхні та руху жорстких тіл, особливо з присіданням судна, стали своєрідним викликом для стрімкого розвитку обчислювальної гідродинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics). Цей підхід вже найближчим часом дозволить вирішити багато проблем в судновій гідродинаміці, включаючи маневрування, за рахунок розв'язання усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS – the Reynolds-averaged Navier-Stokes). Бажано дослідити продуктивність, перспективи та обмеження таких чисельних методів, як CFD, для врахування в'язких ефектів і подальшої оцінки надійності, особливо для мілководдя.

Метою дослідження є оцінка сучасного стану питання прогнозування маневреності суден і їхньої гідродинаміки в обмежених водах.

Виклад основного матеріалу.

1.1 Сучасний стан питання прогнозування маневреності суден

З самого початку сучасної історії, коли людина винайшла та стала використовувати надводні судна, їх роль суден торгівлі, транспорті, відпочинку і війні постійно зростала. Разом з тим постійно зростав інтерес до оцінки та покращення експлуатаційних характеристик суден, зокрема маневреності. Вивчення маневреності суден почалося з початку зародження флоту, оскільки судноводії та проектувальники цікавилися характеристиками реакції на вимушені зміни напрямку руху судна. Фундаментальне визначення маневрування наведено у «Принципах морської архітектури» (PNA – the Principles of Naval Architecture) [1].

Системний підхід щодо огляду наукових досліджень, присвячених проблемі аналізу маневреності суден у середині XX сторіччя, був значно доповнений новітньою історією відповідних досліджень у роботі [2] значно. Причому значна увага була приділена практичним аспектам маневреності суден.

Загалом, з кінця 40-их – початку 50-их рр. XX сторіччя почалася системна робота в напрямку формування математичних основ та моделей для прогнозування маневрування суден. Серйозна робота була проведена щодо виведення лінійної системи рівнянь руху судна при маневруванні в горизонтальній площині. Трохи пізніше була обговорена модель динаміки ризику, яка була широко застосована до проблем управління курсом. Продовження досліджень дозволили підійти до нелінійних розширень цих рівнянь [3].

Важливий внесок у математичне моделювання маневрування належить Абковіцу [4], який сформулював рівняння маневрування з шістьма ступенями свободи (CC, DoF – degree-of-freedom), використавши модифіковані розклади в ряд Тейлора функціоналів гідродинамічних сил. До склад таких моделей входять множина коефіцієнтів, що описують гідродинамічні властивості, і багатовимірні алгебраїчні поліноми для врахування залежностей сил від рухів жорсткого тіла і змінних поверхні керування. Ідеї, викладені у [4], знайшли матеріальне втілення при впровадженні механічних осциляторів на експериментальних установках на модельному басейні Девіда Тейлора.

Розроблені на цій базі механізми плоского руху (МПР, PMM – Planar Motion Mechanisms (PMM)) дозволяли здійснювати задані та примусові рухи моделей суден у буксирних баках. Їх можна було використовувати для вивчення рухів, важливих для маневрування, наприклад, коливань чистої хитамиці

або чистого ризику. Методика визначення коефіцієнтів корисної дії при маневруванні суден широко використовувалася під час оцінювання таких випробувань.

У Гамбурзі, Німеччина, в рамках об'єднаного дослідницького центру для суднобудування (Sonderforschungsbereich Schiffbau 98 (SFB 98)) вперше з'явилася установка для випробувань моделей суден на плоский рух. Цим пристроєм був комп'ютеризований візок з планарним рухом (CPMC – Computerized Planar Motion Carriage), за допомогою якого здійснювався рух з великою амплітудою з високою точністю визначення та вимірювання траєкторії. Основний внесок у математичне моделювання процесів маневрування в рамках SFB 98 висвітлено у роботі [5]. Автор детально обговорив роботи CPMC для випробувань маневрування в закритому і відкритому режимах і синхронізації результатів для системної ідентифікації моделей маневрування.

Моделювання сил гідродинамічного демпфування за допомогою модульних функцій другого порядку на основі концепції гідродинамічного опору і моделі, що спираються на декомпозиційні формулювання силових ефектів і застосування експериментів, теорії та емпіричних даних для визначення нових коефіцієнтів маневрування, запропоновані JMMG (японська група з моделювання маневрування, JMMG – the Japanese Maneuvering Modeling Group) розглянуті у дослідженні [6].

Використання теорії тонкого тіла в контексті маневрування судна також зайняло важливе місце у дослідженнях. Важливий теоретичний внесок у розгляд залежного від часу моделювання руху судна з урахуванням ефекту пам'яті рідини зроблено у [7].

За відсутності обчислювальних методів і експериментів повномасштабні маневрені ходові випробування були основним методом вибору для аналізу ефективності маневрування. Вони мають практичне значення для критеріїв маневрування Міжнародної морської організації (IMO – the International Maritime Organisation), MSC 137(76) (2002). Розвиток обчислювальних методів і збільшення обчислювальних потужностей уможливили чисельні дослідження судових потоків навколо суден, що маневрують, за допомогою CFD. Спочатку було отримано цінну інформацію про сталий дрейф і ризику, а також сили на кермі. Але незабаром такі методи повторили випробування на натурних моделях, і за допомогою CFD стало можливим отримати коефіцієнти маневрування [8].

Застосування математичних моделей обчислювальної гідрогазодинаміки для прогнозування маневрування на глибокій воді було перевірено і підтверджено в майстерні SIMMAN. Первинні дослідження були обмежені потоками з двома тілами. Більш складні випадки, пов'язані з моделюванням вільної поверхні і руху судна, розглядалися попередньо тільки в умовах глибокої води. Нещодавно було виконано пряме CFD моделювання маневрів керма, яке показує додану геометрію корпусу і повторно розв'язує перехідні задачі руху судна, використовуючи доступні чисельні методи для розгляду рухів гребного гвинта і керма. Дуже висока трудомісткість цих симуляцій поки що не може бути використана для параметричних досліджень, про що свідчать роботи [9]. Комітет з маневрування Міжнародної конференції з буксирування танків (ITTC – International Towing Tank Conference) проводить регулярний огляд пов'язаної з цим дослідницької діяльності.

1.2 Сучасний стан гідродинаміки суден в обмежених водах

Питання руху судна на мілководді, у порівнянні з роботами щодо маневрування на глибокій воді, почали розглядатися відносно рано. Прогнозування впливу мілководдя на рух судна вперед, у т. ч. зміну опору судна і врахування присідання, досліджено у [10].

Усебічним дослідженням гідродинамічних проблем суден, що виникають в обмежених водах, фахівці вважають узагальнюючу працю [11]. У роботі основна увага приділялася прогнозуванню викликаних суднами хвиль на мілководді, формулюванню хвиль на малій воді, формулюванню сил на корпусі судна за наявності вертикальних і бічних обмежень, а також їх наслідків для вертикальних і бічних обмежень та наслідків для руху судна.

Багато зусиль було приділено вивченню хвиль на з використанням усереднених по глибині рівнянь течії типу Буссинеска. Помітний внесок у вивчення мілководних хвиль, спричинених суднами, також належать праці [12].

Краще розуміння теорії тонкого тіла для формулювання руху судна на великій глибині і розширення математичної бази до скінченної глибини води розглянуто у статті [13]. Це стало основою для вивчення сил, що діють на судна в каналах, використовуючи теорію тонкого тіла.

У роботі [14] представлені дослідження щодо маневрування суден на мілководді і порівняння з експериментальними дослідженнями.

Ефекти взаємодії з берегами і суднами розглядаються в роботі [15]. Автори розробили формули сили качки і моменту рискання для двох тіл, що рухаються паралельними траєкторіями, для мілководдя і глибокої води.

Дослідження обгінних маневрів за допомогою панельних методів були розширені в роботі [16].

Стійкість прямолінійного руху та проблеми управління в обмежених водах на основі гідродинамічного аналізу за допомогою панельного методу Ренкіна обговорювалися в роботі [17].

У роботі [18] обговорюються наслідки скінченної глибини води для математичних моделей маневрування. У роботі [19] розвинута лінійна і нелінійна теорія підйому, застосована до течій навколо суден на мілководді. Надалі ці теоретичні результати дозволили провести систематичні експериментальні дослідження впливу глибини води і наслідків для різних математичних моделей маневрування.

Експериментальні дослідження взаємодії судна з берегом та впливу берега виконані у [20]. Спроби валідації моделювання маневрування судна в умовах низької води за допомогою експериментів з вільним ходом описані у [21].

Прогнозування крену має першорядне значення в управлінні зазором під кілем (UKC – under-keel clearance) суден і привертає велику увагу дослідників гідродинаміки. Розв'язання цілого ряду проблем просідання судна наведено у [22]. У роботі [23] узагальнено теоретичні та емпіричні методи прогнозування просідання судна.

Раннє застосування CFD до підйомних течій на мілководді обмежувалося моделюванням нев'язких або подвійних тіл, нехтуючи як збуреннями вільної поверхні, так і просіданням. Важливий внесок щодо надійності CFD для застосування щодо прогнозування просідання та опору надано у [24].

Порівняльні дослідження різних чисельних методів можна знайти в роботі [25]. Огляд діяльності в цій галузі можна знайти в регулярних звітах Комітету з маневрування МТТК і матеріалах Міжнародної конференції з маневрування суден на мілководді та в континентальних водах (MASHCON – Manoeuvring in Shallow and Confined Waters). Застосування CFD до обтікання суден на мілководді нещодавно розглядалося на MASHCON [26].

Висновки. Представлено результати вивчення стану досліджень щодо прогнозування маневрування суден на мілководних ділянках. Зростаюча потреба в прогнозуванні руху суден у зв'язку зі збільшенням розмірів суден і вимогами до енергоефективності вимагає оцінки надійності обчислювальних методів, оскільки морські випробування і модельні експерименти не завжди можливі, наприклад, на ранніх стадіях проектування суден.

Розглянуто та проаналізовано історію розвитку питання і наведені отримані результати різних підходів до математичного моделювання гідродинамічних сил у рівняннях руху маневрених суден. Показано, яким чином ускладнювалися математичні моделі маневрування, представлені системою зв'язаних нелінійних диференціальних рівнянь в рамках ньютонівської механіки.

Показано місце багатовимірних поліномів, що впливають з розкладів в ряд Тейлора, виражають гідродинамічні сили в термінах специфічних для судна гідродинамічних коефіцієнтів інерції та демпфування різного порядку.

Показано шлях, на основі якого на базі фізичних уявлень, математичних властивостей і досліджень чутливості створено структуру моделі для довільних маневрів керма з трьома ступенями свободи в заданій робочій точці.

Ретельно розглянуто внесок дослідників у врахування ефекту мілководдя у загальну процедуру моделювання руху судна.

Показано, що на відміну від морських випробувань, маневрові випробування в стиснутих умовах пропонують аналіз гідродинамічних сил на суднах в ідеалізованих умовах течії з точки зору жорсткої кінематики тіла, керуючих впливів і глибини води.

Показано місце CFD у проведенні маневрових випробувань судна в умовах обмежених вод. Було виявлено перелік робіт, в яких за допомогою імітаційного моделювання було отримано набір маневрових

коефіцієнтів для довільних маневрів керма за короткий час з використанням помірних обчислювальних ресурсів.

Дослідження підтверджує, що моделювання складних течій навколо суден, які виникають при маневруванні на мілководді, все ще є складним завданням з точки зору моделювання та залучення обчислювальних ресурсів. Це є головною перешкодою для остаточного перетворення CFD з інструменту для академічних досліджень на інструмент для промислового використання.

Майбутні дослідження в галузі CFD будуть спрямовані на розробку гібридних моделей течії, які прагнуть забезпечити дрібномасштабну роздільну здатність течії в ближній зоні і спрощені форми рівнянь Нав'є-Стокса у відповідних областях області розв'язку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mandel, P., 1965, *Ship maneuvering and control*, In J.P. Comstock (Ed.), *Principles of Naval Architecture*, pp. 463-606, SNAME.
2. Sutulo, S., Guedes Soares, C., 2011, *Mathematical models for simulation of manoeuvring performance of ships*, Marine Technology and Engineering, Taylor and Francis Group.
3. Wagner-Smith, L., 1971, *Steering and Manoeuvring of Ships Full Scale and Model Tests*, European Shipbuilding, 20(1).
4. Abkowitz, M.A., 1964, *Lectures on Ship Hydrodynamics- Steering and Maneuverability*, Hydro- og Aeordynamisk Laboratorium, Lyngby, Report No. Hy-5.
5. Oltmann, P., 1978, *Bestimmung der Manövriereigenschaften aus den Bahnkurven freimanövrierender Schiffsmodele*, Institut für Schiffbau, Hamburg, Bericht Nr. 364 (in German).
6. Yasukawa, H., Yoshimura, Y., 2014, *Roll-Coupling Effect on Ship Maneuverability*, Ship Technology Research: Schiffstechnik, 61(1):16-32.
7. Cummins, W.E., 1962, *The Impulse Response Function And Ship Motions*, David Taylor Model Basin, Hydrodynamics Laboratory Research and Development Report 1661.
8. Cura-Hochbaum, A., 2006, *Virtual PMM Tests for Manoeuvring Prediction*, Proc. of the 26th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics.
9. Mofidi, A., Carrica, P., 2014, *Simulation of zigzag maneuvers for a containership with direct moving rudder and propeller*, Computers & Fluids, 96:191-203.
10. Kreitner, J., 1934, *Ueber den Schiffswiderstand auf beschraenktem Wasser*, Werft, Reederei, Hafen, 15 (in German).
11. Tuck, E.O., 1978, *Hydrodynamic Problems of Ships in Restricted Waters*, Ann. Rev. Fluid Mechanics, 10:33-46.
12. Alam M.R., Mei, C.C., 2008, *Transcritical ship waves in a randomly uneven channel*, Journal of Fluid Mechanics, 616:397-417.
13. Tuck, E.O., Taylor, P.J., 1970, *Shallow Water Problems in Ship Hydrodynamics*, Proc. of 8th Symposium on Naval Hydrodynamics.
14. Zhao, Y.X., 1986, *Hydrodynamische Kräfte an manövrierenden Schiffen auf flachem Wasser*, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Bericht Nr. 466 (in German).
15. Tuck, E.O., Newman, J.N., 1978, *Hydrodynamic Interactions Between Ships*, Proc. of the 12th Symposium on Naval Hydrodynamics.
16. Von Graefe, A., 2014, *Rankine-source method for ship-ship interaction and shallow water flows*, PhD-Thesis, University of Duisburg-Essen.
17. Thomas, B. S., Sclavounos, P. D., 2006. *Optimal Control Theory Applied to Ship Maneuvering in Restricted Waters, Readings in Marine Hydrodynamics*, Volume to be Published in Honor of Professor J. Nicholas Newman.
18. Norrbin, N.H., 1971, *Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model for Ship Manoeuvring in Deep and Confined Waters*, Statens Skeppsprovninganstalt, Gothenburg, Publ. No. 68.
19. Inoue, S., Murayama, K., 1969, *Calculation of Turning Ship Derivatives in Shallow Water*. Trans. of the West-Japan Society of N.A.

20. Vantorre, M., Verzhbitskaya, E., Laforce, E., 2002, *Model Test Based Formulations of Ship-Ship Interaction*, Schiffstechnik, 49:124-141.
21. Eloot, K., Delefortrie, G., Vantorre, M., Quadvlieg, F., 2015, *Validation of Ship Manoeuvring in Shallow Water Through Free-Running Tests*, Proceedings of the 34th ASME International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2015-41912.
22. Gourlay, T.P., 2011, *A brief history of mathematical ship-squat prediction, focussing on the contributions of E.O. Tuck*, Journal of Engineering Mathematics, 70(1-3):5-16.
23. Millward, A., 1992, *A comparison of the theoretical and empirical prediction of squat in shallow water*, International Shipbuilding Progress, 417:69-78.
24. Deng, G.B., Guilmineau, E., Leroyer, A., Queutey, P., Visonneau, M. and Wackers, J., 2014, *Simulation of container ship in shallow water at model scale and full scale*, Proc. of the 3rd National CFD Workshop for Ship and Offshore Engineering.
25. Mucha, P., Deng, G., Gourlay, T., el Moutar, O., 2016, *Validation Studies on Numerical Prediction of Ship Squat and Resistance in Shallow Water*, Proc. of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction.
26. Uliczka, K., Böttner, C.U., Kastens, M., Eloot, K., Delefortrie, G., Vantorre, M., Candries, M., Lataire, E., 2016, *Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction*, Hamburg.

Levchenko O.V., Maranov O.V.

THE CURRENT STATE OF RESEARCH ON PREDICTING THE MANOEUVRABILITY OF SHIPS AND THEIR HYDRODYNAMICS IN CONFINED WATERS.

The purpose of the study is to assess the current state of the art of predicting ship manoeuvrability and hydrodynamics in confined waters. To achieve the research objective, the author examines the history of development of this field of knowledge and indicates the main results achieved along the way. Based on the analysis, the real state of ship manoeuvrability prediction in confined waters and problematic issues of their hydrodynamics in shallow water areas are established. The issue of predicting vessel movement is a priority due to the increase in the size of ships and the requirements to improve their energy efficiency. For this purpose, it is necessary to have modern reliable computational methods due to the possibility of conducting continuous sea trials and model experiments. The history of the development of the issue of predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters is considered and analysed. The known results of various approaches to mathematical modelling of hydrodynamic forces in the equations of motion of manoeuvrable ships are presented. The main problems of complication of mathematical models of manoeuvring are shown. The place of multidimensional polynomials, which follow from the Taylor series expansions, expressing hydrodynamic forces in terms of ship-specific hydrodynamic coefficients of inertia and damping of different orders, is highlighted. The ways in which researchers have used physical concepts, mathematical properties and sensitivity studies to create a model structure for arbitrary rudder manoeuvres with three degrees of freedom at a given operating point are shown. The contribution of researchers to the consideration of the effect of shallow water in the general procedure for modelling ship motion is thoroughly considered. It is shown that, unlike sea trials, compressed manoeuvre tests offer an analysis of hydrodynamic forces on ships under idealised flow conditions in terms of rigid body kinematics, controlling influences and water depth. The study confirms that modelling the complex flows around ships that occur during manoeuvring in shallow water is still a challenging task in terms of modelling and computational resources.

Keywords: navigation safety, shipping safety, compressed waters, decision-making, maritime affairs, assessment method, ship management, safety, decision-making, ship's crew, safety at sea, navigation, navigational safety.

Тимошук О.М., Шапран Ю.Є.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ВІБРАЦІЇ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

У статті з'ясовано, що перетворення в машинах і механізмах одних видів енергії на інші, перетворення форм руху, здійснення робочих процесів неминує пов'язані з появою змінних сил, що породжують вібрацію. Вона негативно впливає на міцність та надійність роботи машин, несучих конструкцій, споруд та має шкідливий вплив на фізіологічний стан людей. При досягненні певних значень вібрація може викликати порушення робочих процесів, призвести до розладу управління та регулювання, спотворення показань приладів, до посиленого зносу та поломок машин. Більшість сучасних машин уже недостатньо характеризувати енергетичними, масогабаритними та економічними показниками, а необхідно також оцінювати їхню віброактивність. Метою статті є дослідження методів та засобів нейтралізації вібрації суднового дизель-генераторного агрегату для формування обґрунтованих рекомендацій щодо їх ремонту (модернізації). Розроблена методика призначена для визначення жорсткості, коефіцієнтів демпфування та поглинання інноваційних віброізоляторів на основі експериментальних статичних навантажувальних показників, що дозволить удосконалити суднового дизель-генераторного агрегату на етапі його модернізації. Проведено дослідження основних віброізоляційних засобів (упорів) та зроблено висновок про необхідність розробки інноваційних методів компенсації поперечних коливань верхньої частини двигунів. Побудована блок-схема методу визначення експериментальних статичних навантажувальних характеристик, жорсткостей, коефіцієнтів демпфування та поглинання інноваційних віброізоляторів, що може бути використана на етапі модернізації судових дизель-генераторних агрегатів.

Ключові слова: морський транспорт, напівпровідникові прилади, силова електроніка, судові двигуни, суднова електроенергетична установка, енергетична установка, судно, діагностування, ефективна потужність, передача потужності, судовий дизель.

Постановка проблеми. Серед різних судових енергетичних установок (СЕУ) дизельні установки найбільш масові. Ними обладнуються всі типи транспортних та промислових суден морського та річкового флоту.

Технічний прогрес призводить до збільшення питомої потужності та швидкохідності дизелів та дизельних енергетичних установок (ДЕУ), та, як наслідок, до зростання коливальних явищ, рівнів шуму та вібрації. Перетворення в машинах і механізмах одних видів енергії на інші, перетворення форм руху, здійснення робочих процесів неминує пов'язані з появою змінних сил, що породжують вібрацію. Вона негативно впливає на міцність та надійність роботи машин, несучих конструкцій, споруд та має шкідливий вплив на фізіологічний стан людей. При досягненні певних значень вібрація може викликати порушення робочих процесів, призвести до розладу управління та регулювання, спотворення показань приладів, до посиленого зносу та поломок машин. Більшість сучасних машин уже недостатньо характеризувати енергетичними, масогабаритними та економічними показниками, а необхідно також оцінювати їхню віброактивність. Це призводить до необхідності контролю вібрації машин на основі вимірів, які є вихідними даними для її нормування.

З підвищенням віброактивності дизелів зростають втомні руйнування, знос деталей та вузлів, що знижує та зменшує ресурс дизелів в цілому, а також надає негативний вплив на судно в цілому,

психофізіологічний стан та здоров'я екіпажу і пасажирів. Отже нейтралізація шуму та вібрації на судах останнім часом набула актуального значення [1, 2].

Мета статті: дослідження методів та засобів нейтралізації вібрації суднового дизель-генераторного агрегату (СДГА) для формування обґрунтованих рекомендацій щодо їх ремонту (модернізації).

Аналіз літературних джерел.

Останні роки дослідженнями вібрації від СДГА та її компенсаціями займаються ряд як вітчизняних та закордонних фахівців, як Повідайло В.О. [3], Дівеев Б.М. [4, 5], Варбанець Р.А. [6], M. Jurevicius [7], N.S. Ahirrao [8] та інші автори, а проблеми залишаються актуальними і на теперішній час.

Умовно літературні джерела, використані у роботі, можна розділити на ряд груп:

- до першої групи слід віднести фундаментальні та прикладні дослідження з теорії деформації та пружності твердого тіла;
- до другої групи джерел віднесемо роботи, що досліджують деформації працюючих механізмів;
- третя група джерел присвячена теорії побудови суднових енергетичних установок та спеціальним дослідженням щодо їх вібрації.

Основна частина.

Для забезпечення здатності СДГА виконувати свої функції та зберігати параметри в межах встановлених норм, а також зберігати міцність в умовах вібрації, необхідні не лише уточнені розрахунки амортизації, зокрема, з урахуванням невірніваженості двигуна, впливу бортових, носових та кормових віброізоляторів, а також удосконалення ефективності віброізоляції компонентів системи опорної та неопорної амортизації [9, 10].

Удосконалення дизель-генераторів, їх компонентів як у частині підвищення їх надійності в цілому, так і щодо віброакустичної надійності і довговічності, зазвичай триває до зняття з виробництва [11].

При застосуванні поршневих двигунів у складі суднових дизель-генераторів, крім виключно дизельних проблем, виникають актуальні наукові завдання, серед яких і розв'язання питань вібростійкості та ударостійкості агрегатів [12-14].

У статті до компонентів СДГА віднесемо:

- несучі конструкції (загальний підрамник дизеля та генератора, кронштейни опорних віброізоляторів та турбокомпресорів);
- опорні віброізолятори;
- неопорні віброізолятори (бічні та торцеві упори дизель-генератора, муфти, пружні вставки трубопроводів, компенсатори турбокомпресорів та трубопроводів, підвіски трубопроводів газовідвідної системи, заспокійники поперечних коливань, страхувальні елементи тощо).

Статистика свідчить, що понад дві третини поломок та аварій машин відбувається через вібрації [15].

З метою обмеження вібрації у різних галузях техніки існують вимоги та норми щодо її регламентації. Відповідно до встановленої практики під вимогами прийнято мати на увазі ті гранично допустимі рівні вібрації, які необхідні для повного задоволення певних часткових умов без врахування можливості їх виконання в даний момент.

Внаслідок безпосереднього зв'язку між технічним станом машини, параметрами робочих процесів та вібрацій, що відбуваються в ній, кожному стану машини відповідає цілком визначена характером інтенсивність вібрації. Виміряна за допомогою відповідної апаратури, вона може бути прямим або непрямым показником якості роботи та технічного стану машини. Тому першим

ступенем діагностики технічного стану машин є контроль її вібрації у процесі роботи та стану із встановленими нормами [17]. Вихід за межі експлуатаційних норм свідчить або про порушення робочого процесу машини, або її несправності.

Такі норми встановлюються на основі досвіду експлуатації та включаються до правил обслуговування машин та установок.

Норми на вібростійкість машин під впливом зовнішньої вібрації створюються для захисту їх від вібраційного навантаження. Більшість механізмів, які створюють при роботі вібрацію, піддаються впливу зовнішньої вібрації з інших джерел. При досягненні певних значень вона може негативно впливати на якість робочих процесів, надійність й втомну міцність вузлів і деталей.

Особливо чутливі до вібрацій прилади та апаратура. Оскільки міцність деталей машин та несучих конструкцій залежить від сил, що діють на них, що пропорційні прискоренню, вібраційна напруженість машин у деяких галузях техніки оцінюється за допомогою коефіцієнта віброперевантаження. Він представляє собою відношення максимального прискорення при коливаннях до прискорення земного тяжіння:

$$K = \frac{\ddot{x}}{g} = \frac{X \cdot \omega^2}{g} \approx 0,04 \cdot x \cdot f^2, \quad (1)$$

де $\ddot{x}$ та X – амплітуди коливального прискорення та зміщення; ω – кутова швидкість, с^{-1} ; f – частота коливань, Гц; g – прискорення вільного падіння, $\text{см}/\text{с}^2$.

Основною умовою забезпечення вібраційної міцності корпусних конструкцій, розташованих у районах впливу вібраційних навантажень, є запобігання можливості виникнення резонансних коливань на основних режимах експлуатації судна. Частотний діапазон ходової вібрації судна лежить, як правило, нижче частотної межі слухового сприйняття людини. Однак, коливання великогабаритних судових конструкцій (палуб, перебірок, зашивок) можуть порушувати в судових приміщеннях акустичні поля на інфразвукових частотах, що несприятливо впливають на людину.

Крім того, під дією низькочастотної вібрації збуджуються коливання недостатньо жорстко закріплених судових конструкцій (настилів, пайол, зашивок, кожухів й т. п.), що проявляється вже в звуковому діапазоні частот, у вигляді неприємних стуків, скрипів, деренчання, інших шумових ефектів.

Поширення вібрації, що збуджується головними або допоміжними двигунами, відбувається, з одного боку, через опорні зв'язки та фундамент, а з іншого, через неопорні зв'язки, валопроводи, трубопроводи, особливо газовідвідної системи дизеля. Елементи зв'язку газовідвідних трубопроводів з корпусом та корпусними конструкціями судна повинні мати достатню податливість для того, щоб запобігти руйнуванню трубопроводів та їх зв'язків внаслідок вібрації та струсів, захистити від ушкодження самі зв'язки, а також забезпечити свободу руху невіброізованого та віброізованого обладнання, не порушивши в останньому випадку основну схему його віброізоляції та не змінивши її основні параметри [19].

В якості засобів, що забезпечують вирішення цього завдання, застосовуються різні упори – заспокійники поперечних коливань двигуна або газотурбонагнітачів дизелів, податливі зв'язки (металеві компенсатори різних конструкцій) трубопроводів, а також податливі елементи, зв'язуючі окремі ділянки трубопроводів із корпусними конструкціями [20].

Досліджуючи вібрацію від двигуна, насамперед, необхідно встановити єдиний підхід до оцінки діапазону збурюючих неврівноважених моментів, тобто порядку коливань та відповідної йому частоті, які мають бути взяті за основу при нормуванні спектру частот власних коливань пружних систем у машинному відділенні (МВ). Нижчу частоту своїх коливань пружних систем розраховують так:

$$N = 1,2 \cdot v \cdot n, \quad (2)$$

де n – максимальна частота обертання колінчатого валу двигуна;

v – головний порядок, який дорівнює в двохтактних двигунах кількості циліндрів двигуна, в чотирьохтактних – кількості циліндрів, поділених пополам.

Запас на навколорезонансну зону – 20% за частотою цілком достатній, оскільки робота дизеля на максимальній потужності не є специфічним режимом. Доцільність використання такого нормування наведено на приклади модернізації серійних суден, виконаних для усунення резонансних коливань у пружних системах [13].

Наявність рамових зв'язків у МВ значно полегшує завдання розміщення обладнання та механізмів (крім головних), оскільки вони конструктивно забезпечують достатню жорсткість опорного контуру. Відсутність таких конструкцій у шахті МВ у деяких випадках [12-14] призводить до необхідності встановлення великої кількості додаткових зв'язків з метою підвищення жорсткості опорних конструкцій елементів газовипускного тракту дизелів.

Отже, встановлення рамних зв'язків слід розглядати як основний засіб, що гарантує вібростійкість конструкцій корпусу та елементів енергетичної установки, що розташовані в цьому районі. Значно складніший метод збільшення жорсткості основної пружної системи в МВ, що утворюється головним дизелем та днищем. Ця система має цілком певні форми вільних коливань та спектр частот. Резонансні коливання в ній відбуваються переважно за Н-формою та усуваються зазвичай за рахунок додаткових зв'язків, які вводяться в систему з метою збільшення її жорсткості відбудови від резонансної частоти. Конструктивно ці зв'язки представляють собою сталеві складові балки (зазвичай зі стандартного профілю), встановлені між кронштейнами верхніх ґрат дизеля та конструкціями корпусу у МВ.

Збільшення жорсткості системи «дизель» – «днище» підвищило частоти вільних коливань відповідних форм, що призвело до відбудови резонансів та значного зниження рівнів вібрації [18].

Таким чином, при конструюванні МВ доцільно платформи розташовувати по висоті на рівні кронштейнів верхніх та середніх ґрат МОД з метою передачі на ці, за своїм змістом, досить жорсткі конструкції інерційного корпусу зусиль під час вибору МОД. Проектування зв'язків верхнього кріплення двигунів повинно проводитися на навантаження, що діють на них, з урахуванням можливих резонансних явищ у коливаннях системи «дизель» – «днище», а також резонансів крутильних коливань (вимушені коливання основи за Н – формою під дією значного моменту) та дії випадкових навантажень – ударних моментів від гребного гвинта [19].

Як заспокійники поперечних коливань застосовують механічні, фрикційні та гідравлічні упори. Механічні упори складаються з прутка та гільзових опор, в які поміщені прутки. Опори з боку судна нарізні та притиснуті попередньо напруженим прутком. Сила попередньої напруги в прутку повинна бути тільки такою, щоб скорочення його було більшим за амплітуду вібрації для забезпечення тривалого закріплення двигуна. Механічні упори підвищують жорсткість двигуна та зумовлюють зростання власних частот та зменшення амплітуди вібрації.

Таким чином, упорами можна уникнути небезпечної резонансної області вібрації.

Фрикційні упори [20] складаються з U-подібних профілів, які на одному кінці закріплені до двигуна нарізним з'єднанням, а на іншому – до суднової конструкції через таке ж з'єднання з фрикційним пристроєм.

Поверхні тертя виготовлені з матеріалу з коефіцієнтом тертя близько 0,4. Сила тертя регулюється на необхідну величину затягуванням гвинтів. Доки сила в прутку менша за силу тертя,

упор діє, як механічний. Коли сила у ньому перевищує силу тертя, відбувається відносне переміщення тертьових поверхонь. Енергія системи, що витрачається на подолання сил тертя в упорі, перетворюється на теплову енергію та упор діє як віброгасний елемент.

Гідравлічні упори складаються з ємності, що має диск, циліндра з маслом, а також диференціального поршня та прутка [21].

Кріплення випускного патрубку до стінок машинного відділення призначене для збільшення жорсткості та зниження амплітуди вібрації системи – випускних труб від випускних клапанів до випускного колектора турбокомпресора, турбокомпресора та випускного патрубку турбокомпресора.

З метою зменшення сил, що діють на дизель у поперечній площині судна від деформації корпусу, застосовується конструкція верхнього кріплення з фрикційними прокладками [20, 21]. Верхнє кріплення з фрикційними прокладками компенсують зусилля, що виникають у ньому від деформації корпусу судна та за штормових умов за рахунок відносного зміщення елементів фрикційного з'єднання. Ці усунення можуть досягти 3 – 4 мм, що свідчить про значні зусилля, які виникли б у верхньому кріпленні без встановленої фрикційного сполучення.

Описані упори мають такі недоліки [18, 19, 21]:

1. Сила попередньої напруги в прутку під час роботи двигуна не регулюється (механічний упор);
2. Складність конструкції, висока вартість виготовлення та експлуатації (гідравлічний упор);
3. Недостатня пристосовність до деформацій суднової конструкції та вузький діапазон регулювання жорсткості, а у випадку аварії судна можуть пошкодити двигун.

Отже, необхідні інноваційні методи компенсації поперечних коливань верхньої частини двигунів.

При амплітуді віброзміщення, наприклад, дизель-генератора в межах 0,3– 0,5 мм [22], в основному, працюють вібродемпфуючі шайби 11, а при амплітуді віброзміщення в межах 0,5 – 1,0 мм включаються фрикційні елементи вузла із пазами 12-14 (рис. 1, 2). Наведені величини амплітуд віброзміщення спостерігаються особливо в СДГА, для яких передбачений двигун із п'ятьма циліндрами, а також на суднах із невдалим акустичним проектуванням [22].

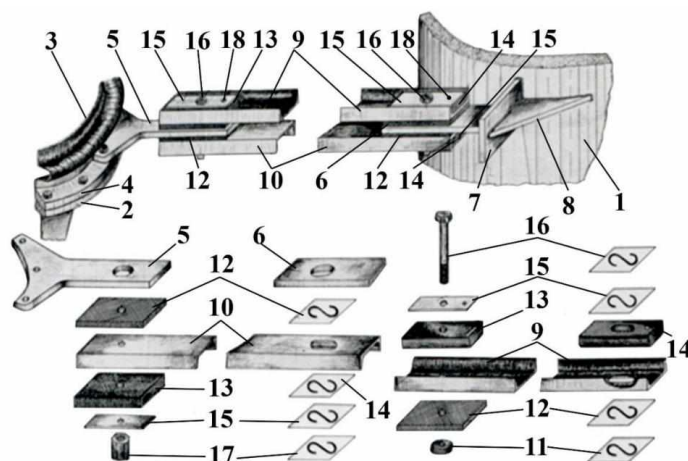


Рисунок 1 – Заспокоювач поперечних коливань

- На рис. 1 позначено: 1 – піллерс; 2 – фланець турбокомпресора;
 3 – компенсатор; 4 – фланець-компенсатора; 5, 6 – вуха; 7 – упор; 8 – ребро;
 9, 10 – балки швелерні; 11 – шайба вібродемпфуюча; 12, 13, 14 – прокладки фрикційно-демпфуючі; 15 – пластина; 16 – болт; 17 – гайка; 18 – фіксуєчий засіб.

Під час роботи дизеля, встановленого на судні, крім внутрішніх сил і моментів, що виникають та призводять до вібрації двигуна, виникають також статичні збурення сил від крену та диферента, які призводять до неприпустимих переміщень (зсувів) двигуна. Тому, крім торцевих та бічних обмежувачів [22], встановлених на судовому фундаменті, передбачаються упори для поперечного кріплення верхньої частини двигуна. За рахунок відносного переміщення тертьових поверхонь фрикційних елементів 12-14 (див. рис. 1), встановлених з правого боку тяги, забезпечується гасіння даних переміщень.

Пази призначені для забезпечення зазначених переміщень щодо болта 16. Вказана частина упору так само пристосовується до деформації корпусу судна, а також запобігає пошкодженню двигуна у випадку аварії судна.

На рис. 2 наведено пружинно-канатний упор поперечного кріплення верхньої частини двигуна з регульованою характеристикою [22].

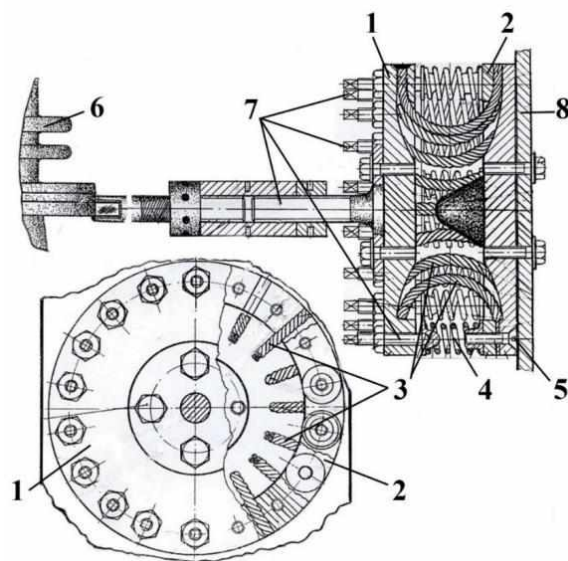


Рисунок 2 – Пружинно-канатний упор поперечних коливань

На рис. 2 позначено: 1 – опорні пластини; 2 – притискні пластини; 3 – пружний елемент; 4 – пружини; 5 – кріпильні засоби; 6 – газовідведення дизеля; 7 – регулюючі засоби; 8 – корпусна конструкція (піллерс, судовий набір).

У порівнянні з гумовими пружними елементами пружинні мають значно більший ресурс роботи, їх пружні характеристики менше залежать від зовнішніх умов (температури, вологості тощо), мають широкий діапазон жорсткості, не здатні до деформацій повзучості, проте не мають демпфуючого ефекту.

Ефект демпфування забезпечують сталеві канатні елементи. Робочі частини відрізків сталевих канатів мають потрібну несучу здатність та значне демпфування. У процесі навантаження вони відчують деформації вигину, кручення та стискування. Добре протистоять вібраційним та лінійним навантаженням, витримують багаторазові удари високої інтенсивності тривалістю 0,05-0,1 с. Мають поглинаючу здатність, близьку до пружин, а за розсіюючою здатністю перевищують металеву гуму (МГ). Зі збільшенням маси об'єкту захисту від вібрацій або амплітуди збурення резонансна частота тросових елементів віброгасіння пристрою в цілому зменшується.

Поєднання у віброгасному пристрої двох типів (пружина, сталевий канат) пружних елементів сприяє забезпеченню сумарного ефекту пристрою.

Інша важлива особливість полягає у можливості регулювання характеристик не тільки завдяки передбаченій складовій конструкції тяги, але, головне, у можливості регулювання натягу пружних елементів, особливо пружин. Крім того, завдяки можливості розміщення досить великої кількості пружин між опорними фланцями, частина з них може бути встановлена без натягу, а частина з натягом, або все без натягу або натягом за умови дотримання симетричності навантаження по колу.

Остання особливість дозволяє суттєво змінити:

по-перше, характеристики віброгасного пристрою;

по-друге, забезпечити роботу упору для різних об'єктів в залежності від характеру роботи їх в умовах експлуатації, стану, наприклад, моря, умов плавання та руху судна (крен, диферент, ударні явища, льодова обстановка, шторм). Виходячи з цих особливостей, регулюючі характеристики віброгасіння упору забезпечують нормальну, безаварійну роботу суднового дизеля.

Неопорні заспокійники коливань використовуються також для двигунів наземного транспорту на рис. 3 наведені окремі зразки заспокоювачів.



Рисунок 3 – Упорні віброізолятори зі штангами

Пружні елементи віброізоляторів прийнято характеризувати кривою «сили деформація», тобто залежністю прикладеної сили P від деформації пружного елемента Z (рис. 4) [9].

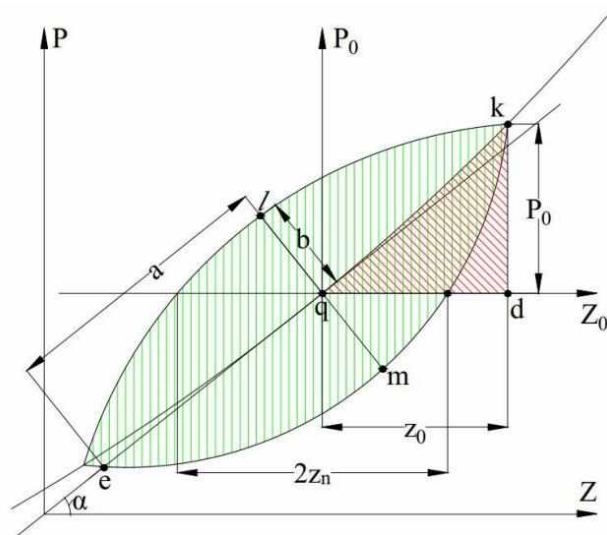


Рисунок 4 – Гістерезисна діаграма віброізолюючих упругодемпфіруючих елементів

Пружний елемент називають лінійним, якщо сила пружності пропорційна деформації. При цьому коефіцієнт пропорційності C , що називається статичною жорсткістю елемента й визначається як тангенс кута нахилу прямої «сила»-«деформація» до осі абсцис, постійний й не залежить від деформації.

Для нелінійних пружних елементів жорсткість не є величиною постійною, а змінюється із зміною деформації. Статична жорсткість у будь-якій точці q кривої «сила»-«деформація» (див. рис. 4) визначається у цьому випадку як тангенс кута нахилу дотичної до кривої в даній точці або як похідна у цій точці [7]:

$$c = \operatorname{tg} \alpha = \frac{dP}{dz} = \frac{P_0}{z_0}. \quad (3)$$

З практичного боку координати точки q на кривій «сила»-«деформація» (див. рис. 4) зазвичай відповідають величині статичного навантаження (ваги амортизованого технічного об'єкта), розміщеної на віброізоляторах, та величині деформації (прогину) віброізолятора у цій точці.

Якщо технічний об'єкт, наприклад, дизель-генератор або поршневий електро-компресор на опорних канатних віброізоляторах (ОКВ) або ПКВ одиночним легким ударом по корпусу змусити коливатися, то навіть при малих амплітудах, що не виходять за межі пропорційності, у матеріалі віброізолятора відбуватимуться незворотні процеси, які супроводжуються розсіюванням теплової енергії за рахунок внутрішнього тертя. Ці втрати характеризуються петлею гістерезису, що базується на околиці точки q (рис. 4), а площа петлі $e l k m e$ – визначає кількість енергії, поглиненої та розсіяною у вигляді тепла матеріалом віброізолятора за один цикл коливання.

При цьому залежно від особливостей структури матеріалу пружного елемента віброізолятора, амплітуди циклу та швидкості навантаження віброізолятора (частоти) нахил великої осі $e q k$ (див. рис. 4) гістерезисної петлі може змінюватися, отже, динамічна жорсткість віброізолятора може відрізнятися від статичної.

При урахуванні внутрішнього опору матеріалу часто виходять з так званої гіпотези Фойгта, згідно з якою сили внутрішнього опору приймаються пропорційними швидкості деформації та силова реакція віброізолятора описується у вигляді:

$$R = cz + h\dot{z}, \quad (4)$$

де h – коефіцієнт внутрішнього тертя.

За принципом Даламбера диференціальне рівняння вимушених коливань системи з одним ступенем свободи при гармонійному збудженні можна записати у вигляді:

$$m\ddot{z} + h\dot{z} + cz = P\cos(p), \quad (5)$$

де m – маса технічного об'єкта на віброізоляторах; P, p – відповідно амплітуда та частота сили збудження.

Застосування гіпотези Кельвіна-Фойгта [3] для опису коливань тіл на віброізоляторах, що набули найбільшого поширення в техніці віброзахисту (гумових, гумометалевих, металевих, синтетичних), призводить до результатів, які не узгоджуються з досвідом. Значна кількість експериментальних робіт, що проводилися в цій галузі, вказує на те, що демпфування для переважної більшості віброізолюючих матеріалів будівельних та металевих конструкцій майже зовсім не залежить від швидкості деформації (частоти коливань), а залежить тією чи іншою мірою лише від амплітуди коливань.

Урахування демпфування в таких системах та конструкціях проводять на основі вивчення гістерезисних діаграм, отриманих під час експерименту. При цьому широке поширення та визнання

набув метод внутрішнього поглинання енергії, який добре узгоджується з результатами експериментів, усуває неоднозначність гістерезисної петлі та призводить до простого та оригінального трактування рівнянь руху.

Сутність методу внутрішнього поглинання енергії полягає у доведенні гіпотези, що здатність матеріалу до поглинання енергії коливань, як відомо, характеризується коефіцієнтом поглинання ψ_0 , що представляє відношення незворотно поглиненої роботи ΔW за цикл коливань, що вимірюється площею петлі гістерези, до всієї пружної роботи W за той же цикл, що вимірюється у тому самому масштабі площею трикутника $e k d$ (див. рис. 4).

$$\psi_0 = \frac{\Delta W}{W}, \quad (6)$$

де W – потенційна енергія тіла, що відповідає амплітуді деформацій за той самий цикл.

У техніці, однак за коефіцієнт поглинання ψ приймається значення, що вчетверо більше за ψ_0 , тобто:

$$\psi = 4\psi_0. \quad (7)$$

Гармонійному навантаженню відповідає еліптична петля гістерези. Коефіцієнт поглинання в цьому випадку можна визначити так:

$$\psi = \frac{2\pi \cdot a \cdot b}{P_0 \cdot z_0}, \quad (8)$$

де a та b – півосі еліпса (див. рис. 4); P_0 – амплітуда зовнішньої гармонійної сили; z_0 – амплітуда пружної деформації.

Враховуючи що:

$$a = \frac{P_0}{\sin \alpha}; b = z_H \sin \alpha,$$

із формули (8) отримаємо:

$$\psi = \frac{2\pi \cdot z_H}{z_0} = \frac{2\pi \cdot R_H}{P_0}, \quad (9)$$

де z_H – амплітуда непружної деформації; R_H – амплітуда сили пружного опору.

У динамічні розрахунки коефіцієнт входить разом з множником $1/2\pi$, що характеризує циклічність процесу. Отже, в теорії зручніше оперувати величиною:

$$\gamma_M = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{z_H}{z_0} = \frac{R_H}{P_0}, \quad (10)$$

що називається коефіцієнтом непружного опору. Її можна називати також коефіцієнтом демпфування віброізолятора.

З формули (10) маємо:

$$R_H = \gamma_M P_0 = \gamma_M c z_0. \quad (11)$$

Тобто сила непружного опору пропорційна жорсткості c та амплітуді пружної деформації z_0 . Блок-схема методу визначення експериментальних статичних навантажувальних характеристик,

жорсткостей, коефіцієнтів демпфування та поглинання інноваційних віброізоляторів наведена на рис. 5.



Рисунок 5 – Блок-схема визначення експериментальних статичних показників інноваційних віброізоляторів

Висновки. При застосуванні поршневих двигунів, зокрема, у складі суднового дизель-генератора, крім суто дизельних проблем, виникають багатогранні завдання, серед яких, у тому числі й вирішення питань забезпечення вимог щодо норм вібрації

Розроблений методика призначена для визначення жорсткості, коефіцієнтів демпфування та поглинання інноваційний віброізоляторів на основі експериментальних статичних навантажувальних показників, що дозволить удосконалити СДГА на етапі його модернізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кардаш В. П., Худенко Г. О. Підвищення ефективності експлуатації суднових пристроїв морських суден // Суднові енергетичні установки: навч. – техн. сб. Одеса: НУ «ОМА», 2018. Вип. 38. -С. 98-100.
2. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Є. С. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Є.С. Уманський. – К.: Вища школа, 1993. – 655 с.
3. Повідайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання : навч. посіб. / В. О. Повідайло. – Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 248 с.
4. Bohdan Diveyev, Ihor Vikovych, Viktor Martyn, Ihor Dorosh, Optimization of the impact and particle vibration absorbers, Proceeding of ICSV21, Florence, Italy, 2, (2015).
5. Bohdan Diveyev. Impact and particle buffered vibration absorbers optimization and design. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Material Science. Vol.1., 2016, № 2
6. Варбанец Р. А. Параметрическая диагностика дизелей SBV6M540 и Pegaso 9156 // Авіаційно-космічна техніка і технологія. Харків : ХАІ. 2006. – № 8(34). – с 144–148.
7. M Jurevicius, V Vekteris, G Viselga, V Turla, A Kilikevicius and I Iljin // Dynamic research on a low-frequency vibration isolation system of quasi-zero stiffness //Journal of Low Frequency Noise,Vibration and Active Control 2019, Vol. 38(2) 684– 691.
8. N.S.Ahirrao, Dr.S.P.Bhosle, Dr.D.V.Nehete // Dynamics and Vibration Measurements in Engines// 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering, 2018.
9. AMC, MECANOCAUCHO// Anti-Vibration Mount. Pp – 108. Andrzej Flaga, Jacek Szulej, Piotr Wielgos // Comparison of determination methods of vibration's damping coefficients for complex structures// Budownictwo i Architektura 3 (2008) 53- 61.
10. Andrzej Flaga, Jacek Szulej, Piotr Wielgos // Comparison of determination methods of vibration's damping coefficients for complex structures// Budownictwo i Architektura 3 (2008) 53-61.
11. Xiongfeng, Liyan, Wangyingchun //Review on vibration isolation technology// Journal of Physics: Conference Series. 2021, pp – 6.
12. Шатохин В. М. Анализ и параметрический синтез нелинейных силовых передач машин: Монография / В. М. Шатохин.– Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 456 с.
13. Wenske W. Zur Ableitung der dynamischen Kennlinie des Asynchromotors in Hinblick auf die Berechnung von Schwingungserscheinungen in Autriebsanlagen. // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule O. Guericke. – Magdeburg. – 1970. – jg.14. – Heft 5/6.– S. 517–523.
14. Вібраційні машини сільськогосподарського виробництва: Монографія. / В. М. Булгаков, М. О. Свірень, І. П. Паламарчук, В. В. Дрига, О. М. Черниш, В. В. Яременко. – Кіровоград: КОД, 2012. – 512 с.
15. Іскович–Лотоцький, Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування: Монографія. [Текст] / Р. Д. Іскович–Лотоцький – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 338 с. – ISBN 966–641–178–4.
16. Hennadiy Cherchyk, Diveyev, Viktor Martyn, Roman Sava, «Parameters identification of particle vibration absorber for rotating machines», Proceeding of ICSV-21, Beijing, China, 2014.
17. Попов В. И., Локтев В. И. Динамика станков. – Киев: Техника, 1975.- 136 с.
18. Brockmann T. H. Theory of Adaptive Fiber Composites. From Piezoelectric Material Behavior to Dynamics of Rotating Structures / Tobias H. Brockmann / Springer Science+Business Media B.V., 2009. 230 p.

19. Guyon E., Hulin J.-P., Petit L., Mitescu C.D. Physical Hydrodynamics. – Oxford University Press, 2001. – 505 P.
20. Крижанівський Є.І. Стрічково-колодкові гальма: монографія В 2 т. Т.2 / [Є.І. Крижанівський, О.І. Вольченко, М.О. Вольченко та ін.]. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 230 с.
21. 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.
22. Minasyan M.A., Kiaw Thet Naing, Methodology for calculating the depreciation of a marine diesel generator unit taking into account the influence of thrust side, bow and stern vibration isolators. – 2021, P. 76.

Tymoshchuk O.M., Shapran Yu.E.

ANALYSIS OF METHODS AND MEANS OF NEUTRALIZING VIBRATION OF A SHIP DIESEL GENERATOR

The article reveals that the transformation of one type of energy into another in machines and mechanisms, the transformation of forms of motion, and the implementation of work processes are inevitably associated with the appearance of variable forces that generate vibration. It negatively affects the strength and reliability of machines, load-bearing structures, and buildings, and has a harmful effect on the physiological state of people. When certain values are reached, vibration can cause disruption of work processes, lead to control and regulation disorders, distortion of instrument readings, and increased wear and tear and machine breakdowns. Most modern machines can no longer be characterized by energy, mass, and economic indicators, and it is also necessary to evaluate their vibration activity. The purpose of the article is to study methods and means of neutralizing vibration of a ship's diesel generator set in order to form substantiated recommendations for their repair (modernization). The developed methodology is intended for determining the stiffness, damping coefficients and absorption of innovative vibration isolators based on experimental static loading indicators, which will allow improving the ship's diesel generator set at the stage of its modernization. The main vibration isolation means (stops) were studied and a conclusion was drawn on the need to develop innovative methods for compensating for transverse vibrations of the upper part of the engines. A flowchart of the method for determining experimental static loading characteristics, stiffnesses, damping coefficients and absorption of innovative vibration isolators was constructed, which can be used at the stage of modernization of ship's diesel generator sets.

Keywords: maritime transport, semiconductor devices, power electronics, ship engines, ship electrical power plant, power plant, ship, diagnostics, effective power, power transmission, ship diesel.

Васалатій Н.В., Монюшко М.М.

ВПЛИВ ХМАРНОСТІ ТРОПІЧНОЇ ЗОНИ НА БЕЗПЕКУ СУДНОПЛАВСТВА

У статті досліджено вплив хмарності тропічної зони на безпеку судноплавства. Проаналізовано основні типи хмарних систем у тропіках, включаючи тропічні циклони, внутрішньотропічну зону конвергенції, холодні вторгнення, пасатні хвилі та мусонну хмарність. Розглянуто механізми їх формування та вплив на навігаційні умови. Визначено критерії оцінки небезпечних ситуацій, пов'язаних з погодними умовами. Запропоновано рекомендації щодо підвищення безпеки судноплавства в тропічних регіонах. Особливу увагу приділено впливу хмарності на радіолокаційне та візуальне спостереження, а також розробці практичних заходів для мінімізації ризиків при плаванні в складних метеорологічних умовах.

Ключові слова: хмарність тропічної зони, тропічні циклони, мусонні вітри, видимість, метеорологічні умови, навігаційна гідрометеорологія, навігаційні небезпеки, безпека судноплавства.

Постановка проблеми. Зростання інтенсивності морських перевезень у тропічних регіонах підвищує актуальність дослідження впливу метеорологічних умов на безпеку судноплавства. Хмарність тропічної зони має особливе значення, оскільки може суттєво впливати на видимість, формувати небезпечні погодні явища та ускладнювати навігацію. Зміни клімату призводять до збільшення частоти та інтенсивності тропічних штормів, що робить дослідження в цій галузі особливо важливими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження впливу метеорологічних умов на безпеку судноплавства має міждисциплінарний характер. Костенко В.І. та Тихонов В.Г. зосередили увагу на методах навігаційного планування з урахуванням гідрометеорологічних факторів, розробивши комплексні підходи до оцінки погодних ризиків. Буров А.А. та Шевченко С.В. створили теоретичні основи управління навігацією в складних погодних умовах, запропонувавши математичні моделі для прогнозування розвитку небезпечних ситуацій. Кучеренко А.М. дослідив питання автоматизації навігаційного планування, розробивши алгоритми врахування метеорологічних факторів при прокладці курсу.

Значний внесок у дослідження впливу тропічних циклонів на судноплавство зробили Топчий В.Л. та Завітаєв В.Л., які розробили методики оцінки ризиків при плаванні в тропічних водах та запропонували критерії безпечного маневрування. Прадюх В.І. та Капліна А.А. досліджували вплив метеорологічних факторів на морехідні якості суден, визначивши критичні параметри остійності в умовах штормового хвилювання.

У міжнародній практиці важливими є роботи Bowditch N., який систематизував вплив гідрометеорологічних умов на навігацію та розробив практичні рекомендації для судноводіїв. Moore C.S. досліджував питання остійності суден при штормовому хвилюванні, створивши методики розрахунку критичних ситуацій. House D.J. розробив практичні рекомендації з управління судном в екстремальних погодних умовах, особливу увагу приділивши питанням безпеки при проходженні тропічних циклонів.

Мета роботи полягає в дослідженні впливу хмарності тропічної зони на безпеку судноплавства шляхом аналізу основних типів хмарних систем і механізмів їхнього формування, а також визначенні критеріїв оцінки небезпечних метеорологічних ситуацій. Робота спрямована на розробку практичних рекомендацій для мінімізації ризиків і підвищення безпеки навігації в тропічних регіонах, зокрема щодо впливу хмарності на радіолокаційне та візуальне спостереження.

Виклад основного матеріалу. У тропічній зоні, розташованій між 30° північної та південної широти, відбуваються складні атмосферні процеси, які суттєво впливають на умови судноплавства.

Основними типами хмарних систем у тропіках є тропічні циклони, внутрішньотропічна зона конвергенції, холодні вторгнення, пасатні хвилі та хмарні масиви мусонного походження.

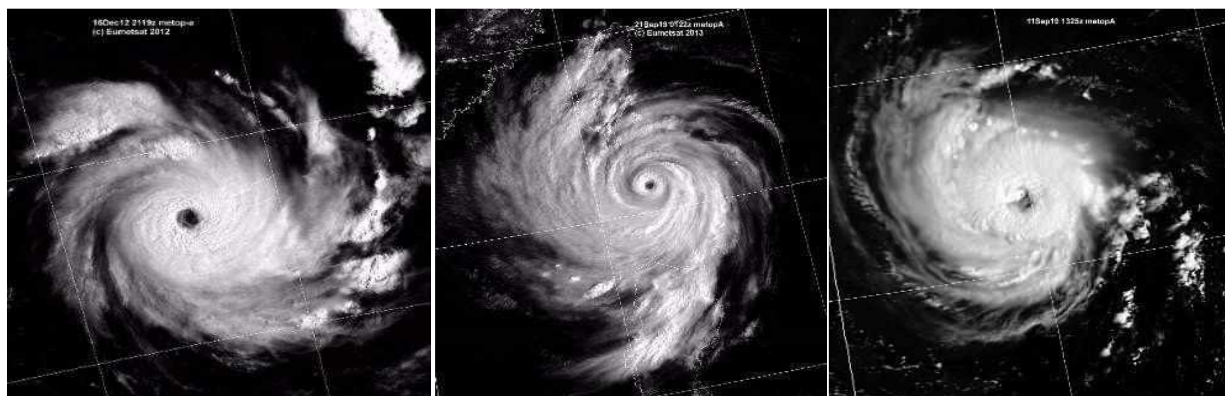


Рисунок 1 – Хмарність ТЦ на знімках МШСЗ, Meteosat, IR [11].

Тропічні циклони становлять найбільшу небезпеку для судноплавства, характеризуючись діаметром від 200 до 800 км, тривалістю існування до 2-3 тижнів та швидкістю вітру понад 33 м/с. Вони супроводжуються інтенсивними опадами з добовими сумами 100-300 мм та формуванням хвиль висотою понад 10 м. Особливо небезпечним є раптове посилення вітру та виникнення аномально високих хвиль.

Внутрішньотропічна зона конвергенції формує хмарні системи шириною 500-600 км та довжиною 2000-3000 км. Вона характеризується потужною конвекцією, інтенсивними висхідними рухами повітря та формуванням купчасто-дощових хмар. В зоні конвергенції часто виникають сильні грози та шквали, що створюють додаткові ризики для судноплавства.

Холодні вторгнення в тропіки супроводжуються формуванням вузьких хмарних смуг, різкими змінами погодних умов та суттєвим погіршенням видимості. При цьому можливе раптове посилення вітру та розвиток небезпечного хвилювання. Пасатні хвилі характеризуються ізольованими скупченнями хмар розміром від 200 до 1000 км, які при певних умовах можуть трансформуватися в тропічні циклони.

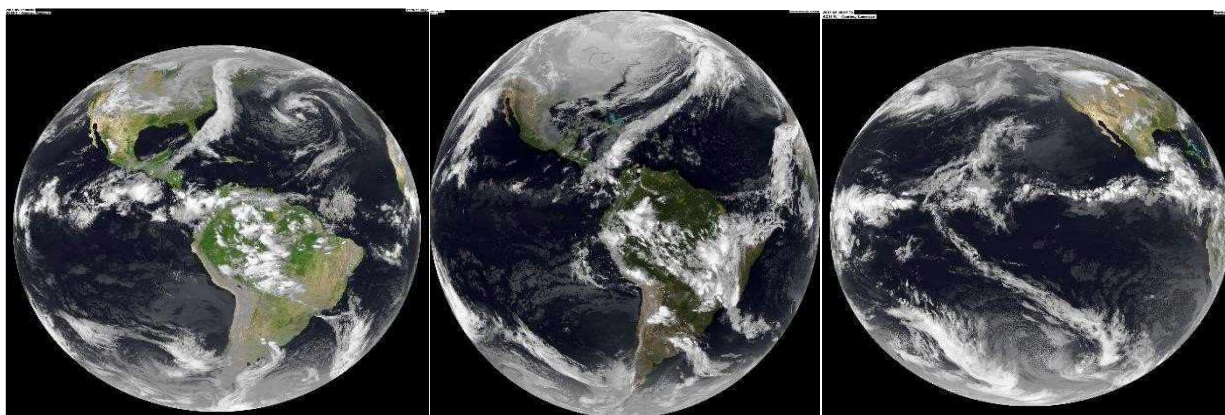


Рисунок 2 – Хмарність ХФ у тропіках на знімках МШСЗ, IR [12]

Мусонна хмарність призводить до формування потужних конвективних хмар, супроводжується інтенсивними опадами та різкими змінами погодних умов. Особливо небезпечними є періоди зміни мусонів, коли можливе формування штормових умов та значне погіршення видимості.

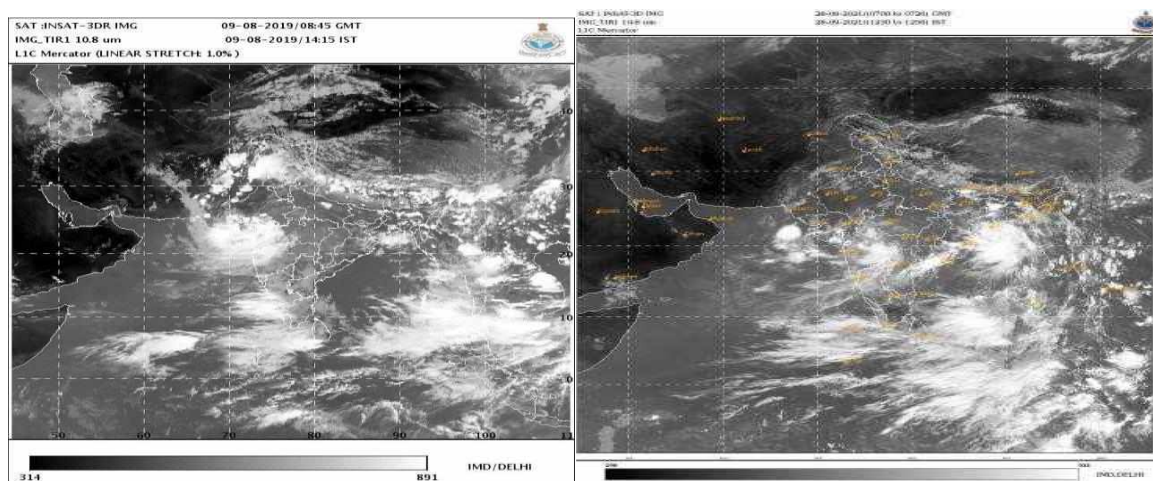


Рисунок 3 – Мусонні скупчення у Південно-східній Азії, IR [12]

Вплив хмарності на радіолокаційне спостереження проявляється через ослаблення сигналів та зменшення дальності виявлення цілей, яке може досягати 30-40% при сильних опадах. Особливо небезпечним є маскування цілей відбитими сигналами від зон інтенсивних опадів та погіршення роздільної здатності РЛС. При цьому можуть виникати хибні цілі від потужних купчасто-дощових хмар.

Візуальне спостереження суттєво ускладнюється при низькій хмарності та опадах різної інтенсивності. Зменшується дальність виявлення навігаційних орієнтирів, ускладнюється визначення відстані до об'єктів, підвищується ризик зіткнень суден. Особливо небезпечними є умови обмеженої видимості при сильних зливах та грозах.

Хмарність також впливає на роботу навігаційного обладнання, створюючи перешкоди для супутникових навігаційних систем, викликаючи збої в роботі електронних приладів та ускладнюючи радіозв'язок. Можливі помилки в показаннях ехолотів та вплив на роботу гірокомпасів, що вимагає підвищеної уваги до контролю навігаційної обстановки.

Для підвищення безпеки судноплавства необхідна реалізація комплексу технічних та організаційних заходів. Технічні заходи включають впровадження сучасних метеорологічних радарів, модернізацію судових РЛС та встановлення автоматизованих систем попередження про небезпечні явища. Важливим є використання інтегрованих навігаційних систем та забезпечення резервування критично важливого обладнання.

Організаційні заходи передбачають розробку детальних процедур дій екіпажу в складних метеоумовах, впровадження систем управління безпекою та регулярне оновлення навігаційних карт і посібників. Необхідна оптимізація маршрутів з урахуванням сезонних метеорологічних умов та посилення вимог до підготовки екіпажів.

Особливу увагу слід приділяти інформаційному забезпеченню, використовуючи спеціалізовані метеорологічні сервіси, отримуючи регулярні прогнози погоди та штормові попередження. Важливим є моніторинг супутникових знімків хмарності та обмін інформацією з іншими суднами та береговими службами.

Навчання та підготовка персоналу повинні включати спеціальні тренінги з метеорологічної підготовки, відпрацювання дій в екстремальних погодних умовах та вивчення особливостей тропічної метеорології. Необхідне постійне підвищення кваліфікації судноводіїв та психологічна підготовка екіпажів.

Міжнародна співпраця має бути спрямована на участь у спільних програмах метеорологічного забезпечення, обмін досвідом та кращими практиками, гармонізацію стандартів безпеки. Важливими напрямками є спільні дослідження впливу кліматичних змін та розвиток глобальних систем попередження про небезпечні явища.

Висновок. Таким чином, хмарність тропічної зони має значний вплив на безпеку судноплавства через формування небезпечних погодних явищ, погіршення видимості та ускладнення навігаційних умов. Комплексне використання сучасних технологій спостереження, прогнозування та попередження про небезпечні явища, разом із належною підготовкою екіпажів та міжнародною співпрацею, дозволить підвищити рівень безпеки морських перевезень у тропічних регіонах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Костенко В.І. Основи навігаційного планування. Київ: Кондор, 2015. 280 с.
2. Тихонов В.Г. Сучасні методи навігаційного планування суден. Одеса: ОНМА, 2018. 220 с.
3. Буров А.А., Шевченко С.В. Управління навігацією: теорія та практика. Харків: ХНУ, 2017. 300 с.
4. Кучеренко А.М. Автоматизація навігаційного планування: практичні аспекти. Київ: Наукова думка, 2016. 150 с.
5. Топчий В.Л. Навігаційні системи та їх використання в плануванні рейсів. Львів: ЛНУ, 2019. 250 с.
6. Завітаєв В.Л. Судноводіння на внутрішніх і прибережних морських шляхах. Київ: Ліра-К, 2019. 282 с.
7. Прадюх В.І., Капліна А.А. Морехідні якості суден. Херсон, 2021. 108 с.
8. Bowditch N. *The American Practical Navigator: An Epitome of Navigation*. 2017.
9. Moore C.S. *Intact Stability*. 2010.
10. House D.J. *Ship handling Theory and Practice*. 2007.
11. Wokingham Weather [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.woksat.info/wos.html>
12. Portal to Meteorological Education and Training within Europe [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eumetcal.eu/>

REFERENCES

1. Kostenko V.I. *Fundamentals of Navigational Planning*. Kyiv: Kondor, 2015. 280 p.
2. Tikhonov V.H. *Modern Methods of Ship Navigational Planning*. Odesa: ONMA, 2018. 220 p.
3. Burov A.A., Shevchenko S.V. *Navigation Management: Theory and Practice*. Kharkiv: KNU, 2017. 300 p.
4. Kucherenko A.M. *Automation of Navigational Planning: Practical Aspects*. Kyiv: Naukova Dumka, 2016. 150 p.
5. Topchy V.L. *Navigation Systems and Their Use in Voyage Planning*. Lviv: LNU, 2019. 250 p.
6. Zavitayev V.L. *Ship Navigation on Inland and Coastal Sea Routes*. Kyiv: Lira-K, 2019. 282 p.
7. Pradyukh V.I., Kaplina A.A. *Seaworthiness of Ships*. Kherson, 2021. 108 p.
8. Bowditch N. *The American Practical Navigator: An Epitome of Navigation*. 2017.
9. Moore C.S. *Intact Stability*. 2010.
10. House D.J. *Ship Handling: Theory and Practice*. 2007.
11. Wokingham Weather [Electronic resource]. Available at: <http://www.woksat.info/wos.html>
12. Portal to Meteorological Education and Training within Europe [Electronic resource]. Available at: <https://eumetcal.eu/>

Vasalatii N., Moniushko M.

IMPACT OF TROPICAL ZONE CLOUDINESS ON MARITIME NAVIGATION SAFETY

The article examines the impact of tropical zone cloudiness on maritime navigation safety. The main types of cloud systems in the tropics are analyzed, including tropical cyclones, intertropical convergence zone, cold intrusions, trade wind waves, and monsoon cloudiness. The mechanisms of their formation and influence on navigational conditions are considered. Criteria for assessing dangerous situations related to weather conditions are defined. Recommendations for improving maritime safety in tropical regions are proposed. Special attention is paid to the impact of cloudiness on radar and visual observation, as well as the development of practical measures to minimize risks when sailing in difficult meteorological conditions.

Keywords: *cloudiness of the tropical zone, tropical cyclones, monsoon winds, visibility, meteorological conditions, navigational hydrometeorology, navigational hazards, maritime safety.*

Гончарук І.П., Головань А.І., Піменова А.Ю.

АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУХУ СУДНА ПІД ЧАС ЗАХОДУ В КАМЕРУ ШЛЮЗУ

У статті представлено результати дослідження гідродинамічних особливостей руху суден під час заходу в камеру шлюзу, що є складним і відповідальним маневром, особливо для великотоннажних суден. Встановлено, що в умовах обмеженого простору камери шлюзу виникають значні гідродинамічні явища, включаючи інтерференцію хвиль, підвищення рівня води перед носовою частиною судна, стиснення потоку та збільшення хвильового опору. Ці процеси суттєво впливають на параметри руху судна, зокрема на його швидкість, осідання, диферент та стабільність під час маневру. Розроблено математичну модель руху судна, яка враховує специфіку гідродинамічних умов у камері шлюзу. Вона поєднує рівняння руху судна, опис стану потоку обтікання та хвильові явища. Особлива увага приділена впливу ступеня стиснення потоку на критичні швидкості, що є важливими для оцінки безпеки та ефективності маневрування. Модель дозволяє прогнозувати поведінку судна під час заходу в шлюз, аналізувати вплив різних факторів і розробляти рекомендації для практичного застосування. Експериментальні дослідження підтвердили, що запропонована модель є ефективною для аналізу руху великотоннажних суден, які мають підвищені вимоги до точності маневрування. Результати роботи можуть бути використані для оптимізації процесів шлюзування, розробки нових підходів до навігаційного забезпечення і підвищення безпеки експлуатації шлюзів. Також вони сприяють вдосконаленню існуючих методик проектування шлюзів і процедур маневрування в обмежених водних просторах. Запропоновані підходи мають значний потенціал для інтеграції у сучасні навігаційні системи, дозволяючи враховувати складні гідродинамічні умови і зменшувати екологічні та економічні ризики, пов'язані із судноплавством у вузьких та обмежених водних шляхах.

Ключові слова: маневрування, судно, безпека судноплавства, шлюзування, критична швидкість, прийняття рішень, гідродинаміка, камера шлюзу, математичне моделювання, оптимізація, великотоннажні судна, вузькості.

Постановка проблеми. Процес заходу судна в камеру шлюзу є складним маневром, який супроводжується виникненням численних гідродинамічних явищ, що зумовлені обмеженим простором, великим ступенем стиснення потоку та хвильовою інтерференцією. Ці явища суттєво впливають на характеристики руху судна, такі як додатковий опір, осідання, диферент та коливальні рухи. Особливо це актуально для великотоннажних суден, які мають значні інерційні характеристики та підвищені вимоги до точності маневрування.

Існуючі математичні моделі маневрування суден не враховують у достатній мірі специфіку гідродинамічних умов у камері шлюзу, що обмежує їхню точність і придатність для прогнозування поведінки судна в реальних умовах шлюзування. Відсутність комплексного підходу до моделювання цього процесу створює ризики для безпеки маневрування, підвищує витрати палива та ускладнює експлуатацію шлюзів.

Таким чином, виникає потреба в дослідженні гідродинамічних особливостей руху судна в умовах обмеженого простору шлюзу, розробці уточненої математичної моделі цього процесу, а також у формуванні рекомендацій для підвищення ефективності та безпеки заходу суден у шлюз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гідродинаміка суден у вузьких водних шляхах, особливо під час входу в шлюзи, є складною і залежить від різних факторів. До них відносяться трансляційні хвилі, зворотна течія, ефект подушки і сили гальмування [1,2,3]. Для розрахунку

хвильових систем у шлюзах були розроблені математичні моделі, такі як модель шести хвиль, що враховують залежність від швидкості і форми корпусу судна [4,5]. Хоча методи потенційного потоку можуть точно прогнозувати бічні сили і моменти крену при взаємодії судна з берегом і дном, вони мають проблеми з прогнозуванням моменту ризикання через ефекти перехресного потоку [6,7,8]. Збільшення розмірів суден підвищило важливість оцінки маневреності на етапі проектування, при цьому використовуються як експериментальні, так і обчислювальні методи [9,10]. Розуміння цих гідродинамічних явищ має вирішальне значення для оптимізації входу судна в шлюзи і забезпечення безпечного маневрування в обмежених водах, особливо для великотоннажних суден.

Мета дослідження полягає у розробці науково-обґрунтованої математичної моделі руху судна під час заходу в камеру шлюзу, яка враховує гідродинамічні явища, що виникають в умовах обмеженого простору, для аналізу і прогнозування поведінки судна, оптимізації маневрування та забезпечення безпеки шлюзування, особливо для великотоннажних суден.

Основні результати дослідження. Гідродинамічні явища, що виникають під час заходу судна в камеру шлюзу, де є великі обмеження за шириною і глибиною, відрізняються від явищ, що спостерігаються під час руху на мілководді або в каналі.

Ці явища характеризуються:

- великими швидкостями в потоці, що обтікає судно, які зумовлені високим коефіцієнтом стиснення камери шлюзу корпусом судна;
- явищем інтерференції хвиль: суднові хвилі, відбиті від стінок камери шлюзу і корпусу судна, створюють складну картину утворення хвиль;
- підвищенням рівня води перед носовою частиною судна при вході;
- рух здійснюється з перемінним у часі диферентом.

Унаслідок цього збільшується опір тертя (завдяки збільшенню швидкості потоку обтікання), хвильовий опір (завдяки інтерференції і трансформації хвиль), з'являється додатковий опір від диференціації судна.

Експериментальні дослідження показують, що хвильовий опір є домінуючим під час входу судна в шлюз.

Режим у потоці обтікання можна вважати турбулентним через наявність великих місцевих збурень і нестационарний характер руху судна.

Під час поступального горизонтального руху судна в камері шлюзу спостерігається вертикальна хитація судна, що є нестационарним процесом. При цьому збурюючі сили хвильової природи, що підкоряються закону подібності Фруда, відіграють основну роль.

Зазначені гідродинамічні явища впливають на швидкість руху судна, його додаткове осідання і диферент.

Натурні спостереження показали, що великотоннажні судна рухаються певний час під час входу в шлюз на ділянці короткої пали і голови шлюзу з першою критичною швидкістю. Це пояснюється тим, що до сили упору рушіїв додається сила інерції судна, а значення першої критичної швидкості на короткій ділянці руху падає в 4-7 разів порівняно з її значенням у підхідному каналі внаслідок різкого збільшення ступеня стиснення живого перерізу потоку і збільшення швидкості обтікання.

З теорії гідравліки відомо, що критична швидкість потоку визначається для прямокутних перерізів за виразом:

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{g \cdot (F_k - \Omega)}{B_k}} \quad (1)$$

Нескладні розрахунки для реальних співвідношень стиснення потоку корпусом судна під час шлюзування показують, що значення критичної швидкості в цьому випадку можуть мати значення $V_{кр} \leq 2,5$ м/с.

Таким чином, інтенсивність гідродинамічних явищ здебільшого визначає ступінь стиснення потоку.

Загальна схема руху судна в шлюзі показана на рисунку 1.

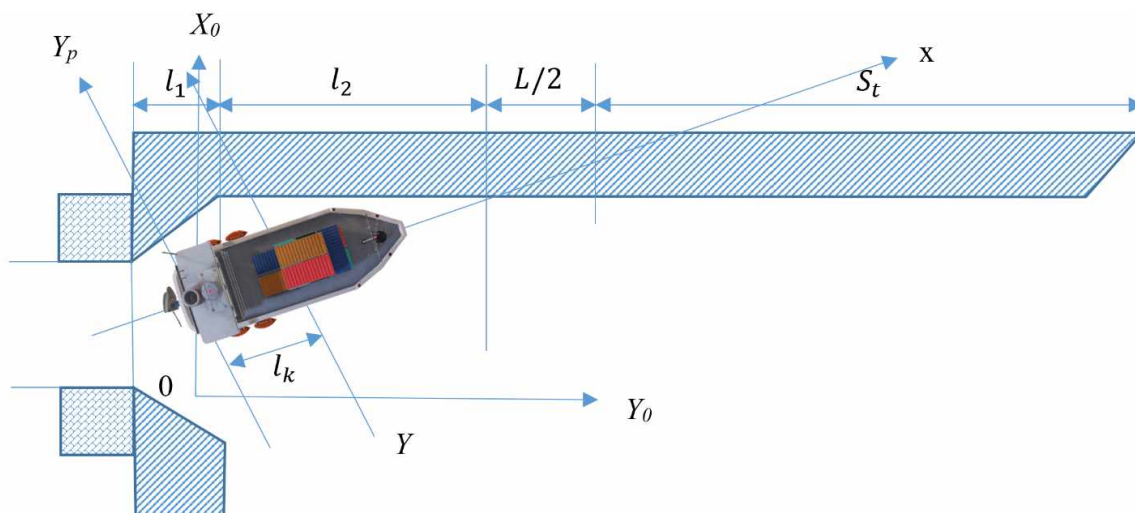


Рисунок 1 – Схема руху судна в шлюзі

Специфічна відмінність конструйованої математичної моделі від традиційної моделі керованості полягає в тому, що гідродинамічні характеристики як інерційного (приєднані маси), так і неінерційного походження залежать додатково від розташування судна по відношенню до шлюзу (тобто від миттєвих координат системи).

Положення судна щодо шлюзу в будь-який момент часу визначається узагальненими координатами центру мас (G): $q_1 = x_0$; $q_2 = y_0$, кутом курсу $q_3 = \theta$.

Узагальнені швидкості (у нерухомій системі координат X_0, Y_0) можуть бути представлені у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_1 &= V_{x_0} = \frac{dx_0}{dt} \\ \dot{q}_2 &= V_{y_0} = \frac{dy_0}{dt} \\ \dot{q}_3 &= \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Зв'язок між проекціями швидкості в рухомій і нерухомій системах координат виражаються відомими формулами:

$$\left. \begin{aligned} V_{x_0} &= V_x \cos \theta - V_y \sin \theta \\ V_{y_0} &= V_x \sin \theta + V_y \cos \theta \\ V_x &= V_{y_0} \sin \theta + V_{x_0} \cos \theta \\ V_y &= V_{y_0} \cos \theta - V_{x_0} \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Уявімо корпусні сили, що діють на судно в шлюзі, у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} X_k &= X_{k\infty} + X_{k\text{шл}} \\ Y_k &= Y_{k\infty} + Y_{k\text{шл}} \\ M_k &= M_{k\infty} + M_{k\text{шл}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $X_{k\infty}, Y_{k\infty}, M_{k\infty}$ - зусилля під час руху з тими самими швидкостями V_x, V_y, ω на глибокій воді;
 $X_{k\text{шл}}, Y_{k\text{шл}}, M_{k\text{шл}}$ - додаткові зусилля, що виникають у шлюзі.

Слід зазначити, що ці додаткові умови залежать не тільки від швидкості, а й від положення судна в шлюзі в момент часу (t). Таким чином,

$$\left. \begin{aligned} X_{k\text{шл}} \\ Y_{k\text{шл}} \\ M_{k\text{шл}} \end{aligned} \right\} = f(V_x, V_y, \omega, x_0, y_0, \theta)$$

Проекції головного вектору і головного моменту всіх зовнішніх сил на осі рухомої (пов'язаної із судном) системи координат:

$$\left. \begin{aligned} X &= T_E - X_{k\infty} - X_{k\text{шл}} - X_A \\ Y &= Y_{k\infty} + Y_{k\text{шл}} - Y_p - Y_A \\ M &= M_{k\infty} + M_{k\text{шл}} + Y_p l_k - M_A \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Проекції головного вектору системи сил на рухомі й нерухомі осі координат пов'язані між собою очевидними співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= X \cos \theta - Y \sin \theta \\ Y_0 &= X \sin \theta + Y \cos \theta \\ X &= Y_0 \sin \theta + X_0 \cos \theta \\ Y &= Y_0 \cos \theta - X_0 \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для отримання рівняння руху скористаємося відомими з аналітичної механіки рівняннями Лагранжа II роду:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_c}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T_c}{\partial q_i} = \bar{Q}_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

Далі керуватимемося методом, викладеним В.Г. Павленком і, зберігаючи запропоновану індексацію, зробимо лише доповнення й уточнення, що враховують особливості маневру, який ми розглядаємо. Так, вважаємо, що кінетична енергія системи судно-рідина визначається виразом:

$$T_c = T_{c\infty} + T_{c\text{шл}} \quad (8)$$

де $T_{c\infty} = f(V_x, V_y, \omega)$; $T_{c\text{шл}} = f(V_x, V_y, \omega, x_0, y_0, \theta)$.

Через специфіку визначення додаткових зусиль не можна рівняння розв'язувати як у традиційній моделі керованості відносно швидкостей V_x, V_y, ω незалежно від рівнянь траєкторії. Система в цьому разі залишається незамкненою. Кінематичні рівняння, необхідні для замикання математичної моделі, зручно подати у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_0}{dt} &= V_x \cos \theta - V_y \sin \theta \\ \frac{dy_0}{dt} &= V_x \sin \theta + V_y \cos \theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

У зв'язку із зазначеними вище гідродинамічними особливостями, що супроводжують процес заходу судна в шлюз, рівняння плоского руху необхідно доповнити рівняннями, що характеризують стан потоку обтікання і хвильові явища, які також визначають кінематику маневру.

З огляду на те, що поперечні розміри судна і камери шлюзу малі порівняно з поздовжніми, а поперечні обурення незначні (вітровий вплив, обурення, спричинені несиметрією обтікання корпусу судна), можна вважати, що переважним рухом води і судна буде рух у напрямку поздовжньої осі камери. У цьому разі можна застосувати теорію мілководдя (рівняння Сен-Венана в лінійній формі), вважаючи, що всі величини, які визначають рух рідини, залежать лише від координати (x) і часу (t).

Як такі величини можна прийняти витрату рідини $Q(x,t)$ і ординату її вільної поверхні $\xi(x,t)$. При цьому функції $Q(x,t)$ і $\xi(x,t)$ вважатимемо безперервними і диференційованими. За наявності витрати динамічний ефект виражається в появі додаткового перепаду рівня. Рівняння нерозривності в цьому випадку можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (10)$$

де $Q = u_i \Omega_i$;

u_i – поздовжня швидкість потоку обтікання;

Ω_i – площа поперечної течії води на ділянці, що розглядається;

$\Omega = f(x, \xi, z_0)$ – на вільній ділянці камери (рис.1)

$\Omega = F_k - \Omega_x + B_c(z_0 - \Delta \xi)$ – на ділянці, зайнятій судном,

q – витрата води під час обтікання корпусу в процесі заходу в шлюз.

Динамічне рівняння руху рідини в камері для виділеного об'єму може бути представлено у вигляді:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{\Omega} \right) + g \Omega \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

Це рівняння являє собою рівняння довгих хвиль у камері шлюзу з відтоком по довжині. Крім рівнянь (10) і (11), що описують рух рідини, необхідно додати ще рівняння коливань судна.

Натурні та експериментальні дослідження засвідчили, що під час заходу в шлюз поперечні горизонтальні зміщення центру тяжіння судна і бортова хитація практично відсутні. Тому положення судна під час маневру визначається додатковими координатами: вертикальним зміщенням центру тяжіння судна і кутовим нахилом судна (диферентом). За наявності поступальної швидкості вертикальна і кільова хитація симетричного щодо осі симетрії судна протікають спільно.

При складанні рівнянь зробимо такі допущення:

- поверхню незворушеної води вважаємо плоскою;
- судно симетричне щодо діаметральної площини відносно форми обводів корпусу і розподілу завантаження;
- переміщення і кутові відхилення судна від положення рівноваги вважаємо малими і нехтуємо величинами другого порядку.

З урахуванням цього, рівняння, що характеризують вертикальну і кильову хитавицю судна, можна подати у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} (m + \lambda_{33}) \frac{d^2 z_G}{dt^2} + f_{1\xi} \frac{dz_G}{dt} + f_{2\xi}(z_G) &= f_{3\xi}(t) \\ (J_y + \lambda_{55}) \frac{d^2 \Psi}{dt^2} + f_{1\Psi} \frac{d\Psi}{dt} + f_{2\Psi}(\Psi) &= f_{3\Psi}(t) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де λ_{33} – приєднана маса в напрямку осі Z;

λ_{55} – приєднаний момент інерції відносно осі Y;

$f_{1\xi}, f_{1\Psi}$ – відповідно величини, що визначають опір вертикальній хитавиці і момент опору кильовій хитавиці, що залежать від швидкості руху;

$f_{2\xi}, f_{2\Psi}$ – відповідно величини, що враховують додаткову силу і момент підтримання і являють собою відновлювальну силу і момент;

$f_{3\xi}, f_{3\Psi}$ – відповідно величини, що визначають дію збурювальних сили і моменту, які залежать від часу;

Диференціальне рівняння вертикальної хитавиці отримано з урахуванням того, що Архімедові сили підтримання (y, V) врівноважується силою ваги (D).

Вид диференціальних рівнянь залежить від характеру функцій f_1, f_2, f_3 .

Відновлювальні сили і моменти ($f_{2\xi}$) і ($f_{2\Psi}$), а також головна частина сил, що обурюють, ($f_{3\xi}$) і ($f_{3\Psi}$) характеризують вплив на судно навколишньої рідини і не враховують зміни її руху, спричиненої хитавицею судна. Інерційні сили і демпферні сили, а також додаткова частина сил, що обурюють, є наслідком зворотного впливу корпусу судна на характер руху навколишньої рідини.

Якщо припустити, що поблизу ватерлінії обводи корпусу є прямостінними, то вертикальна і кильова хитавиці в чистому вигляді відбуваються за умови, коли центр тяжіння знаходиться на одній вертикалі з центром ваги площі ватерлінії. На цій же вертикалі має розташовуватися центр інерції приєднаних мас (ця умова у транспортних суден без диференту дотримується з достатньою для практики точністю).

У разі вертикального занурення центру тяжіння судна величина відновлювальної сили визначиться з виразу:

$$f_{2\xi} = \gamma \cdot S \cdot Z_g \quad (13)$$

де $\gamma = \rho \cdot g$ – питома вага води; S – площа діючої ватерлінії.

Експериментальні дослідження показали, що за малих амплітуд коливань судна всі види опору хитавиці можуть бути представлені лінійними функціями від відповідних швидкостей хитавиці:

$$\left. \begin{aligned} f_{1\xi} \left(\frac{dz_G}{dt} \right) &= N_\xi \frac{dz_G}{dt} \\ f_{1\Psi} \left(\frac{d\Psi}{dt} \right) &= N_\Psi \frac{d\Psi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Тут N_ξ і N_Ψ – коефіцієнти пропорційності, звані коефіцієнтами опору хитавиці або коефіцієнтами демпфуючих сил.

За кильової хитавиці відновлювальний момент визначається за метацентричною формулою поздовжньої остійності:

$$f_{2\Psi}(\Psi) = DH_0\Psi = D(R - a)\Psi \quad (15)$$

де $H_0 = (R - a)$ – початкова поздовжня метацентрична висота;

R – великий метацентричний радіус;

a – підвищення центру тяжіння над центром величини.

Система рівнянь, що характеризує коливальні рухи судна в процесі маневру, набуває вигляду:

$$\left. \begin{aligned} (m + \lambda_{33}) \frac{d^2 Z_G}{dt^2} + N_\xi \frac{dZ_G}{dt} + \gamma S Z_G &= \int_{l_1}^{l_2} B_c \xi dx \\ (m + \lambda_{55}) \frac{d^2 \Psi}{dt^2} + N_\Psi \frac{d\Psi}{dt} + DH_0 \Psi &= \int_{l_1}^{l_2} B_c (x - l_0) \xi dx \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Таким чином, рівняння (9), (10), (11), (12) являють собою повну математичну модель маневру заходу судна в камеру шлюзу. Невідомими в цій математичній моделі є величини:

$$x_0, y_0, \theta, V_x, V_y, \omega, Q, \xi, Z_G, \Psi$$

Для однозначного розв'язання задачі основні невідомі повинні задовольняти і деяким додатковим умовам:

початковим (при $t=0$) та граничний (при $x=0$ та $x=1$), тут l – загальна довжина розглянутої ділянки шлюзу, що розглядається.

Вочевидь, цю задачу в повній її постановці можна розв'язати тільки чисельно. Однак, основні закономірності з достатньою для практики точністю можна одержати за допомогою низки спрощувальних припущень, що дають змогу знайти й аналітичне розв'язання.

Висновки. Аналіз показав, що маневрування судна під час входу в камеру шлюзу супроводжується інтенсивними гідродинамічними явищами, такими як хвильова інтерференція, підвищення рівня води перед носовою частиною судна, збільшення опору тертя і хвильового опору. Ці явища значною мірою визначають динаміку руху судна та впливають на параметри його осідання, диференту і швидкості. Представлена математична модель дозволяє врахувати гідродинамічні характеристики судна як інерційного, так і неінерційного походження, що залежить від положення судна відносно стінок шлюзу. Модель об'єднує рівняння руху судна, обтікання рідиною корпусу і хвильові явища. Це дозволяє більш точно прогнозувати поведінку судна під час маневру. Встановлено, що на коротких ділянках входу в шлюз критична швидкість потоку суттєво знижується через збільшення ступеня стиснення потоку. Це створює додаткові сили інерції, які впливають на керованість судна. Розрахунки підтверджують, що для різних співвідношень стиснення потоку значення критичних швидкостей суттєво змінюються, що вимагає врахування цих факторів у процесі планування маневру. Використання теорії мілководдя дозволило детально описати динаміку потоку, включаючи витрати рідини і зміни рівня вільної поверхні. Ці аспекти є ключовими для оцінки впливу рідини на корпус судна в умовах обмеженого простору шлюзу. Вивчено вертикальні і кильові коливання судна, які виникають під час маневру. Було показано, що ці рухи суттєво впливають на керованість судна і можуть бути описані лінійними рівняннями, що враховують демпфуючі сили та моменти. Запропонована модель і отримані результати можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо оптимізації заходу суден у шлюз, підвищення точності прогнозування їх поведінки та забезпечення безпеки маневрування. Це має особливе значення для великотоннажних суден, які мають підвищені вимоги до точності заходу в шлюз.

Проведене дослідження дає змогу поглибити розуміння складних гідродинамічних процесів, що відбуваються під час шлюзування суден, та створює науково-обґрунтовану базу для удосконалення

методів управління цими процесами. Результати роботи можуть бути інтегровані у системи навігаційного забезпечення та моделювання для підвищення ефективності та безпеки експлуатації шлюзів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Yuan, Z. (2018). Ship hydrodynamics in confined waterways. *Journal of Ship Research*, 63(01), 16–29. <https://doi.org/10.5957/josr.04170020>
2. Maljković, M., Pavić, I., Meštrović, T., & Perković, M. (2024). Ship Maneuvering in Shallow and narrow Waters: Predictive Methods and model Development review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1450. <https://doi.org/10.3390/jmse12081450>
3. Linde, F., Ouahsine, A., Huybrechts, N., & Sargent, P. (2016). Three-Dimensional numerical simulation of ship resistance in restricted waterways: effect of ship sinkage and channel restriction. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 143(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000353](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000353)
4. Sjöberg, H.; Roos, H.; Edvall, A.; Hallbjörner, F. Safe Handling of Ultra Large Container Ships in Strong Wind; Gothenburg Pilot 2016-12-01; Final Report—Version 2.0; Swedish Maritime Administration: Norrköping, Sweden.
5. Fan, S.; Yang, Z.; Wang, J.; Marsland, J. Shipping accident analysis in restricted waters: Lesson from the Suez Canal blockage in 2021. *Ocean Eng.* 2022, 266, 113119.
6. Terziev, M.; Tezdogan, T.; Oguz, E.; Gourlay, T.; Demirel, Y.K.; Incecik, A. Numerical investigation of the behaviour and performance of ships advancing through restricted shallow waters. *J. Fluids Struct.* 2018, 76, 185–215.
7. Lee, S.; Hong, C. Study on the course stability of very large vessels in shallow water using CFD. *Ocean Eng.* 2017, 145, 395–405.
8. Gucma, L. Risk Management in the Area of Bridges Situated on Waterways in the Aspect of Ship Collisions, 1st ed.; Marine Traffic Engineering—MTE: Szczecin, Poland, 2024.
9. Özden, M.C.; Kurdoğlu, S.; Demir, E.; Sariöz, K.; Gören, Ö. A compact motion controller-based planar motion mechanism for captive manoeuvring tests. *Ocean Eng.* 2021, 220, 108195.
10. Zhang, X.G.; Zou, Z.J. Identification of Abkowitz model for ship manoeuvring motion using ε -support vector regression. *J. Hydrodyn.* 2011, 23, 353–360.

REFERENCES

1. Yuan, Z. (2018). Ship hydrodynamics in confined waterways. *Journal of Ship Research*, 63(01), 16–29. <https://doi.org/10.5957/josr.04170020>
2. Maljković, M., Pavić, I., Meštrović, T., & Perković, M. (2024). Ship Maneuvering in Shallow and narrow Waters: Predictive Methods and model Development review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1450. <https://doi.org/10.3390/jmse12081450>
3. Linde, F., Ouahsine, A., Huybrechts, N., & Sargent, P. (2016). Three-Dimensional numerical simulation of ship resistance in restricted waterways: effect of ship sinkage and channel restriction. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 143(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000353](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000353)
4. Sjöberg, H.; Roos, H.; Edvall, A.; Hallbjörner, F. Safe Handling of Ultra Large Container Ships in Strong Wind; Gothenburg Pilot 2016-12-01; Final Report—Version 2.0; Swedish Maritime Administration: Norrköping, Sweden.
5. Fan, S.; Yang, Z.; Wang, J.; Marsland, J. Shipping accident analysis in restricted waters: Lesson from the Suez Canal blockage in 2021. *Ocean Eng.* 2022, 266, 113119.
6. Terziev, M.; Tezdogan, T.; Oguz, E.; Gourlay, T.; Demirel, Y.K.; Incecik, A. Numerical investigation of the behaviour and performance of ships advancing through restricted shallow waters. *J. Fluids Struct.* 2018, 76, 185–215.
7. Lee, S.; Hong, C. Study on the course stability of very large vessels in shallow water using CFD. *Ocean Eng.* 2017, 145, 395–405.

8. Gucma, L. Risk Management in the Area of Bridges Situated on Waterways in the Aspect of Ship Collisions, 1st ed.; Marine Traffic Engineering—MTE: Szczecin, Poland, 2024.
9. Özden, M.C.; Kurdoğlu, S.; Demir, E.; Sarıöz, K.; Gören, Ö. A compact motion controller-based planar motion mechanism for captive manoeuvring tests. *Ocean Eng.* 2021, 220, 108195.
10. Zhang, X.G.; Zou, Z.J. Identification of Abkowitz model for ship manoeuvring motion using ε -support vector regression. *J. Hydrodyn.* 2011, 23, 353–360.

Honcharuk I.P., Golovan A.I., Pimenova A.Y.

ANALYSIS AND MODELING OF THE VESSEL MOVEMENT PROCESS DURING THE ENTRY INTO THE LOCK CHAMBER

The article presents the results of a study of the hydrodynamic features of ship movement during entry into the lock chamber. This is a complex and responsible maneuver, especially for large-tonnage vessels. The study established that significant hydrodynamic phenomena arise in the conditions of limited space in the lock chamber. These include wave interference, an increase of the water level in front of the bow of the vessel, flow compression and an increase of wave resistance. These processes significantly affect the ship's motion parameters, in particular, its speed, draft, differential, and stability during maneuver. A mathematical model of ship motion was developed that takes into account the specifics of hydrodynamic conditions in the lock chamber. It combines the equations of ship motion, the description of the flow state and wave phenomena. Particular attention is paid to the impact of flow compression on critical speeds, which are important for assessing safety and maneuvering efficiency. The model allows predicting the vessel's behavior during lock entry, analyzing the impact of various factors and developing recommendations for practical application. Experimental studies have confirmed that the proposed model is effective for analyzing the movement of large-tonnage vessels with increased requirements for maneuvering accuracy. The results of the work can be used to optimize locking processes, develop new approaches to navigation support and improve the safety of locks. They also improve existing lock design methods and procedures for maneuvering in confined water areas. The proposed approaches have significant potential for integration into modern navigation systems, allowing for complex hydrodynamic conditions and reducing environmental and economic risks associated with navigation in narrow and restricted waterways.

Keywords: maneuvering, vessel, navigation safety, locking, critical speed, decision-making, hydrodynamics, lock chamber, mathematical modeling, optimization, large vessels, narrowness.

Гончарук І.П., Головань А.І.

ОРГАНІЗАЦІЙНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ПРОФІЛАКТИКИ СТРЕСУ ТА ПОКРАЩЕННЯ ПСИХОЛОГІЧНОГО СТАНУ МОРЯКІВ НА СУДНІ

У цьому дослідженні вивчається психологічне здоров'я моряків і пов'язані з ним ризики тривалих періодів ізоляції від соціального середовища, високих робочих навантажень і обмеженого особистого простору. Відомо, що ці фактори становлять значні ризики для психологічного здоров'я моряків, які можуть проявлятися у вигляді стресу, депресії, хронічної втоми та соціальної ізоляції. Вплив цих факторів негативно позначається на ефективності виконання службових обов'язків, командній роботі та загальній безпеці мореплавства. Мета цього дослідження - проаналізувати сучасні підходи до профілактики стресу та ізоляції серед екіпажу суден, визначити ефективні методи психологічної підтримки моряків, а також дослідити можливості використання новітніх технологій, таких як телемедицина та доступ до Інтернету, для забезпечення психічного здоров'я екіпажу під час тривалих рейсів. У статті використано низку аналітичних методів, включаючи огляд сучасної наукової літератури, класифікацію факторів стресу та узагальнення практичних заходів профілактики. Такий системний підхід дозволяє запропонувати ефективні рішення проблеми. Дослідження визначило ізоляцію від сім'ї, обмежену соціальну взаємодію, мовні та культурні бар'єри в багатонаціональних екіпажах, а також фізичні умови праці, включаючи шум, вібрацію та екстремальні температури, як ключові фактори стресу для моряків. Запропоновані профілактичні заходи включають створення сприятливого робочого середовища, організацію дозвілля, проведення психологічних тренінгів, використання мобільних додатків для моніторингу стану здоров'я та забезпечення стабільного доступу до Інтернету. Інтеграція профілактичних заходів та новітніх цифрових технологій може значно знизити рівень стресу та ізоляції серед моряків, підвищити їхню психологічну стійкість та професійну ефективність. Спільні зусилля судновласників, капітанів та екіпажів сприяють створенню сприятливої атмосфери на борту судна, що, в свою чергу, покращує безпеку та загальний добробут моряків.

Ключові слова: стрес, ізоляція, екіпаж, психологічна підтримка, телемедицина, Інтернет, здоров'я, судноплавство.

Постановка проблеми. Робота екіпажу суден у тривалих морських рейсах характеризується особливими умовами, що створюють значні психологічні виклики. Ізоляція від звичного соціального середовища, обмеженість простору, високі фізичні та психоемоційні навантаження, а також тривале перебування в закритих колективах формують підґрунтя для виникнення стресу, депресії, хронічної втоми та соціальної ізоляції серед моряків. Ці чинники безпосередньо впливають на психологічний стан екіпажу, його фізичне здоров'я, продуктивність роботи та безпеку судноплавства в цілому.

Сучасні виклики у галузі морського транспорту вимагають впровадження системного підходу до профілактики стресу та ізоляції серед екіпажу суден. Особливу актуальність набуває розробка ефективних заходів психологічної підтримки, що поєднують організаційні інструменти з можливостями новітніх цифрових технологій, таких як телемедицина, мобільні додатки для моніторингу здоров'я та стабільний доступ до Інтернету.

Відсутність належної уваги до психологічного благополуччя екіпажу може призвести до підвищення рівня професійного вигорання, зростання кількості помилок під час виконання робочих

завдань та погіршення загальної безпеки судноплавства. У зв'язку з цим необхідно зосередитися на дослідженні сучасних підходів до профілактики стресу та ізоляції, а також впровадженні інноваційних рішень, спрямованих на збереження ментального здоров'я моряків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Робота на борту судна часто пов'язана зі значними розумовими та фізичними навантаженнями, які важко порівняти з тими, що виникають у представників берегових професій [1]. Моряки відіграють відносно унікальну роль, оскільки вони перебувають на робочому місці як в робочий, так і в неробочий час, маючи в компанії лише своїх колег, що робить їх надзвичайно ізольованою робочою групою [2]. Оскільки вони проводять так багато часу зі своїми колегами, важливо, щоб ці відносини були позитивними і щоб існувала згуртованість між командами; однак дослідження показують, що часто виникають конфлікти між різними званнями і відділами, що в поєднанні з тривалим перебуванням далеко від дому і сім'ї може призвести до самотності і туги за домівкою [3, 4]. Моряки також зазвичай ізольовані у фізичному середовищі, яке не є оптимальним для психічного здоров'я: перебування на борту судна може передбачати тривалий вплив несприятливих фізичних умов, таких як гучний шум, вібрація, холодні періоди, високі температури і нестабільні умови вологості [5]. Щоб покращити добробут екіпажу, морські менеджери повинні розглянути можливість посилення моніторингу психічного здоров'я, коригування чисельності екіпажу, а також забезпечення освіти та підтримки [6]. Дистанційне психологічне втручання, мобільні медичні послуги та онлайн-сервіси психічного здоров'я можуть допомогти запобігти стресу та зменшити ізоляцію серед працівників морської індустрії [7]. Стійкість, досвід роботи та інструментальна підтримка пов'язані з нижчим рівнем стресу серед моряків під час тривалих рейсів. Індекс загального психологічного благополуччя можна використовувати для оцінки рівня стресу серед різних категорій моряків на торговельних судах [8]. Моряки відчувають високий психологічний стрес через обмежену свободу прийняття рішень, ризиковану роботу та фізичні/психосоціальні умови праці [9, 10]. Таким чином, впровадження системного підходу до управління стресовими факторами та застосування сучасних технологій для моніторингу психічного здоров'я є ключовими для підтримки добробуту екіпажу. Забезпечення ефективної психологічної підтримки та профілактичних заходів допоможе значно зменшити рівень стресу і вплив ізоляції серед моряків під час тривалих рейсів.

Мета дослідження є аналіз сучасних підходів до психологічної підтримки на борту суден, оцінка впливу стресу та ізоляції на ментальне здоров'я і професійну діяльність моряків, а також визначення ефективних методів профілактики стресу та підтримки ментального здоров'я екіпажу в умовах тривалих морських рейсів. Дослідження також спрямоване на вивчення можливостей впровадження новітніх технологій, таких як телемедицина та Інтернет-зв'язок, для забезпечення дистанційної психологічної допомоги, що сприяє створенню позитивного робочого середовища та підвищенню безпеки судноплавства.

Основні результати дослідження. Дослідження сучасних підходів до профілактики стресу та ізоляції на борту суден фокусується на визначенні методів, які можуть ефективно підтримувати ментальне здоров'я екіпажу в умовах тривалих морських рейсів і фізичної ізоляції. Ізоляція, відсутність соціальної підтримки, інтенсивна робота і обмеженість простору — це основні виклики, з якими стикаються моряки. Тому дослідження акцентується на профілактичних заходах, які можуть зменшити психологічний тиск і допомогти екіпажу ефективно справлятися з труднощами.

Профілактика стресу та ізоляції на борту суден є важливим аспектом забезпечення ментального здоров'я екіпажу та безпеки судноплавства. Сучасні підходи до цього питання охоплюють кілька ключових напрямів:

Організаційні заходи - створення підтримуючого робочого середовища: Формування позитивної атмосфери на борту через підтримку командного духу, згуртованість екіпажу та ефективну комунікацію між членами команди; Збалансування робочого навантаження: Оптимізація

графіків роботи і відпочинку для уникнення перевтоми; Ротація екіпажу: Забезпечення регулярної заміни членів екіпажу для скорочення часу перебування в ізоляції.

Психологічна підтримка - проведення тренінгів і семінарів: Навчання моряків навичкам управління стресом, технікам релаксації та ефективного вирішення конфліктів; Психологічне консультування: Організація консультацій з професійними психологами або капеланами, які можуть надати підтримку в кризових ситуаціях; Підтримка взаємин: Стимулювання відкритого обговорення проблем у команді для попередження конфліктів.

Технологічні рішення - використання телемедицини: Забезпечення доступу до дистанційних психологічних консультацій через спеціалізовані платформи; Мобільні додатки для моніторингу здоров'я: Використання програм для відстеження рівня стресу, якості сну та емоційного стану; Інтернет-зв'язок: Надання екіпажу стабільного доступу до Інтернету для підтримки зв'язку з родиною та друзями, що знижує відчуття ізоляції.

Організація дозвілля - активне використання вільного часу: Проведення спортивних, культурних і соціальних заходів на борту; Розважальні заходи: Забезпечення доступу до фільмів, книг, ігор та інших засобів для розслаблення; Розвиток хобі: Заохочення членів екіпажу до занять, які сприяють зняттю стресу та покращенню настрою.

Культурна адаптація - навчання культурної компетенції: Проведення тренінгів для моряків з різних країн, щоб зменшити мовні та культурні бар'єри; Підтримка багатонаціональних екіпажів: Організація програм для покращення співпраці та взаєморозуміння між представниками різних національностей.

Профілактика вигорання - зниження впливу фізичних стресорів: Забезпечення комфортних умов роботи (мінімізація шуму, вібрації, забезпечення оптимальної температури та вологості); Регулярні медичні огляди: Моніторинг фізичного та психологічного стану екіпажу.

Ці підходи, впроваджені комплексно, дозволяють ефективно запобігати стресу та ізоляції серед моряків, забезпечуючи їхнє ментальне здоров'я та підвищуючи загальний рівень безпеки судноплавства.

Для вивчення профілактичних заходів, спрямованих на зменшення психологічного тиску та допомогу екіпажу у вирішенні труднощів, застосовано комплексний підхід, який охоплює кілька ключових методів:

Аналітичний підхід - у рамках цього підходу проведено: Систематичний аналіз наукової літератури, що дозволив виявити перевірені методи профілактики стресу та ізоляції серед екіпажу суден; Дослідження кейсів: Аналіз успішних прикладів впровадження профілактичних заходів на борту суден, що дає змогу виявити ефективні практики для їх подальшого впровадження.

Опитувальний підхід - Соціологічні опитування серед моряків для збору даних про чинники стресу, ізоляції та ефективність впроваджених заходів; Інтерв'ю з екіпажем та капітанами: Здійснено якісний аналіз думок і досвіду щодо заходів психологічної підтримки; Анкетування з використанням стандартизованих опитувальників (GHQ, PSS, WAI) для оцінки рівня стресу та ментального стану екіпажу.

Експериментальний підхід - Пілотні програми з профілактики стресу: Впроваджено експериментальні заходи, такі як психологічні тренінги, покращення умов праці та організація дозвілля; Тестування цифрових рішень: Перевірено мобільні додатки для моніторингу стану екіпажу та платформи для дистанційного консультування.

Моделювання - Симуляційні сценарії для моделювання стресових ситуацій і оцінки ефективності запропонованих заходів; Концептуальні моделі підтримки для створення структурованих схем управління психологічним станом екіпажу.

Спостереження - Моніторинг стану екіпажу під час тривалих рейсів, включаючи використання спеціалізованих сенсорів для оцінки рівня стресу. Аналіз поведінкових змін, що відображає ефективність впроваджених заходів профілактики.

Інноваційні підходи - Використання біометричних даних для оцінки стану екіпажу, включаючи аналіз серцебиття, тиску та інших фізіологічних показників. Технології віртуальної реальності (VR): Використання VR-симуляторів для тренувань з управління стресом.

Комплексне застосування зазначених методів дозволило оцінити ефективність різних підходів до профілактики стресу та ізоляції, а також запропонувати рекомендації для покращення ментального здоров'я екіпажу й підвищення рівня безпеки судноплавства.

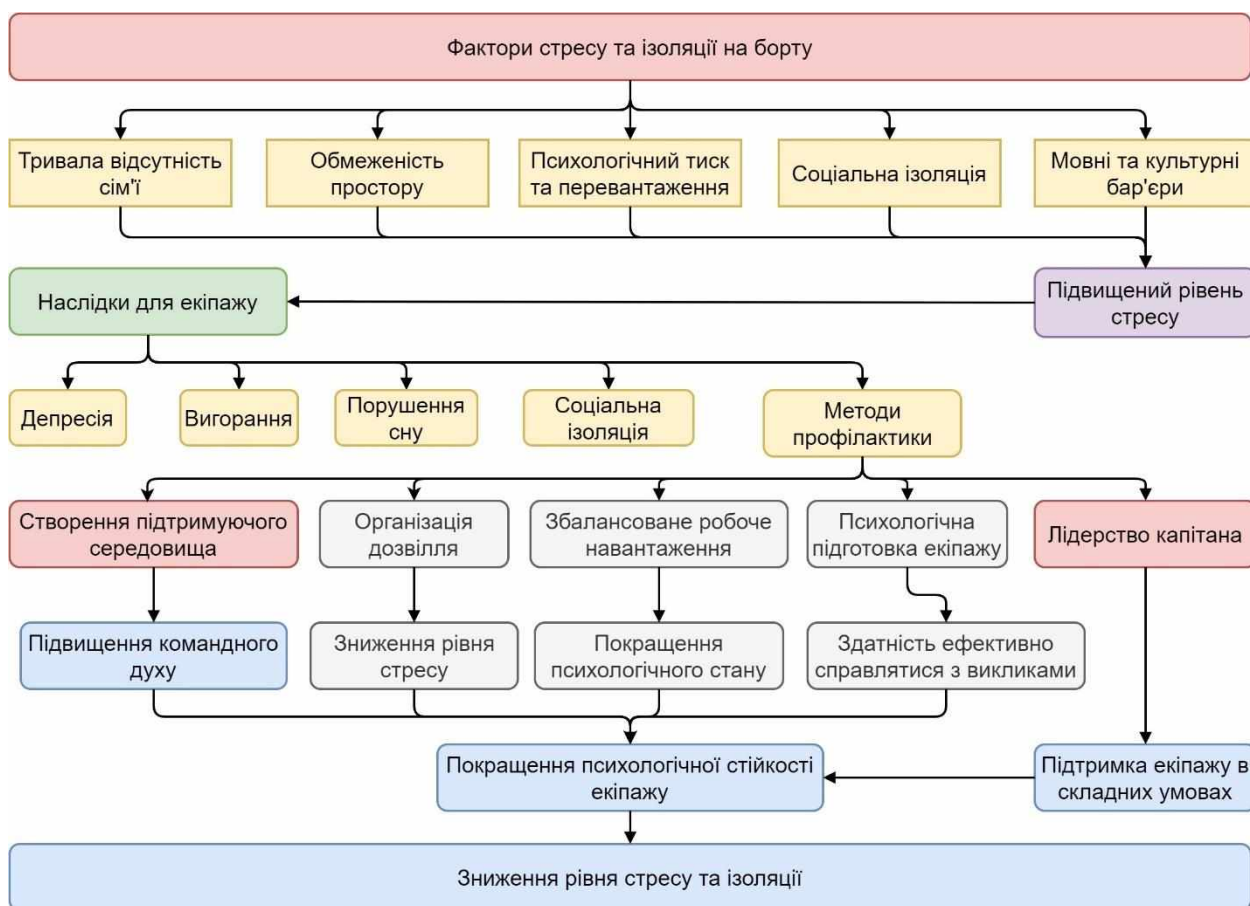


Рисунок 1 – Концептуальна схема процесу «Психологічна допомога та підтримка на борту: профілактика стресу та боротьба з ізоляцією»

Опис концептуальної схеми процесу «Психологічна допомога та підтримка на борту: профілактика стресу та боротьба з ізоляцією»:

1. Фактори стресу та ізоляції на борту - в основі проблеми знаходяться ключові фактори, які спричиняють стрес та ізоляцію серед екіпажу. До них відносяться: тривала відсутність сім'ї та соціальних контактів. Обмеженість простору на судні. Психологічний тиск та перевантаження роботою. Соціальна ізоляція через відсутність постійної взаємодії з зовнішнім світом. Мовні та культурні бар'єри серед багатонаціонального екіпажу.

2. Наслідки для екіпажу - усі ці фактори об'єднуються в загальний результат — підвищений рівень стресу, що веде до серйозних психологічних та фізичних проблем, таких як: депресія; вигорання; порушення сну та інші фізичні розлади; соціальна ізоляція та втрата соціальних навичок.

3. Методи профілактики - для протидії цим негативним наслідкам використовуються різні методи профілактики та психологічної підтримки. До них входять: створення підтримуючого середовища на судні, яке підвищує командний дух; організація дозвілля, яке знижує рівень стресу; збалансоване робоче навантаження, яке покращує психологічний стан екіпажу; психологічна підготовка екіпажу, що допомагає краще справлятися з викликами; лідерство капітана, яке забезпечує підтримку команди в складних умовах.

4. Результати профілактичних заходів - впровадження цих методів допомагає досягти позитивних результатів, таких як: Підвищення командного духу; зниження рівня стресу; покращення загального психологічного стану екіпажу; здатність екіпажу справлятися з викликами морських умов; підтримка екіпажу з боку лідера у важкі моменти.

5. Покращення психологічної стійкості екіпажу - підсумковий результат цих заходів полягає в покращенні психологічної стійкості екіпажу, що в кінцевому результаті призводить до: зниження рівня стресу та відчуття ізоляції, що позитивно впливає на роботу екіпажу та їхнє психологічне благополуччя під час тривалих морських рейсів.

Ця концептуальна схема відображає ключові фактори стресу та ізоляції на борту судна, їх наслідки для екіпажу, а також методи профілактики та психологічної підтримки, які можуть допомогти зменшити вплив цих негативних чинників.

Висновки. Психологічне здоров'я екіпажу є ключовим фактором, що впливає на безпеку судноплавства та ефективність виконання завдань під час тривалих рейсів. У зв'язку з цим, необхідно інтегрувати профілактичні заходи, спрямовані на підтримку ментального здоров'я моряків. Такі заходи повинні включати організацію регулярних тренінгів, забезпечення дозвілля, створення сприятливого робочого середовища та підтримку командного духу. Сучасні технології, зокрема телемедицина та Інтернет-зв'язок, набувають все більшого значення в подоланні проблем ізоляції екіпажу. Вони надають можливість морякам отримувати психологічну допомогу в режимі реального часу та підтримувати контакт із близькими, що значно знижує рівень стресу та підвищує загальний добробут. Досягнення ефективної психологічної підтримки на борту можливе лише за умови тісної співпраці судновласників, капітанів і членів екіпажу. Спільні зусилля у створенні позитивного та підтримуючого середовища сприятимуть збереженню ментального здоров'я, підвищенню продуктивності роботи та забезпеченню безпеки судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Brooks, S. K., & Greenberg, N. Mental health and psychological wellbeing of maritime personnel: a systematic review. *BMC Psychology*. 2022. No 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-022-00850-4>
2. Sharma, M.. Remote diagnosis, monitoring and intervention for maritime industry workers: need and challenges. *International Maritime Health*. 2021. No 72(2). pp. 151–152. <https://doi.org/10.5603/imh.2021.0029>
3. Doyle, N., MacLachlan, M., Fraser, A., Stilz, R., Lismont, K., Cox, H., & McVeigh, J. Resilience and well-being amongst seafarers: cross-sectional study of crew across 51 ships. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2015. No 89(2). pp. 199–209. <https://doi.org/10.1007/s00420-015-1063-9>
4. D, G. Increase of the crew's well-being and reduction of stress. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2019. No XXII (1). pp. 83–90. <https://doi.org/10.21279/1454-864x-19-i1-011>
5. McVeigh, J., MacLachlan, M., Cox, H., Stilz, I. R., Fraser, A., Galligan, M., & Meachair, S. Ó. Effects of an on-board psychosocial programme on stress, resilience, and job satisfaction amongst a sample of merchant seafarers. *International Maritime Health*, 2021. No 72(4), pp. 268–282. <https://doi.org/10.5603/imh.2021.0051>

6. Agterberg, G., & Passchier, J. Stress among Seamen. *Psychological Reports*. 1998. No 83(2). pp. 708–710. <https://doi.org/10.2466/pr0.1998.83.2.708>
7. Hystad, S. W., & Eid, J. Sleep and fatigue among seafarers: the role of environmental stressors, duration at sea and psychological capital. *Safety and Health at Work*. 2016. No 7(4), pp. 363–371. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.05.006>
8. Oldenburg, M., Baur, X., & Schlaich, C. Occupational risks and challenges of seafaring. *Journal of Occupational Health*, 2010. No 52(5), pp. 249–256. <https://doi.org/10.1539/joh.k10004>
9. Hayes-Mejia, R., & Stafström, M. Wellbeing and happiness and their association with working conditions at sea: a cross-sectional study among the global workforce of seafarers. *INQUIRY the Journal of Health Care Organization Provision and Financing*, 2024. No 61. <https://doi.org/10.1177/00469580241256349>
10. Hystad, S. W., Bartone, P. T., & Eid, J. Positive organizational behavior and safety in the offshore oil industry: Exploring the determinants of positive safety climate. *The Journal of Positive Psychology*. 2013 No 9(1), pp. 42–53. <https://doi.org/10.1080/17439760.2013.831467>

REFERENCES

1. Brooks, S. K., & Greenberg, N. (2022). Mental health and psychological wellbeing of maritime personnel: a systematic review. *BMC Psychology*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-022-00850-4>
2. Sharma, M. (2021). Remote diagnosis, monitoring and intervention for maritime industry workers: need and challenges. *International Maritime Health*, 72(2), 151–152. <https://doi.org/10.5603/imh.2021.0029>
3. Doyle, N., MacLachlan, M., Fraser, A., Stilz, R., Lismont, K., Cox, H., & McVeigh, J. (2015). Resilience and well-being amongst seafarers: cross-sectional study of crew across 51 ships. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 89(2), 199–209. <https://doi.org/10.1007/s00420-015-1063-9>
4. D, G. (2019). Increase of the crew's well-being and reduction of stress. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXII (1), 83–90. <https://doi.org/10.21279/1454-864x-19-i1-011>
5. McVeigh, J., MacLachlan, M., Cox, H., Stilz, I. R., Fraser, A., Galligan, M., & Meachair, S. Ó. (2021). Effects of an on-board psychosocial programme on stress, resilience, and job satisfaction amongst a sample of merchant seafarers. *International Maritime Health*, 72(4), 268–282. <https://doi.org/10.5603/imh.2021.0051>
6. Agterberg, G., & Passchier, J. (1998). Stress among Seamen. *Psychological Reports*, 83(2), 708–710. <https://doi.org/10.2466/pr0.1998.83.2.708>
7. Hystad, S. W., & Eid, J. (2016). Sleep and fatigue among seafarers: the role of environmental stressors, duration at sea and psychological capital. *Safety and Health at Work*, 7(4), 363–371. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.05.006>
8. Oldenburg, M., Baur, X., & Schlaich, C. (2010). Occupational risks and challenges of seafaring. *Journal of Occupational Health*, 52(5), 249–256. <https://doi.org/10.1539/joh.k10004>
9. Hayes-Mejia, R., & Stafström, M. (2024). Wellbeing and happiness and their association with working conditions at sea: a cross-sectional study among the global workforce of seafarers. *INQUIRY the Journal of Health Care Organization Provision and Financing*, 61. <https://doi.org/10.1177/00469580241256349>
10. Hystad, S. W., Bartone, P. T., & Eid, J. (2013). Positive organizational behavior and safety in the offshore oil industry: Exploring the determinants of positive safety climate. *The Journal of Positive Psychology*, 9(1), 42–53. <https://doi.org/10.1080/17439760.2013.831467>

Honcharuk I.P., Golovan A.I.**ORGANISATIONAL AND TECHNOLOGICAL MEASURES TO PREVENT STRESS AND IMPROVE THE MENTAL STATE OF SEAFARERS ON BOARD**

The present study investigates the psychological health of seafarers and the associated risks of prolonged periods of isolation from the social environment, high workloads and limited personal space. These factors are known to pose significant risks to the psychological health of seafarers, which can manifest themselves in the form of stress, depression, chronic fatigue and social isolation. The impact of these factors has a negative effect on the efficiency of performance of duties, teamwork and overall safety of navigation. The objective of this study is to analyse contemporary approaches to the prevention of stress and isolation among ship crew, to identify effective methods of psychological support for seafarers, and to explore the possibilities of using the latest technologies, such as telemedicine and Internet access, to ensure the mental health of the crew during long voyages. The article employs a range of analytical techniques, including the review of contemporary scientific literature, the categorisation of stress factors and the summarisation of practical prevention measures. This systematic approach enables the proposal of effective solutions to the problem. The study identified isolation from family, limited social interaction, language and cultural barriers in multinational crews, and physical working conditions, including noise, vibration and extreme temperatures, as the key stress factors for seafarers. The proposed preventive measures include the creation of a favourable working environment, the organisation of leisure activities, the conducting of psychological training, the use of mobile applications for health monitoring and the ensuring of stable Internet access. The integration of preventive measures and the latest digital technologies has the potential to significantly reduce the level of stress and isolation among seafarers, increasing their psychological resilience and professional efficiency. The joint efforts of shipowners, masters and crew contribute to a supportive atmosphere on board, which in turn improves safety and the overall well-being of seafarers.

Keywords: stress, isolation, crew, psychological support, telemedicine, Internet, health, shipping..

Заєць А.Ю., Оберто Сантана Л.Е.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СУЧАСНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ СИСТЕМ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ ТА АЗИМУТАЛЬНИХ РУШІВ В КОНТЕКСТІ ОКЕАНСЬКОГО СУДНОБУДУВАННЯ

У статті представлено комплексний аналіз сучасних пропульсивних систем морських суден з акцентом на порівнянні традиційних гвинтових установок та азимутальних рушійних комплексів (азиподів). На основі аналізу експлуатаційних даних, результатів математичного моделювання та досвіду впровадження інтелектуальних систем управління рушіями визначено оптимальні сфери застосування кожного типу рушіїв. Особливу увагу приділено перспективам впровадження азиподів у контексті сучасних вимог до екологічності та енергоефективності морського транспорту. Представлено рекомендації щодо вибору типу пропульсивної системи залежно від призначення та експлуатаційного профілю судна.

Ключові слова: *суднові рушії, азиподи, енергоефективність, пропульсивний комплекс, суднобудування, гвинтові системи.*

Вступ. Сучасне океанське суднобудування знаходиться на етапі значних технологічних трансформацій, обумовлених зростаючими вимогами до енергоефективності та екологічності морського транспорту. Міжнародна морська організація (ІМО) встановила амбітні цілі щодо зниження викидів парникових газів у морській галузі на 40% до 2030 року та на 70% до 2050 року порівняно з рівнем 2008 року [1]. Це спонукає до пошуку та впровадження інноваційних технічних рішень у сфері суднових пропульсивних систем.

Традиційні гвинтові установки, які довгий час були стандартом у суднобудуванні, поступово поступаються місцем більш сучасним системам, зокрема азимутальним рушійним комплексам. Ця тенденція обумовлена не лише прагненням до підвищення енергоефективності, але й необхідністю забезпечення кращої маневреності суден в умовах зростаючої інтенсивності морських перевезень та освоєння нових морських маршрутів, включаючи арктичні води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика вдосконалення суднових пропульсивних систем активно досліджується науковою спільнотою. Значний внесок у розвиток розуміння впливу різних факторів на енергоефективність суднових рушіїв внесли дослідження компанії Epiram [2], які базуються на аналізі великих масивів даних з понад 220 суден. За даними їх досліджень, навіть при намаганні підтримувати оптимальну швидкість, судна демонструють значні варіації у профілях швидкості, що призводить до надмірного споживання палива.

Carlton J.S. [3] у своїх дослідженнях детально аналізує гідродинамічні характеристики різних типів рушіїв та їх взаємодію з корпусом судна. Molland O.F. [4] представив комплексний аналіз впливу конструктивних особливостей рушіїв на їх енергетичну ефективність.

Сучасні дослідження у сфері азиподів представлені роботами фахівців компанії ABB [5], які підтверджують значний потенціал цих систем для підвищення енергоефективності суден. Mattsson P. та Andersson J. [6] провели детальний аналіз енергетичної ефективності азиподів в різних експлуатаційних умовах.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є комплексний аналіз енергетичної ефективності різних типів суднових рушіїв та обґрунтування перспектив їх застосування в сучасному океанському суднобудуванні.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. Провести порівняльний аналіз технічних характеристик традиційних гвинтових установок та азиподів;

2. Дослідити енергетичну ефективність різних типів рушіїв в характерних експлуатаційних режимах;
3. Визначити економічні аспекти застосування різних пропульсивних систем;
4. Розробити рекомендації щодо вибору типу рушійної установки залежно від призначення судна.

Основна частина. Історичний розвиток оптимізації швидкісних режимів. Аналіз історичного розвитку методів оптимізації швидкісних режимів суден показує еволюцію підходів до підвищення енергоефективності. На початкових етапах судна часто експлуатувались з «банкінгом» часу – використанням підвищених швидкостей на початку рейсу з подальшим сповільненням, що призводило до значних витрат палива [7].

Наступним етапом стала оптимізація комбінацій двигунів та їх навантажень, що дозволило частково знизити витрати палива. Однак цей підхід залишався чутливим до зовнішніх факторів, таких як погодні умови. Подальший розвиток привів до концепції постійної швидкості та прибуття точно в строк (Just-in-Time), що продемонструвало значний потенціал економії палива [8].

Аналіз сучасних рішень Becker Marine Systems. З точки зору розвитку пропульсивних систем значний інтерес представляють розробки компанії Becker Marine Systems, яка має майже 70-річний досвід у створенні судових рушіїв. Компанія пропонує комплексні рішення для підвищення енергоефективності суден, які включають:

1. Becker Flap Rudder. Найбільш поширений тип керма з закрилком, що забезпечує:

- Оптимізований профіль
- Зменшену вагу конструкції
- Покращену маневреність
- Максимальну підйомну силу
- Кут відхилення закрилка до 100°
- Зменшену потребу в буксирному забезпеченні

2. Becker Twist Rudder. Інноваційна конструкція керма з закрученою передньою кромкою, що дозволяє:

- Знизити кавітацію
- Зменшити ротаційні втрати
- Підвищити пропульсивний ККД
- Мінімізувати опір
- Знизити витрати палива
- Зменшити знос обладнання

3. Becker Mewis Duct. Енергозберігаючий пристрій для тихохідних суден повних обводів, що забезпечує:

- Економію палива до 8%
- Зниження викидів SOx та CO2
- Відсутність рухомих частин
- Можливість встановлення як на нові судна, так і при модернізації
- Період окупності 2-3 роки

4. Becker Mewis Duct Twisted. Модифікована версія для швидкісних суден, що дозволяє:

- Досягти економії палива близько 3%
- Знизити вібрацію
- Покращити курсову стійкість
- Оптимізувати обтікання корпусу

Технічні характеристики традиційних та азимутальних рушіїв. Традиційні гвинтові установки складаються з наступних основних елементів: головний двигун; валопровід з підшипниками; дейдвудні пристрої; гребний гвинт фіксованого або регульованого кроку.

Основними перевагами таких систем є:

- Перевірена часом надійність конструкції

- Відпрацьована технологія виготовлення та обслуговування
- Відносно низька вартість
- Простота обслуговування
- Менша кількість електронних систем керування

Основні недоліки:

- Втрати енергії в елементах передачі (до 3-4%)
- Обмежена маневреність
- Нижча ефективність при роботі в льодових умовах
- Необхідність використання додаткових підрулюючих пристроїв

Азимутальні рушійні комплекси. Азиподи представляють собою гондольні установки з електричним приводом, які можуть обертатися на 360°. Основні компоненти включають: електродвигун у гондолі; систему охолодження; систему управління; гребний гвинт; систему моніторингу та діагностики.

Переваги азиподів:

- Відсутність механічної передачі енергії
- Покращена маневреність
- Зменшення шуму та вібрації
- Більша ефективність у льодових умовах
- Менші габарити машинного відділення

Недоліки:

- Вища початкова вартість
- Складніша система керування
- Необхідність спеціальної підготовки персоналу
- Вища вартість обслуговування окремих компонентів

Енергетична ефективність різних типів рушіїв. За даними досліджень АВВ [5], використання азиподів дозволяє досягти наступних показників підвищення ефективності:

- Зниження витрат палива на 5-15% в залежності від типу судна та умов експлуатації
- Покращення маневреності, що особливо важливо при роботі в портах та вузкостях
- Зменшення часу виконання швартових операцій на 30-50%
- Підвищення льодопрохідності на 15-20%

Системи моніторингу Epiram [2] показують, що оптимізація роботи рушіїв повинна враховувати комплекс факторів:

- Вплив течій (припливних і морських)
- Погодні умови (вітер, хвилювання)
- Просідання судна на мілководді
- Ефективність двигунів при різних навантаженнях
- Вартість палива в різних регіонах
- Обмеження швидкості в окремих районах

За даними досліджень Epiram, використання інтелектуальних систем оптимізації швидкості дозволяє знизити витрати палива на рушійну установку на 3-5%. При цьому система враховує понад 1,5 мільярда вимірювань на день з різних датчиків для забезпечення оптимальних режимів роботи.

Економічні аспекти застосування різних типів рушіїв. При виборі типу рушійної установки необхідно враховувати не тільки початкові інвестиції, але й експлуатаційні витрати протягом всього життєвого циклу судна. Основні економічні фактори включають:

1. Капітальні витрати: вартість обладнання; витрати на монтаж; вартість систем керування; витрати на навчання персоналу.

2. Експлуатаційні витрати: витрати палива; витрати на технічне обслуговування; вартість запчастин; витрати на додаткове навчання екіпажу

3. Непрямі економічні ефекти: скорочення часу маневрування в портах; зменшення потреби в буксирному забезпеченні; підвищення експлуатаційної гнучкості; можливість роботи в складних умовах.

За даними аналізу експлуатаційних витрат [6], додаткові інвестиції в азиподи окупаються за 3-5 років експлуатації за рахунок економії палива та скорочення експлуатаційних витрат.

Перспективні напрямки розвитку пропульсивних систем. Аналіз сучасних тенденцій розвитку суднових рушіїв показує наступні основні напрямки:

1. Інтеграція систем автоматичного управління: оптимізація режимів роботи в реальному часі; прогнозне обслуговування на основі моніторингу стану; автоматична адаптація до змінних умов експлуатації.

2. Вдосконалення конструкції: оптимізація геометрії лопатей; застосування композитних матеріалів; покращення гідродинамічних характеристик.

3. Розвиток гібридних систем: комбінування різних типів рушіїв; інтеграція з альтернативними джерелами енергії; використання систем накопичення енергії.

4. Підвищення екологічності: зниження підводного шуму; мінімізація впливу на морське середовище; зменшення викидів парникових газів.

Порівняльний аналіз впливу типу рушіїв на безпеку мореплавства. На основі аналізу статистичних даних за період 2015-2023 років від провідних класифікаційних товариств (DNV GL, Lloyd's Register, Bureau Veritas) можна виділити наступні ключові показники безпеки:

1. *Статистика аварійності (враховувались інциденти, пов'язані з відмовами пропульсивних систем):*

- Судна з традиційними рушійми: 2,8 інцидентів на 1000 судно-днів;
- Судна з азиподами: 1,9 інцидентів на 1000 судно-днів.

2. *Розподіл типів інцидентів:*

Традиційні рушії:

- Механічні пошкодження валопроводу: 35%;
- Відмови підшипників: 28%;
- Пошкодження гребних гвинтів: 22%;
- Відмови систем управління: 15%.

Азиподи:

- Відмови електричних систем: 42%;
- Проблеми з системами охолодження: 25%;
- Механічні пошкодження гвинтів: 18%;
- Відмови систем управління: 15%.

3. *Час відновлення працездатності (при наявності необхідних запчастин та кваліфікованого персоналу):*

- Традиційні системи: середній час ремонту 72 години;
- Азиподи: середній час ремонту 48 годин.

4. *Вплив на маневрені характеристики:*

Порівняльні випробування показали результати, що представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати порівняння впливу на маневрені характеристики використання традиційних рушіїв та азиподів

Параметр	Традиційні рушії	Азиподи	Покращення
Діаметр циркуляції	4,2L*	2,8L*	33%
Гальмівний шлях	3,8L*	2,5L*	34%
Час повороту на 180°	220 с	145 с	34%
Точність утримання позиції	±15 м	±5 м	67%
*L – довжина судна			

5. *Безпека в екстремальних умовах.* Статистика експлуатації в льодових умовах (2018-2023): зменшення кількості пошкоджень корпусу при роботі в льодах на 45% для суден з аzipодами; підвищення надійності управління в умовах сильного хвилювання на 35%; зниження ризику втрати управління при відмові одного з рушіїв на 60%.

6. *Економічні аспекти безпеки.* Аналіз страхових випадків показує: зниження страхових премій на 15-20% для суден з аzipодами; зменшення витрат на ліквідацію наслідків аварій на 25%; скорочення простоїв через технічні несправності на 30%.

7. *Вплив людського фактору.* За даними аналізу інцидентів: 45% аварійних ситуацій на судах з традиційними рушійми пов'язані з людським фактором; 28% інцидентів на судах з аzipодами пов'язані з людським фактором. Це пояснюється: вищим рівнем автоматизації аzipодів; більш інтуїтивним управлінням; наявністю систем попередження помилкових дій.

8. *Екологічні аспекти безпеки.* Порівняльний аналіз впливу на морське середовище: зниження рівня підводного шуму на 15-20% при використанні аzipодів; зменшення ризику розливу нафтопродуктів через відсутність дейдвудних сальників; покращення маневреності знижує ризик навігаційних інцидентів в екологічно чутливих зонах.

Результати дослідження. На основі проведеного аналізу встановлено:

1. Аzipоди забезпечують підвищення енергетичної ефективності на 5-15% порівняно з традиційними установками при експлуатації у відкритому морі.

2. Найбільша ефективність аzipодів досягається на судах з високими вимогами до маневреності та при роботі в складних умовах (льодове плавання, обмежені акваторії).

3. Використання інтелектуальних систем оптимізації режимів роботи рушіїв дозволяє додатково знизити витрати палива на 3-5%.

4. Економічна доцільність застосування аzipодів підтверджується при експлуатації великотоннажних суден з тривалим життєвим циклом.

Висновки. Проведений аналіз підтверджує технічну та економічну доцільність застосування аzipодів у сучасному суднобудуванні, особливо для суден, що експлуатуються в складних умовах. Визначено оптимальні сфери застосування різних типів рушіїв, що дозволяє здійснювати їх обґрунтований вибір на етапі проектування судна. Використання сучасних систем моніторингу та оптимізації режимів роботи рушіїв є необхідною умовою досягнення максимальної енергоефективності. Подальший розвиток пропульсивних систем буде спрямований на підвищення їх екологічності та інтеграцію з інтелектуальними системами управління.

REFERENCES

1. IMO. Fourth IMO GHG Study 2020. – London: IMO Publishing, 2021. 524 p.
2. Eniram Vessel Platform 4.0: Training Manual. Dynamic Trimming Assistant, Optimum Speed Assistant, Engine Load Assistant. – Helsinki: Eniram Ltd, 2024. 42 p.
3. Carlton J.S. Marine Propellers and Propulsion. – Butterworth-Heinemann, 2019. 576 p.
4. Molland O.F. The Maritime Engineering Reference Book: A Guide to Ship Design, Construction and Operation. – Butterworth-Heinemann, 2018. 902 p.
5. ABB Marine & Ports. Azipod® Propulsion Systems: Technical Overview. – ABB Ltd, 2023. 45 p.
6. Mattsson P., Andersson J. Azipod Propulsion Systems: Energy Efficiency Analysis. – ABB Marine Technical Report, 2021. 156 p.
7. Bertram V. Practical Ship Hydrodynamics. – Butterworth-Heinemann, 2017. 390 p.
8. Nielsen U.D. Energy-Efficient Marine Propulsion Systems. – Marine Technology Society Journal, 2022. – Vol. 56(3). pp. 78-89.

Zaiets A.Yu., Oberto Santana L.E.

ENERGY EFFICIENCY OF MODERN PROPULSION SYSTEMS: COMPARATIVE ANALYSIS OF TRADITIONAL AND AZIMUTHAL THRUSTERS IN THE CONTEXT OF OCEAN SHIPBUILDING

The article presents a comprehensive analysis of modern marine vessel propulsion systems, focusing on comparing traditional propeller installations and azimuthal propulsion complexes (azipods). Based on operational data analysis, mathematical modeling results, and experience in implementing intelligent propulsion control systems, optimal application areas for each type of propulsor have been determined. Special attention is paid to the prospects of implementing azipods in the context of modern requirements for environmental friendliness and energy efficiency in maritime transport. Recommendations for selecting propulsion system types depending on the vessel's purpose and operational profile are presented.

Keywords: ship propulsors, azipods, energy efficiency, propulsion complex, shipbuilding, propeller systems.

Левченко О.В., Маранов О.В.

ІНТЕГРАЦІЯ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ СУДЕН У ПОРТОВИХ АКВАТОРІЯХ

Проведено аналіз особливостей забезпечення навігаційної безпеки під час маневрування суден у стиснених портових акваторіях з інтенсивним судноплавством. Розглянуто ключові виклики, які постають перед організацією руху суден у таких умовах, включаючи вузькі фарватери, близьке розташування причалів, портових споруд і високу щільність судноплавного трафіку. Особливу увагу приділено гідрографічним і метеорологічним факторам, таким як мілководдя, сильні течії, вітер, хвилювання і змінна глибина, які значно впливають на маневрові характеристики суден, особливо великотоннажних танкерів, контейнеровозів та балкерів. Однією з найбільших небезпек під час маневрування в обмеженій акваторії є ризик навігаційних інцидентів, таких як зіткнення суден, посадка на мілину чи пошкодження портової інфраструктури. Особливо критичним є забезпечення безпечного розходження суден на вузьких фарватерах і у зонах з інтенсивним рухом. Низькі швидкості, що використовуються для точного маневрування, можуть зменшувати керованість суден, що особливо небезпечно для великотоннажних суден із обмеженими маневровими можливостями. Людський фактор продовжує залишатися однією з головних причин навігаційних аварій. Недостатня кваліфікація екіпажів або лоцманів, недостатня координація між судноводіями та портовими диспетчерами, а також обмежений час на прийняття рішень є основними чинниками, що створюють загрозу навігаційній безпеці. У сукупності ці чинники можуть призводити до небезпечних ситуацій, що загрожують як суднам, так і інфраструктурі порту. З метою забезпечення безпеки мореплавства в умовах обмеженого простору запропоновано впровадження комбінованих систем підтримки ухвалення рішень (Combined Decision Support Systems CDSS). Ці системи забезпечують інтеграцію даних з автоматизованих ідентифікаційних систем (AIS), гідрометеорологічних датчиків, радарів і супутникових систем, що дозволяє виконувати моніторинг руху суден в реальному часі. CDSS аналізує просторове розташування суден, їхні курси, швидкість та параметри осадки, що дає змогу прогнозувати потенційні конфлікти, забезпечувати безпечне розходження суден і пропонувати оптимальні траєкторії руху. Симуляційне моделювання, засноване на нейронних мережах, відіграє важливу роль у створенні реалістичних сценаріїв для відпрацювання навігаційних ситуацій. Ці системи дозволяють аналізувати ризики, що виникають у складних умовах, таких як небезпечне зближення суден, втрати керованості через погодні умови чи недостатню глибину. Крім того, симуляції широко використовуються для тренування екіпажів і вдосконалення алгоритмів розподілу трафіку. Отримані результати показують, що застосування комбінованих CDSS та симуляційного моделювання значно покращує рівень навігаційної безпеки, мінімізує ризик зіткнень та сприяє оптимізації руху суден. Це сприяє забезпеченню безперебійної роботи портів із високою щільністю руху, підвищує ефективність управління судноплавством та створює нові стандарти безпеки мореплавства. Запропоновані рекомендації можуть бути адаптовані для інших портів із подібними умовами експлуатації, забезпечуючи стабільність та екологічну стійкість міжнародних логістичних ланцюгів.

Ключові слова: безпека судноплавства, великотоннажні судна, комбіновані системи підтримки ухвалення рішень (CDSS), запобігання зіткнення суден, координація руху суден, маневрування суден, морський транспорт, морське судно, навігаційна безпека, нейронні мережі,

оптимізація руху суден, ризик зіткнень, розходження суден, симуляційне моделювання, стиснені портові води, траєкторія руху суден.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.

Ефективне управління судноплавством у портових водах із високою інтенсивністю руху є ключовим завданням сучасної морської логістики [1, 2]. Швидке зростання обсягів міжнародної торгівлі, що супроводжується збільшенням розмірів суден та їх кількості, створює значні виклики для забезпечення безпеки судноплавства та оптимального використання портової інфраструктури [3, 4]. Проблеми, що виникають у таких умовах, включають складність координації руху суден, ризик зіткнень, затримки через неефективний розподіл черговості маневрів, а також негативний вплив на екологію через можливі аварії.

Особливо це актуально для портів із обмеженими акваторіями, таких як Альхесірас та Гібралтар, які функціонують у складних навігаційних умовах. Їх вузькі фарватери, високий рівень трафіку та динамічні гідрометеорологічні умови значно ускладнюють роботу як портових операторів, так і капітанів суден. У таких ситуаціях навіть незначна помилка у прийнятті рішень може призвести до аварій, економічних втрат або екологічних катастроф [5-8].

Для розв'язання цих проблем необхідні інноваційні підходи, зокрема впровадження комбінованих систем підтримки прийняття рішень (CDSS). Ці системи дозволяють інтегрувати великі обсяги даних з різних джерел, аналізувати їх у реальному часі, прогнозувати розвиток подій та ефективно координувати рух суден. Використання CDSS сприяє зниженню ризику зіткнень, мінімізації затримок і підвищенню ефективності управління портовими операціями [9, 10].

Таким чином, забезпечення безпеки судноплавства та оптимального функціонування портів через використання сучасних технологій, таких як CDSS, є важливим як у науковому, так і в практичному аспекті. Це сприяє стабільності глобальних логістичних ланцюгів, покращує економічну ефективність портової діяльності та підтримує екологічну стійкість транспортних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні наукові дослідження зосереджені на вирішенні проблеми забезпечення безпеки судноплавства у стиснених портових водах, особливо в умовах зростання розмірів суден та інтенсивності руху. Значна увага приділяється вивченню впливу гідрометеорологічних умов, таких як течії, хвилювання та вітрові навантаження, на маневрові характеристики великотоннажних суден [11-14]. У роботах розглядаються підходи до моделювання впливу цих факторів на траєкторію руху суден, що дозволяє оцінити ризики та вдосконалити стратегії маневрування [15, 16].

Особливий інтерес викликають дослідження з оптимізації руху суден за допомогою алгоритмів розрахунку безпечних траєкторій, що враховують динаміку суден, характеристики акваторії та зовнішні фактори, а також енергетичні показники судна [17, 18]. Розробка таких алгоритмів базується на використанні нейронних мереж та систем підтримки прийняття рішень (CDSS), які інтегрують дані з автоматичних ідентифікаційних систем (AIS) та гідрометеорологічних станцій. В наукових працях [19, 20] підкреслюється важливість застосування симуляційного моделювання для створення реалістичних сценаріїв руху суден у портових водах. Це дозволяє ефективно відтворювати складні ситуації, які виникають у вузьких акваторіях з високою щільністю трафіку, та випробовувати різні стратегії маневрування без ризику реальних зіткнень.

Незважаючи на значні досягнення в галузі, численні дослідження вказують на необхідність подальшого розвитку методів та технологій для зниження ризиків зіткнень у портових водах [21, 22]. Статистика інцидентів у портових акваторіях залишається високою, що підтверджується дослідженнями призначеними цієї проблемі [23-25]. У цих публікаціях також наголошується на

важливості інтеграції сучасних технологій у повсякденну практику портових операцій та підвищенні рівня підготовки екіпажів.

Таким чином, проведені дослідження демонструють перспективність використання комбінованих систем підтримки прийняття рішень та симуляційного моделювання для забезпечення безпеки судноплавства у складних портових умовах. Однак існує потреба у подальших дослідженнях, спрямованих на адаптацію цих технологій до специфічних умов окремих портів і удосконалення алгоритмів управління судновим рухом.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті є аналіз ефективності комбінованих систем підтримки прийняття рішень (CDSS) для підвищення безпеки та оптимізації руху суден у умовах високої щільності портового трафіку, з акцентом на забезпечення безпеки маневрування в портових водах і розробку рекомендацій щодо впровадження цих технологій у практику судноплавства.

Виклад основного матеріалу. Маневрування суден у портових акваторіях із обмеженим простором є надзвичайно складним завданням, яке потребує високої точності, узгоджених дій та професійної підготовки екіпажу. Умови обмеженого простору, зумовлені вузькими фарватерами, близьким розташуванням причалів та портової інфраструктури, а також високою інтенсивністю руху суден, значно ускладнюють процес маневрування, особливо що стосується великотоннажних суден.

Додатковими факторами, які ускладнюють маневрування, є гідрографічні умови. Мілководдя, змінна глибина, а також сильні течії впливають на здатність суден точно виконувати маневри. Крім того, погодні умови, зокрема сильний вітер, хвилювання чи густий туман, значно обмежують видимість та ускладнюють контроль над судном. У таких обставинах будь-яка помилка, навіть незначна, може мати критичні наслідки, включаючи зіткнення з іншими суднами, пошкодження портових споруд або причалів.

Найбільшу небезпеку в таких умовах становлять обмеження часу на прийняття рішення. У стиснених акваторіях із високою щільністю трафіку судна повинні діяти швидко, щоб уникнути потенційних інцидентів. Зниження швидкості, що використовується для більш точного маневрування, нерідко зменшує контроль над судном, особливо для великотоннажних суден із обмеженими маневровими можливостями.

Людський фактор залишається однією з основних причин виникнення небезпечних ситуацій під час маневрування. Брак досвіду у членів екіпажу або лоцманів, недостатня координація між судновим екіпажем і портовою адміністрацією чи помилки в ухваленні рішень можуть створювати критичні обставини. Тому особлива увага повинна приділятися підвищенню рівня підготовки персоналу та розвитку технологій, які сприяють прийняттю точних і своєчасних рішень.

Порти Альхесірас і Гібралтар є важливими вузлами міжнародної морської торгівлі, що обслуговують велику кількість суден різних типів і розмірів. Їхнє стратегічне розташування на перехресті морських шляхів обумовлює високий рівень трафіку, що створює численні виклики для забезпечення безпеки судноплавства. Порт Альхесірас є найбільшим портом Іспанії за обсягами вантажообігу, щорічно порт обслуговує приблизно 30000 суден, обробляючи понад 109 млн. тонн вантажів та 4,76 млн. TEU на рік. Порт Гібралтар відіграє стратегічну роль у міжнародній торгівлі та судноплавстві, забезпечуючи послуги з бункерування, ремонту та обслуговування суден. Крім того, він є важливим центром для круїзних лайнерів, сприяючи розвитку туризму в регіоні. На рік порт обслуговує понад 10350 суден. Зростаючий обсяг вантажообігу, збільшення розмірів суден та складні гідрометеорологічні умови потребують впровадження інноваційних підходів до управління рухом суден. Для забезпечення максимальної ефективності та безпеки судноплавства в двох портах одночасно, в сучасні час в тестовому режимі використовують комбіновану систему підтримки прийняття рішень (CDSS).

Сучасні CDSS портів Альхесірас і Гібралтар, інтегрують дані з автоматизованих ідентифікаційних систем (AIS), радарів, гідрометеорологічних станцій та портових інформаційних систем. Це дозволяє здійснювати моніторинг трафіку в реальному часі, аналізувати потенційні

ризиками та прогнозувати оптимальні сценарії руху. В умовах портів Альхесірас і Гібралтар CDSS виконує ключову функцію координації руху суден, зокрема в ситуаціях одночасного входу та виходу кількох великотоннажних суден.

Комбінована система підтримки прийняття рішень (Combined Decision Support Systems, CDSS) являє собою інтегрований програмно-апаратний комплекс, який дозволяє диспетчерам керувати рухом суден оперативно й ефективно. Вона забезпечує прийняття обґрунтованих рішень на основі аналізу зібраної, обробленої та структурованої інформації.

Функціонування цієї системи ґрунтується на ключових принципах:

1) обробка інформації в реальному часі з двох чи більше портів: CDSS синхронізує дані з обох портів, що дозволяє отримати цілісну картину руху суден та зовнішніх факторів. Наприклад, система аналізує, які судна мають перетнути спільну акваторію, і прогнозує їхнє взаємне положення;

2) моделювання сценаріїв та надавання рекомендацій для операторів портів: за допомогою математичних моделей та алгоритмів штучного інтелекту система прогнозує розвиток ситуацій. Наприклад, якщо одночасно з портів виходять кілька великотоннажних суден, CDSS може розрахувати оптимальну траєкторію для кожного, щоб уникнути конфліктів;

3) визначення пріоритету руху суден: CDSS враховує характеристики суден, такі як розміри, осадка, швидкість та маневровість. Судна з обмеженою маневровістю, наприклад, великотоннажні танкери чи контейнеровози, отримують пріоритет у русі;

4) інтеграція даних з двох чи більше портів: CDSS враховує взаємодію між рухом суден в Альхесірасі та Гібралтарі. Наприклад, якщо судно виходить з Альхесірасу й рухається до Гібралтару, система координує його маневри, враховуючи інтенсивність трафіку в акваторії другого порту;

5) виявлення потенційних конфліктів між суднами: Система аналізує можливі ризики зіткнень, посадки на мілину або затримок у русі суден, завчасно надаючи рекомендації операторам портів і екіпажам суден;

6) моніторинг трафіку в реальному часі: CDSS безперервно відстежує позиції суден в акваторії, використовуючи інтегровані дані з радарів, AIS та гідрометеорологічних датчиків. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни в навігаційних умовах і забезпечувати безпечний рух суден навіть у складних ситуаціях;

7) автоматизація рішень: CDSS не лише надає рекомендації, але й дозволяє автоматизувати деякі процеси прийняття рішень, наприклад, розподіл черговості заходу або виходу суден із порту. Це зменшує залежність від людського фактора та підвищує ефективність управління.

Одним із наглядних прикладів застосування комбінованої системи підтримки прийняття рішень (Combined Decision Support Systems, CDSS), наведена на рис. 1. В даному сценарії, з порту Альхесірас виходять балкер (довжиною 200,3 м, шириною 32,2 м) і танкер (довжиною 278,3 м, шириною 41,9 м). Одночасно з порту Гібралтар виходять крупнотоннажний контейнеровоз на 12350 TEU (довжиною 400,2 м, шириною 60,1 м) та пасажирський пором (довжиною 82,2 м, шириною 15,9 м). У цей час до портів заходять автомобільний пором (довжиною 150,1 м, шириною 25,2 м) і нафтовий танкер (довжиною 290,3 м, шириною 45,1 м) в Альхесірас, а також круїзне судно (довжиною 330,3 м, шириною 40,2 м) і невеликий контейнеровоз на 730 TEU (довжиною 169,9 м, шириною 28,0 м) у Гібралтар, як наведено в таблиці 1. Така інтенсивність трафіку створює складну навігаційну ситуацію, яка потребує високого рівня координації для уникнення зіткнень та забезпечення безпеки.

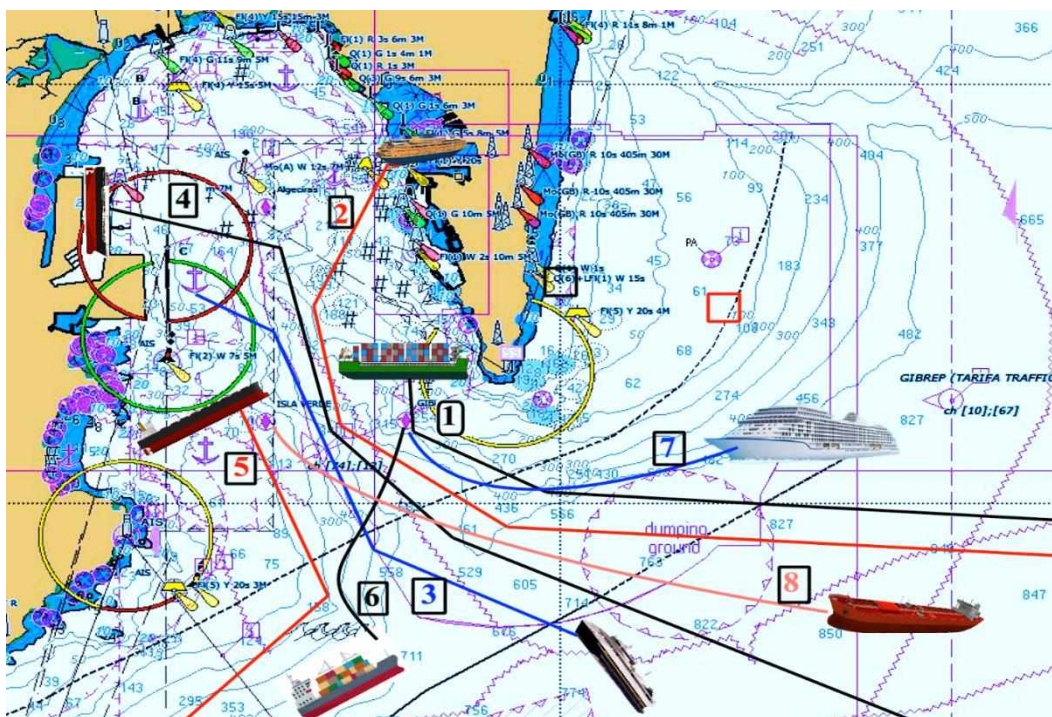


Рисунок 1 – Відображення поетапного заходу та виходу суден за допомогою використання комбінованої системи підтримки та прийняття рішень

Таблиця 1 – Початкові данні для аналізу системи підтримки прийняття рішень CDSS

ПОРТ АЛЬХЕСІРАС	ПОРТ ГІБРАЛТАР
Планові судна на вихід з порту	Планові судна на вихід з порту
1. Балкер довжиною 200,3 м і шириною 32,2 м. Виходить з північної якірної стоянки. 2. Танкер довжиною 278,3 м і шириною 41,9 м. Відшвартовується від причалу 4В.	1. Крупнотоннажний контейнеровоз на 12350 TEU довжиною 400,2 м і шириною 60,1 м. Виходить з південної якірної стоянки. 2. Пасажирський пором довжиною 82,2 м і шириною 15,9 м. Відшвартовується від причалу 23.
Планові судна на захід в порт	Планові судна на захід в порт
1. Автомобільний пором довжиною 150,1 м і шириною 25,2 м. Прямує на бункерування. 2. Нафтовий танкер довжиною 290,3 м і шириною 45,1 м. Прямує в порт до причалу 4В.	1. Круїзне судно довжиною 330,3 м і шириною 40,2 м. Прямує в порт до причалу 18. 2. Контейнеровоз довжиною 169,9 м і шириною 28,0 м. Прямує на бункерування.

За початковою інформацією щодо планового виходу груп суден з портів Альхесірасі та Гібралтарі та заходу інших суден, система CDSS.

У цьому випадку, комбінована система підтримки прийняття рішень CDSS, працює за кількома напрямками. По-перше, система визначає пріоритет руху суден, аналізуючи їхні технічні характеристики, розміри, швидкість і маневрові можливості. Наприклад, контейнеровоз із Гібралтару отримує пріоритет через більшу осадку та обмежену маневровість, тоді як пасажирський пором через свої розміри і високу маневреність може вийти пізніше. По-друге, CDSS оптимізує розклад руху, враховуючи гідрометеорологічні умови, такі як вітер, течії та видимість, а також динаміку руху інших суден. Наприклад, якщо круїзне судно затримується через несприятливі погодні умови, система автоматично коригує розклад для інших суден, щоб уникнути заторів.

Моніторинг та координація є ключовими функціями CDSS. У реальному часі система відстежує позиції всіх суден, аналізує їхній курс і швидкість, а також повідомляє екіпажі про потенційні ризики. У разі виникнення непередбачених ситуацій CDSS пропонує альтернативні траєкторії руху, забезпечуючи дотримання безпечних дистанцій між суднами. Комунікація також є важливою складовою. Система автоматично передає інформацію диспетчерам портів та суднам, надаючи рекомендації для безпечного маневрування.

Результат застосування CDSS у портах Альхесірас і Гібралтар продемонстрував значні переваги. Кілька великотоннажних суден змогли успішно виконати свої маневри без затримок і ризику зіткнень. Це стало можливим завдяки тому, що система не лише оптимізувала порядок маневрування, але й надавала диспетчерам порту чіткі рекомендації щодо дій у реальному часі.

Цей приклад підкреслює здатність CDSS ефективно працювати в умовах високої щільності портового трафіку. Система сприяє покращенню координації між суднами в обох портах, забезпечуючи вищий рівень безпеки та ефективності операцій. Такі випадки демонструють, як інноваційні технології можуть інтегруватися в щоденну практику управління портами, встановлюючи нові стандарти продуктивності й безпеки.

Крім CDSS, у портах Альхесірас і Гібралтар активно застосовується симуляційне моделювання для аналізу та прогнозування ризиків. Використання систем, побудованих на базі нейронних мереж, дозволяє створювати реалістичні сценарії руху суден в акваторії портів. Це включає врахування таких факторів, як погодні умови, технічні характеристики суден і взаємодія з течіями або іншими перешкодами. Завдяки цьому диспетчери обох портів можуть заздалегідь ідентифікувати потенційно небезпечні ситуації та впроваджувати превентивні заходи.

Інтеграція CDSS із симуляційними моделями дозволяє розробляти та тестувати оптимальні стратегії маневрування, які мінімізують ризики навіть у найскладніших умовах. Це сприяє підвищенню ефективності управління рухом суден і забезпечує безперебійну роботу портів Альхесірас і Гібралтар як ключових вузлів міжнародної торгівлі.

Висновки. Як результат виконаних досліджень зробимо наступні висновки.

1. Проведений аналіз підтверджує критичну важливість інтеграції сучасних технологій для забезпечення навігаційної безпеки у стиснених портових водах із високою інтенсивністю руху суден.

2. Комбіновані системи підтримки ухвалення рішень (CDSS) забезпечують оперативний аналіз інформації в реальному часі, дозволяючи прогнозувати ризики зіткнень, оптимізувати траєкторії руху суден та координувати їхній рух навіть у складних навігаційних умовах.

3. Використання CDSS сприяє інтеграції даних із різних джерел, таких як AIS, радари та гідрометеорологічні датчики, що підвищує точність моніторингу руху суден і мінімізує вплив людського фактора.

4. Інтеграція CDSS із симуляційними моделями, заснованими на нейронних мережах, дозволяє створювати реалістичні сценарії для аналізу ризиків, оптимізації маневрування суден і підготовки екіпажів до дій у складних умовах, що значно підвищує рівень навігаційної безпеки, мінімізує ризики зіткнень і забезпечує безперебійну роботу портової інфраструктури.

5. Запропоновані технології сприяють стабільності глобальних логістичних ланцюгів, покращують екологічну стійкість транспортних систем і підвищують економічну ефективність портових операцій, а також можуть бути адаптовані до інших портів із подібними умовами експлуатації, забезпечуючи підвищення рівня безпеки мореплавства та ефективності управління судноплавством.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
3. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – 10(9), 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
4. Войченко Т.О., Трофименко І.В., Шевченко А.П., Рященко О.І. Аналіз напрямів досліджень щодо маршрутизації транспортних засобів при експлуатації контейнерних терміналів морських портів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 82-89. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.10.
5. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
6. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
7. 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>.
8. 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>.
9. Тимошук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.
10. Богом'я В.І. Метод розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонара для забезпечення безпеки безпілотного підводного апарату // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.10.
11. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
12. 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.
13. Тимошук О.М., Мельник О.В. Аналіз можливості використання маневру розходження зміною курсу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
14. Бажак О.І., Гаценко Л.В. Сучасні методи адаптації морського транспорту до впливу природних факторів : досвід та перспективи // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 32-40. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.04.
15. 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.

16. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
17. Sagin S., Madey V., Sagin, A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.
18. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
19. Гончарук І.П., Никифоров Ю.О., Кошарська Л.В., Головань А.І. Особливості впливу відновлюваної енергетики на ефективність і екологічність морського транспорту. // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 73-80. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.08.
20. Фуклєв О.І., Євтушенко М.Ю. Моделі розходження суден у стиснених водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 159-166. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.18.
21. Сагін С.С., Сагін С.С. Використання гібридної системи координації руху морських суден під час їх маневрування в стиснених водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
22. Сагін С.С., Сагін С.С. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
23. 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.
24. Тимошук О.М., Шапран Ю.Є. Імпульсне-модуляційне управління судновими електроенергетичними системами // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 201-207. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.23.
25. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Використання інтегрованих діагностичних моделей для оцінки експлуатаційних характеристик суднового пропульсивного комплексу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 133-140. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.15.

REFERENCES

1. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // Water transport. – 2022. – № 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel DSS. // Water transport. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
3. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.
4. Voichenko T.O., Trofymenko I.V., Shevchenko A.P., Riashchenko O.I. Analysis of research directions on vehicle routing in the operation of container terminals of seaports // Water transport. – 2024. – № 3(41). – P. 82-89. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.10.

5. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol. 69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
6. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – № 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
7. 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>.
8. 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>.
9. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // *Water Transport*. – 2020. – № 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
10. Bohomia V.I. A method for recognizing underwater objects using multibeam sonar to ensure the safety of an unmanned underwater vehicle // *Water transport*. – 2023. – № 2(38). – P. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.10.
11. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pířtěk V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
12. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
13. Tymoshchuk O., Melnyk O. Analysis of the possibility of using the divergence maneuver by changing the course // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2023 – № 1(37). – P.96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
14. Bazhak O.V., Hatsenko L.V. Models methods of maritime transport adaptation to natural factors : experience and prospects // *Water transport*. – 2024. – P. 3(41). – C. 32-40. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.04.
15. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // *Water transport*. – 2023. – № 2(38). – C. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
16. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
17. Sagin S., Madey V., Sagin, A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
18. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
19. Honcharuk I.P., Nykyforov Yu.O., Kosharska L.B., Golovan A.I. Features of the influence of renewable energy on the efficiency and environmental safety of marine transport// *Water transport*. – 2023. – № 2(38). – P. 73-80. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.08.
20. Fukliev O.I., Yevtushenko M.Yu. Models of ship dispersion in compressed waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – P. 159-166. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.18.
21. Sagin S.S., Sagin S.V. Using a hybrid system for coordinating the movement of sea vessels during their maneuvering in compressed waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – P. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.

22. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // Water transport. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
23. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // Water Transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
24. Tymoshchuk O., Shapran Y. Pulse-modulation control of ship power systems // Water transport. – 2024. – № 3(41). – P. 201-207. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.23.
25. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Use of integrated diagnostic models to assess the operational characteristics of a ship's propulsion system // Water transport. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 133-140. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.15.

Levhenko O.V., Maranov O.V.

INTEGRATION OF COMBINED DECISION SUPPORT SYSTEMS TO ENSURE NAVIGATIONAL SAFETY AND OPTIMIZE VESSEL TRAFFIC IN PORT AREAS

The analysis of the features of ensuring navigational safety during vessel maneuvering in compressed port areas with intensive shipping traffic was carried out. The key challenges facing the organization of vessel traffic in such conditions were considered, including narrow fairways, close proximity of berths, port facilities and high density of shipping traffic. Particular attention was paid to hydrographic and meteorological factors, such as shallow water, strong currents, wind, waves and variable depth, which significantly affect the maneuvering characteristics of vessels, especially large-tonnage tankers, container ships and bulk carriers. One of the greatest dangers during maneuvering in a limited water area is the risk of navigational incidents, such as vessel collisions, groundings or damage to port infrastructure. Ensuring safe separation of vessels in narrow fairways and in areas with heavy traffic is particularly critical. Low speeds used for precise maneuvering can reduce vessel controllability, which is especially dangerous for large-tonnage vessels with limited maneuvering capabilities. The human factor continues to be one of the main causes of navigational accidents. Insufficient qualification of crews or pilots, insufficient coordination between shipmasters and port dispatchers, as well as limited time for decision-making are the main factors that pose a threat to navigational safety. Taken together, these factors can lead to dangerous situations that threaten both vessels and port infrastructure. In order to ensure the safety of navigation in confined spaces, the implementation of combined decision support systems (CDSS) has been proposed. These systems integrate data from automated identification systems (AIS), hydrometeorological sensors, radars and satellite systems, which allows for real-time monitoring of vessel movements. CDSS analyzes the spatial location of vessels, their courses, speeds and draft parameters, which allows predicting potential conflicts, ensuring safe separation of vessels and suggesting optimal trajectories. Simulation modeling based on neural networks plays an important role in creating realistic scenarios for practicing navigational situations. These systems allow analyzing risks arising in complex conditions, such as dangerous convergence of vessels, loss of control due to weather conditions or insufficient depth. In addition, simulations are widely used for crew training and improving traffic distribution algorithms. The results obtained show that the use of combined CDSS and simulation modeling significantly improves the level of navigational safety, minimizes the risk of collisions and contributes to the optimization of vessel movement. This contributes to the smooth operation of ports with high traffic density, increases the efficiency of shipping management and creates new standards of maritime safety. The proposed recommendations can be adapted for other ports with similar operating conditions, ensuring the stability and environmental sustainability of international logistics chains.

Keywords: shipping safety, large-tonnage vessels, combined decision support systems (CDSS), ship collision prevention, ship traffic coordination, ship maneuvering, maritime transport, seagoing vessel, navigational safety, neural networks, ship traffic optimization, collision risk, ship separation, simulation modeling, compressed port waters, ship traffic trajectory.

Калініченко Є.В.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПОВОРОТЛИВОСТІ СУДНА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ

У статті проведено теоретичне дослідження трьох динамічних моделей поворотливості судна різного ступеня складності. Виконано порівняльний аналіз математичних моделей та оцінено їх вплив на точність прогнозування траєкторії руху судна. Показано, що найбільш оптимальною для практичного застосування є модель третього порядку, яка забезпечує прийнятну точність прогнозування при помірній обчислювальній складності. Встановлено, що підвищення точності прогнозування траєкторії руху судна сприяє оптимізації маневрування та може забезпечити економію палива до 3-5% при русі в обмежених акваторіях. Результати дослідження можуть бути використані при розробці систем підтримки прийняття рішень для безпечного розходження суден та планування енергоефективних траєкторій руху.

Ключові слова: поворотливість судна, динамічна модель, прогнозування траєкторії, безпека судноводіння, енергоефективність судноплавства.

Вступ. Забезпечення безпеки судноводіння залишається одним з найважливіших завдань морської галузі. Особливої актуальності набуває проблема точного прогнозування траєкторії руху судна при маневруванні в умовах інтенсивного судноплавства та обмежених акваторіях. За даними Міжнародної морської організації (ІМО), близько 40% всіх аварійних ситуацій на морі пов'язані з помилками в оцінці маневрених характеристик суден.

Розвиток сучасних систем підтримки прийняття рішень для безпечного розходження суден вимагає використання адекватних математичних моделей, що описують динаміку руху судна при маневруванні. При цьому особливу увагу слід приділяти точності прогнозування траєкторії руху, оскільки від цього безпосередньо залежить не лише безпека судноводіння, але й енергоефективність руху судна.

Згідно з вимогами ІМО щодо зниження викидів парникових газів від морського транспорту (МЕРС.304(72)), підвищення енергоефективності суден стає одним з пріоритетних напрямків розвитку галузі. Точне прогнозування траєкторії руху судна дозволяє оптимізувати маневрування таким чином, щоб мінімізувати витрати палива за рахунок:

- зменшення кількості корегуючих маневрів;
- оптимізації кутів перекладки керма;
- більш точного виходу на заплановану траєкторію;
- зменшення часу руху на перехідних режимах.

За оцінками експертів, використання точних моделей прогнозування траєкторії руху при плануванні маневрів може забезпечити економію палива до 3-5% при маневруванні в обмежених акваторіях. Це робить задачу вдосконалення математичних моделей поворотливості судна актуальною не лише з точки зору безпеки судноводіння, але й в контексті підвищення енергоефективності морського транспорту. Особливу актуальність має проблема точного прогнозування траєкторії руху судна при маневруванні, зокрема при виконанні поворотів. Це завдання є критично важливим для попередження зіткнень суден та оптимізації маневрування у обмежених акваторіях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує значний інтерес наукової спільноти до проблеми математичного моделювання поворотливості судна. У фундаментальній роботі Fossen T.I. [3] представлено системний підхід до моделювання динаміки морських суден, включаючи різні моделі поворотливості. Zhang W. і Zou Z.J. [2] запропонували уніфіковану математичну модель, яка враховує зміну швидкості судна при маневруванні.

Важливий внесок у розвиток теорії маневрування зробили Вагущенко Л.Л. та Вагущенко А.Л. [1], які розробили модифіковані моделі для систем попередження зіткнень. Liu S. та ін. [8] представили новий підхід до моделювання динаміки судна з використанням нейронних мереж. Yasukawa H. та Yoshimura Y. [9] провели порівняльний аналіз різних методів прогнозування маневрених характеристик.

Дослідження Wang Y. і Zhang X. [4] містить всебічний огляд методів прогнозування маневреності суден. Pérez T. і Blanke M. [10] розглянули питання ідентифікації параметрів математичних моделей на основі натурних випробувань. У роботах вітчизняних вчених Чапчая Е.П. [5] та Бурмаки І.А. [6] досліджено вплив часу перекладки керма та динаміки судна на вибір маневру розходження.

Проте, незважаючи на значну кількість публікацій, недостатньо дослідженим залишається питання порівняльного аналізу різних моделей з точки зору їх практичного застосування для прогнозування траєкторії руху, особливо в контексті оптимізації обчислювальних ресурсів при збереженні необхідної точності прогнозу.

Мета дослідження. Метою даної роботи є порівняльний аналіз трьох динамічних моделей поворотливості судна та визначення найбільш оптимальної моделі для практичного застосування в задачах прогнозування траєкторії руху.

Основна частина.

Математичні моделі поворотливості судна

1. Модель першого порядку. Найпростіша модель характеризує зміну курсу судна K під дією пера руля та описується диференціальним рівнянням (1.1):

$$\frac{dK}{dt} = \mu\delta, \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт ефективності руля;

δ – кут перекладки пера руля.

Інтегруючи рівняння (1.1), отримуємо вираз для поточного курсу судна K як функцію часу:

$$K = K_0 + \mu\delta t,$$

де K_0 – початковий курс судна.

Приріст координат судна за час маневрування τ визначається виразами:

$$\begin{aligned} \Delta X &= V \int_0^{\tau} \cos(K_0 + \mu\delta t) dt \\ \Delta Y &= V \int_0^{\tau} \sin(K_0 + \mu\delta t) dt \end{aligned},$$

де V – швидкість судна.

Перевагами даної моделі є:

- Простота математичного опису
- Мінімальні вимоги до обчислювальних ресурсів
- Можливість отримання аналітичного розв'язку

Недоліки моделі:

- Не враховує інерційність судна
- Значна похибка прогнозування (150-200 м)
- Неможливість моделювання перехідних процесів

Модель першого порядку може використовуватися як початкове наближення при ітераційному розв'язанні більш складних моделей.

2. Модель другого порядку. Друга модель враховує інерційність судна та описується неоднорідним лінійним диференціальним рівнянням (1.2):

$$T \left(\frac{d^2 K}{dt^2} \right) + \frac{dK}{dt} = \mu \delta, \quad (2)$$

де T – постійна часу, що характеризує інерційні властивості судна.

Розв'язок диференціального рівняння (1.2) для курсу судна має вигляд:

$$K = K_0 + \omega_0 T \left(1 - e^{(-t/T)} \right) + \omega_1 t,$$

де ω_0 та ω_1 – відповідно початкове та усталене значення кутової швидкості судна.

Поворот судна складається з двох фаз:

1. Перша фаза ($0 \leq t \leq \tau_1$):

- Початкова кутова швидкість $\omega_0 = 0$;
- Усталена кутова швидкість $\omega_1 = \mu \delta$;
- Вираз для курсу: $K = K_0 + \mu \delta T \left(1 - e^{(-t/T)} \right) + \mu \delta t$.

2. Друга фаза ($\tau_1 \leq t \leq \tau_1 + \Delta t$):

- Початкова кутова швидкість $\omega_0 = \mu \delta \left(1 - e^{(-\tau_1/T)} \right)$;
- Усталена кутова швидкість $\omega_1 = -\mu \delta$;
- Вираз для курсу: $K = K(\tau_1) + \omega_0 T \left(1 - e^{(-(t-\tau_1)/T)} \right) - \mu \delta (t - \tau_1)$.

Для визначення інтервалів часу τ_1 і Δt використовується система рівнянь:

$$K(\tau_1 + \Delta t) - K_0 = \Delta K \frac{dK}{dt} \Big|_{t=\tau_1 + \Delta t} = 0$$

Переваги моделі другого порядку:

- Враховує основні інерційні властивості судна
- Помірна обчислювальна складність
- Прийнятна точність для більшості практичних задач (похибка 35-40 м)

Недоліки:

- Не враховує додаткові динамічні характеристики судна
- Потребує ітераційних методів розв'язання
- Обмежена точність при великих кутах повороту

3. Модель третього порядку. Найбільш складна модель описується диференціальним рівнянням третього порядку (1.3) [11]:

$$T_1 T_2 \left(\frac{d^3 K}{dt^3} \right) + (T_1 + T_2) \left(\frac{d^2 K}{dt^2} \right) + \frac{dK}{dt} = \mu \delta, \quad (3)$$

де T_1 , T_2 – постійні часу, що характеризують інерційні властивості судна.

Розв'язок диференціального рівняння (1.3) має вигляд:

$$K = K_0 + \omega_0 \left[\frac{T_1 T_2}{(T_1 - T_2)} \right] \left(e^{(-t/T_1)} - e^{(-t/T_2)} \right) + \omega_1 t,$$

де ω_0 та ω_1 – відповідно початкове та усталене значення кутової швидкості.

На першій фазі повороту ($0 \leq t \leq \tau_1$):

$$\omega_0 = 0;$$

$$\omega_1 = \mu\delta;$$

$$K = K_0 + \mu\delta \left[\frac{T_1 T_2}{(T_1 - T_2)} \right] \left(e^{(-t/T_1)} - e^{(-t/T_2)} \right) + \mu\delta t.$$

На другій фазі ($\tau_1 \leq t \leq \tau_1 + \Delta t$):

$$\omega_0 = \mu\delta \left[1 - \frac{T_1}{(T_1 - T_2)} e^{(-\tau_1/T_1)} + \frac{T_2}{(T_1 - T_2)} e^{(-\tau_1/T_2)} \right];$$

$$\omega_1 = \mu\delta;$$

$$K = K(\tau_1) + \omega_0 \left[\frac{T_1 T_2}{(T_1 - T_2)} \right] \left(e^{(-(t-\tau_1)/T_1)} - e^{(-(t-\tau_1)/T_2)} \right) - \mu\delta(t - \tau_1).$$

Для визначення параметрів τ_1 і Δt використовується система рівнянь:

$$K(\tau_1 + \Delta t) - K_0 = \Delta K \frac{dK}{dt} \Big|_{t=\tau_1 + \Delta t} = 0;$$

$$\frac{d^2 K}{dt^2} \Big|_{t=\tau_1 + \Delta t} = 0.$$

Приріст координат судна визначається інтегруванням:

$$\Delta X = V \int_0^{\tau} \cos(K(t)) dt,$$

$$\Delta Y = V \int_0^{\tau} \sin(K(t)) dt,$$

де $\tau = \tau_1 + \Delta t$ – загальний час маневру.

Переваги моделі третього порядку:

- Висока точність прогнозування (похибка 25-30 м);
- Враховує додаткові динамічні характеристики судна;
- Можливість моделювання складних маневрів;
- Адекватне відображення перехідних процесів.

Недоліки:

- Висока обчислювальна складність;
- Необхідність визначення додаткових параметрів;
- Складність програмної реалізації;
- Чутливість до точності вхідних даних.

Особливості практичного застосування:

1. Необхідність використання чисельних методів інтегрування;
2. Важливість правильного визначення постійних часу T_1 і T_2 ;
3. Доцільність застосування адаптивних методів розрахунку;
4. Можливість урахування зовнішніх збурень.

Порівняльний аналіз моделей

Методологія порівняльного аналізу. При проведенні порівняльного аналізу моделей використовувався комплексний підхід, що враховує як теоретичні аспекти, так і практичні вимоги до систем управління рухом суден. Основними критеріями оцінки були:

1. Точність прогнозування траєкторії:
 - відхилення прогнозованої траєкторії від реальної;
 - точність визначення моменту виходу на заданий курс;
 - похибка в оцінці пройденої відстані.
2. Обчислювальна складність:
 - кількість операцій, необхідних для розрахунку;
 - вимоги до обчислювальних ресурсів;
 - час розрахунку прогнозованої траєкторії.
3. Практична реалізація:
 - складність програмної реалізації;
 - можливість роботи в реальному часі;
 - стійкість до помилок вхідних даних.
4. Можливість врахування додаткових факторів:
 - вплив зовнішніх збурень;
 - взаємодія з мілководдям;
 - вплив швидкості судна.

Результати порівняльного аналізу. За результатами теоретичного аналізу встановлено:

1. Модель першого порядку забезпечує грубу оцінку траєкторії з похибкою до 150-200 м, але має найменшу обчислювальну складність.
2. Модель другого порядку дає середню точність з похибкою 35-40 м та помірну обчислювальну складність.
3. Модель третього порядку забезпечує найвищу точність з похибкою 25-30 м, але потребує більших обчислювальних ресурсів.

Практичні рекомендації. На основі проведеного аналізу можна рекомендувати:

1. Для систем попередження зіткнень суден оптимальним є використання моделі третього порядку, оскільки вона забезпечує необхідну точність прогнозування.
2. Для навігаційних тренажерів та систем моделювання руху може бути достатньо моделі другого порядку.
3. Модель першого порядку може застосовуватися лише для грубої оцінки параметрів маневру на початковому етапі планування.

Висновки. Проведено порівняльний аналіз трьох динамічних моделей поворотливості судна.

1. Встановлено, що модель третього порядку забезпечує найвищу точність прогнозування траєкторії руху з похибкою 25-30 м.
2. Розроблено практичні рекомендації щодо вибору моделі в залежності від вимог до точності прогнозування та доступних обчислювальних ресурсів.

REFERENCES

1. Vagushchenko, L., & Vagushchenko, A. (2023). Mathematical Models of Ship Turning Maneuvers for Collision Avoidance Systems. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 17(1).

2. Zhang, W., & Zou, Z. J. (2022). Analysis of ship maneuvering with varying forward speed using a unified mathematical model. *Ocean Engineering*, 244, 110378.
3. Fossen T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2021. 736 p.
4. Wang, Y., & Zhang, X. (2022). A comprehensive review of ship maneuverability prediction methods. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2). 281 p.
5. Чапчай Е.П. Учет времени перекладки пера руля при повороте судна. *Судовождение*. 2005. № 9. С. 110-113.
6. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения. *Судовождение*. 2002. №4. С. 32-36.
7. Вагущенко Л.Л. Судно как объект автоматического управления. Одесса: ОГМА, 2000. 140 с.
8. Liu, S., Negenborn, R. R., & Chu, X. (2021). Predictive ship motion model using recurrent neural networks. *Ocean Engineering*, 227, 108874.
9. Yasukawa, H., & Yoshimura, Y. (2022). Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science and Technology*, 20, 37-52.
10. Pérez, T., & Blanke, M. (2021). Ship roll motion control. *Annual Reviews in Control*, 32(2), P. 162-174.
11. Kalinichenko Y., Burmaka I. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, no. 9 (84). P. 20-31. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85839>.

Kalinichenko Ye.V.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DYNAMIC MODELS OF SHIP MANEUVERABILITY FOR TRAJECTORY PREDICTION

The article presents a theoretical study of three dynamic models of ship maneuverability with varying degrees of complexity. A comparative analysis of the mathematical models was conducted, and their impact on the accuracy of ship trajectory prediction was evaluated. It is shown that the third-order model is the most optimal for practical applications, providing acceptable prediction accuracy with moderate computational complexity. It was established that improving the accuracy of ship trajectory prediction contributes to maneuver optimization and can achieve fuel savings of 3–5% when navigating in confined waters. The research results can be used in the development of decision support systems for safe ship collision avoidance and planning energy-efficient trajectories.

Keywords: ship maneuverability, dynamic model, trajectory prediction, navigation safety, energy efficiency in shipping.

Кучеренко Н.В., Томчаковський Г. Г., Капочкіна М.Б., Калініченко Є.В.

УМОВИ ФОРМУВАННЯ МУСОННОГО ВІТРУ НАД ІНДООКЕАНСЬКОЮ АНОМАЛІЄЮ СИЛИ ТЯЖІННЯ

Тропічна зона Світового океану характеризується практичною відсутністю просторово часових змін інсоляції, відсутністю баричних градієнтів і, як результат, наявністю лише “пасатів” (зсув шару атмосферного повітря зі сходу на захід зі швидкістю 6 м/с). Така ситуація сприяє безпечному судноплавству. Виключенням є акваторія північної частини Індійського океану, де з червня по серпень генеруються потужні вітри південно-західного напрямку, які формують вітрові хвилі висотою до 7 м. Для забезпечення безпеки мореплавства потрібні методики прогнозування початку та закінчення “сезону” несприятливих погодних умов у зазначеному регіоні. Це потребує створення теорії мусонних вітрів та чисельних розрахунків просторово-часової мінливості літнього мусону. У роботі проаналізовано існуючі гіпотези причин порушення пасатної циркуляції у Індоокеанському регіоні, отримані чисельні оцінки впливу на рухомі оболонки Землі, на прикладі рідкої оболонки, просторово-часових змін прискорення вільного падіння (Δg).

Ключові слова: безпека судноплавства, мусонний вітер, супутникова альтиметрія, супутникова гравіметрія, фізико-статистичне моделювання, навігаційна гідрометеорологія.

Вступ. Тропічна зона океану характеризується практичною відсутністю просторово- часових змін інсоляції, відсутністю баричних градієнтів і, як результат, наявністю “пасатів” (зсуву шару атмосферного повітря зі сходу на захід зі швидкістю до 6 м/с). Така ситуація сприяє безпечному судноплавству, але у серпні – жовтні (північна півкуля) виникає ризик опинитись у зоні дії тропічного циклону. Виключенням є акваторія північної частини Індійського океану, де з червня по серпень генеруються вітри південно-західного напрямку зі швидкістю 12-14 м/с, які формують вітрові хвилі висотою до 7 м. З одного боку - це небезпечно для судноплавства, але з іншого боку, у цей період немає ризиків від тропічних циклонів.

Для забезпечення безпеки мореплавства потрібні методики прогнозування, на першому етапі, початку та закінчення “сезону” несприятливих погодних умов. Це потребує створення теорії мусонних вітрів та чисельних розрахунків просторово-часової мінливості літнього мусону. У роботі проаналізовано існуючі гіпотези причин порушення пасатної циркуляції у Індоокеанському регіоні. Отримані чисельні оцінки впливу на рухомі оболонки Землі, на прикладі рідкої оболонки, часових змін прискорення вільного падіння (Δg).

Вже досить давно (декілька сторіч) причиною мусонів вважають нерівномірне протягом року нагрівання суші та океану. Декларуються й інші гіпотези формування мусонної циркуляції. Проте жодна з них, як і перша, не пояснює причин щорічного повторення та сталого характеру мусонних вітрів.

Важливо також констатувати, що у Індійському океані зимовий північно-східний мусон в Аравійському морі співпадає з пасатами і повинен посилювати їх, а літній південно-західний мусон - протидіє пасатам і повинен мати меншу потужність у порівнянні з зимовим. Фактично ж, все навпаки.

В Аравійському морі в період літнього мусону біля берегів Сомалі формуються згонні течії, коли температура поверхні океану може знижуватися на 10°C. Внаслідок градієнтів температури, які формуються над морською поверхнею, формуються пд.-зх. вітри, що додатково підсилює літній мусон. Незважаючи на те, що цей процес відноситься до процесів з позитивним зворотним зв'язком, літній мусон раптово переривається наприкінці серпня – вересні.

Вважається, що особливо потужна і стійка мусонна циркуляція виникає там, де проявлені горизонтальні градієнти атмосферного тиску. Фактично ж у тропічній зоні північного сектору

Індійського океану, де мусонний вітер найпотужніший, баричні градієнти не проявлені а ті, що фіксуються, не спроможні генерувати стійкий у часі вітер зі швидкістю до 14 м/с та хвилі висотою до 7 метрів.

Слід також констатувати, що у тропічній зоні умови геострофічності не повинні виконуватися, але стійкий у часі мусонний вітер дме вздовж ізобар, незважаючи на те, що у тропіках дивергентна та конвергентна складові на порядок більші, ніж в помірних широтах.

Стан вивченості проблеми формування мусонних вітрів. Донедавна вважалося загальноновизнаним, що термічні умови є основною причиною утворення мусонів і найважливішою характеристикою, що визначає фазу мусону (зимовий або літній) є інсоляція. В роботі [1] наведено огляд інформації про причини виникнення мусонної циркуляції. Проведено критичний аналіз цього огляду. Першу спробу пояснити природу мусонів було зроблено Галлеєм в 1686 р. Його міркування стали основою, так званої, термічної гіпотези розвитку мусонної циркуляції. Подальший розвиток цієї гіпотези отримано в роботі [2], а також в роботах [3,4]. Перелічені автори розглядають мусонну циркуляцію у синоптико-кліматичному аспекті проблеми.

Інша гіпотеза природи мусонної циркуляції – динамічна. Піонерські роботи Шулейкіна В.В. а також його школи [5], розглядали мусони як теплову машину, що працює між нагрівачем і холодильником, які сезонно змінюються місцями залежно від термічних властивостей поверхонь, що підстилають (суша і океан). Розвинута динамічна гіпотеза в роботах таких авторів, як Лінейкін П.С., Гандіна Л.С., Хромова С.П., Дмитрієва А.А. Важливо зауважити, що ні термічна, ні динамічна гіпотези самостійно неспроможні вичерпно пояснити природу мусонної циркуляції.

Більш пізні уявлення про мусонну циркуляцію та її характерні особливості представлені в роботах [6-8]. В роботі [6] особлива увага приділялася ролі орографічних та трансекваторіальних ефектів у формуванні літнього мусону.

В монографії [8] узагальнено сучасні уявлення про тропічний мусон Індійського регіону. Розвинуто це направлення в роботі [1], де звертається увага на те, що тепловий баланс системи атмосфера – підстилаюча поверхня в акваторії Аравійського моря, різко змінює знак з позитивного на негативний перед настанням літньої фази мусонної циркуляції, а міжрічна мінливість теплового балансу багато в чому впливає на інтенсивність літнього мусону. Автором публікації також відзначено різке збільшення вмісту вологи атмосфери над Аравійським морем перед настанням літнього мусону.

Окремо розвивається нова гіпотеза формування мусонів. В основі цієї гіпотези - вплив просторово-часової мінливості гравітаційного поля Землі на динаміку атмосфери. Розвиток цього наукового спрямування до 1990-х років гальмувало обмеження доступу до даних вимірювань гравітаційного поля Землі у зв'язку з розгортанням міжконтинентальних ракетних програм.

Стартовим науковим дослідженням у цьому напрямі слід вважати публікацію [9], в якій вперше теоретично обґрунтовано можливість формування вертикальних рухів повітря в атмосфері під впливом зміни Δg . Назва публікації “О реакции атмосферы на локальные изменения плотности мантии Земли” повною мірою збігається із темою нашого дослідження. Цитована публікація [9] підвела необхідний науковий фундамент під відкриття раніше невідомого природного явища (Відкриття у СРСР диплом № 273), одним із авторів якого було визнано Бороздича Є.В., який опублікував роботу під назвою “Воздействие короткоживущих подкорковых локальных возмущений на лито-, гидро-и атмосферу” [10]. Як розвиток цього наукового напрямку нами було написано монографію [11] (ухвалена Бороздичем Є. В., особисто). Далі були опубліковані результати наукових досліджень про вплив варіацій гравітаційного поля Землі на атмосферні процеси [12-19]. У цьому науковому напрямі було розроблено та запатентовано технічні рішення, одне з яких [20]. В роботі [21] досліджено глобальну мусонну циркуляцію і заявлено, що мусонні процеси формуються загальнопланетарними процесами:

- зміна тенденції мусонних процесів відбувається синхронно в Американському, Африканському та Азіатському регіонах. В кінці січня, першій половині лютого максимальний розвиток мусонних процесів в південній півкулі і початок їх ослаблення; остання декада липня,

початок серпня – максимальний розвиток мусонних процесів в північній півкулі і початок їх ослаблення;

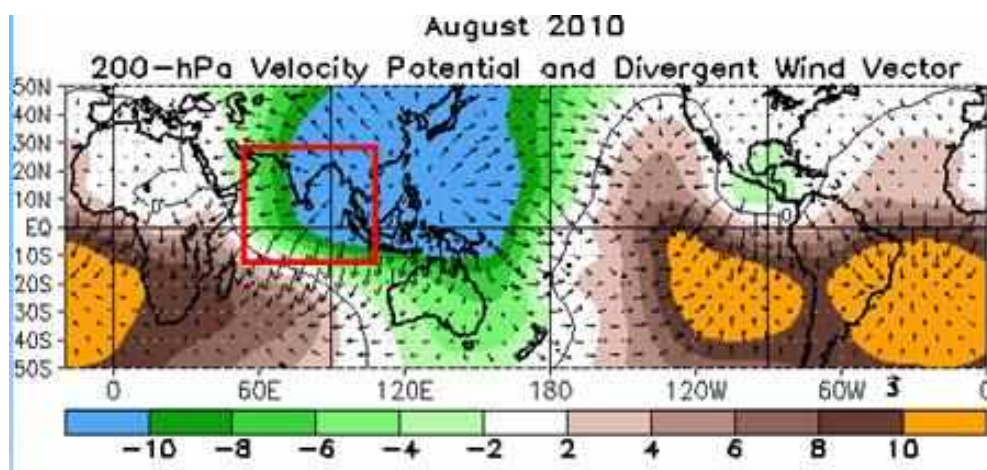
- зміни в тенденції мусонних процесів не співпадають з річним притоком сонячної енергії та його розподілом на Земні кулі.

Доведено, що Північна півкуля в лютому витримує стискання, а Південна півкуля – розтягується [22]. В серпні Північна півкуля витримує розтягування, а Південна півкуля - стискання. Річна мода деформацій в лютому-березні формує ефект опускання поверхні геоїда на 3 мм в районі Північного полюсу, а екваторіальне зміщення на північ вимірюється 1,5 мм, що відповідає обміну мас між півкулями $1 \pm 0,2 \cdot 10^{16}$ кг та спричиняє додаткову деформацію Землі. Зміна розподілу мас між півкулями спричиняє зміну гравітаційного потенціалу між ними, а це в свою чергу має призводити до зміни розподілу рухомих оболонок Землі.

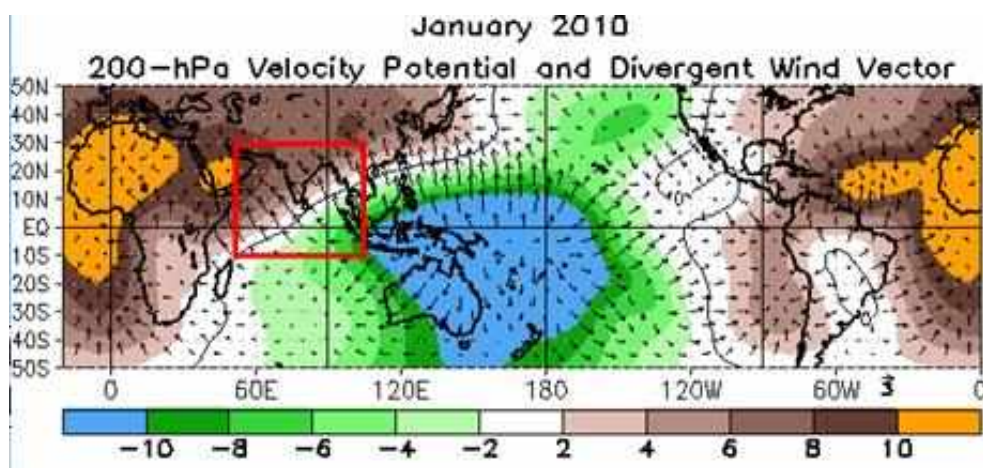
На нашу думку, виявлена у 2001 році “Нова глобальна річна мода геодеформацій” може бути віднесена до класу, так званих, “поплавкових” рухів нашої планети відносно площини екліптики. Важливо пам’ятати про піврічну циклічність кутової швидкості обертання Землі, яка впливає на Δg , з позитивними екстремумами під час літнього (червень-вересень) і зимового (січень-березень) мусону.

Безпосередньо впливу гравітаційного чинника формування мусонних вітрів присвячені публікації [23-25]. В публікації [25] нами вперше розглянуто екстремальну негативну аномалію форми геоїду Індійського океану, як одну з причин формування мусонного типу атмосферної циркуляції у Індоокеанському регіоні. В роботах [11,24,25] виконано узагальнення результатів досліджень багатьох авторів про вплив змін гравітаційного поля у просторі та часі на атмосферну циркуляцію.

В Індійському океані екстремуми Δg спостерігаються навесні та восени. За максимуму Δg вага маси повітря найбільша, а за умов зменшення Δg - вага маси повітря та приземний атмосферний тиск починають зменшуватися. В результаті змін, що відбуваються в полі атмосферного тиску, починається його вирівнювання шляхом “розповзання” максимуму атмосферного тиску. Слід зазначити, що на відміну від звичайного вітру, причиною якого є баричний градієнт, у цій ситуації баричний градієнт може не формуватися. Якоюсь мірою натяк на це природне явище описаний у нашій публікації “Фізичні механізми вирівнювання баричних градієнтів в атмосфері” [26]. Як аргумент, що побічно підтверджує дану тезу, є карти конвергенції та дивергенції повітряних потоків у верхніх шарах атмосфери на рівні 200 гПа. В серпні над Індією зазвичай фіксується дивергенція, а в січні-конвергенція (рис. 1).



а.



б.

Рисунок 1 – Дивергенція та конвергенція над Індією на рівні 200 гПа: а) у серпні, б) у січні [27].

Таким чином, мусонні вітри в Індійському океані виникають тільки тоді, коли маса повітря перестає бути скомпенсованою аномалією Δg , тобто, коли зі зміною Δg змінюється вага повітря. Наприклад, мусонна циркуляція в атмосфері Аравійського моря активізується в процесі змін Δg , а за умов екстремума Δg рухи повітряних мас не генеруються [25].

Невирішені проблеми. У перелічених дослідженнях декларовано, що мусонний клімат Аравійського моря та західної частини півострова Індостан формується змінами ваги маси атмосферного повітря між морем та суходолом за рахунок змін Δg в межах регіону, що характеризується стабільним у просторі від'ємним екстремумом Δg (рис. 2).

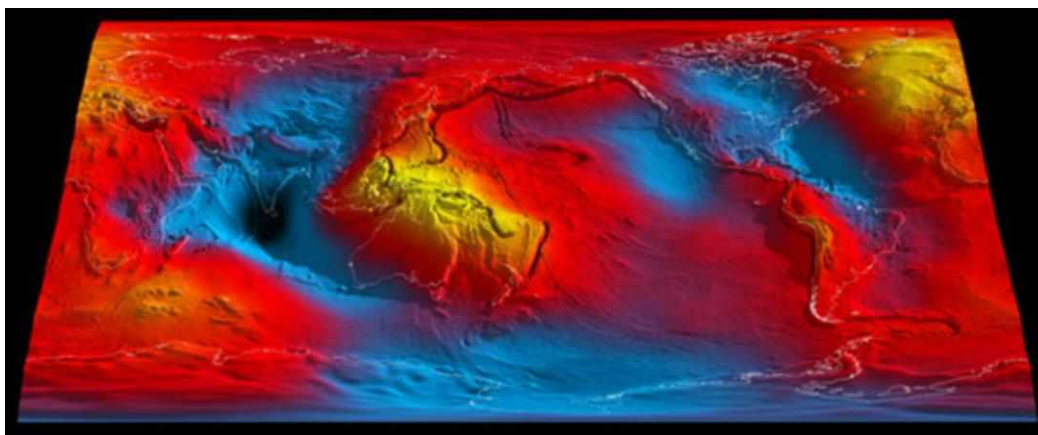


Рисунок 2 - Карта-схема гравітаційного поля Землі [28].

У монографіях [29-30] наведено епізод всебічного стискання Африканської тектонічної плити та генерації аномальних погодних умов в межах Африканського континенту у листопаді 2001 – лютому 2002 року. Було доведено, що протягом двох місяців, щоденно, над Сахарою та над Аравійським півостровом відбувалося незвичайне погодне явище - конденсація водяної пари у приземному повітрі у холодний термін часу доби (рис. 3).

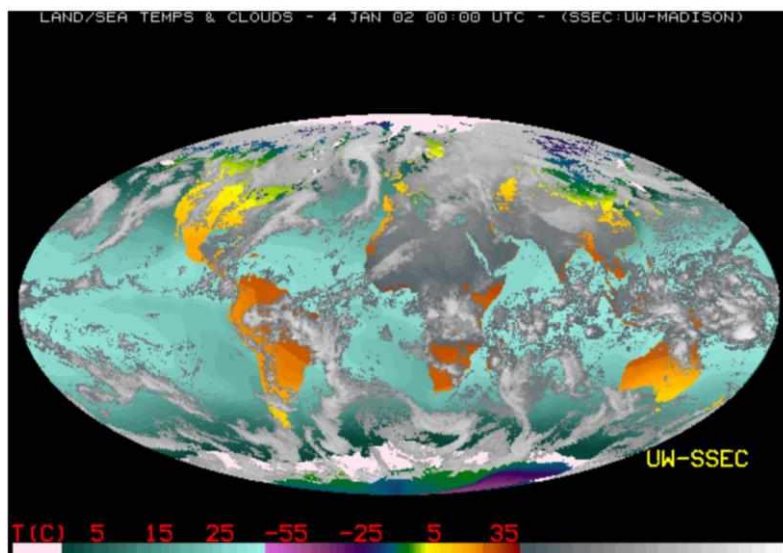


Рисунок 3 - Відображення процесу стиснення Африканської плити під час екстремальних геодформацій 13.11.2001-18.01.2002 р. [29].

В результаті аналізу сейсмічності у зонах спредингу навкруги Африканської тектонічної плити у листопаді 2001 – лютому 2002 року, було встановлено, що спочатку відбувалося рівномірне (з усіх сторін) стискання тектонічної плити, а у січні 2002 року активувався спрединг з північно-західної та південно-східної сторін континенту, що призвело до припинення тиску, шляхом активізації Східно-Африканського рифту. Це проявилось 19 січня 2002 р. виверженням вулканів зазначеного рифту. Одночасно (раптово) припинилися і погодні аномалії. У наших наукових працях [31,32] це природне явище пояснюється з позицій гідрогеології, що стосується аномалій гідрогеодеформаційного поля Землі в умовах потужних геодформацій. Це підтверджується результатами наукових досліджень, що були нещодавно отримані і наведені у роботі [33]. Нами було проведено додаткове дослідження зазначеної аномалії і встановлено, що аномальне погодне явище конденсації водяної пари у приземному повітрі у холодний термін часу доби охоплювало і півострів Індостан. Цей факт опосередковано підтверджує, що геодинамічні процеси, пов'язані з Африканською тектонічною плитою є впливовими на геодинамічні процеси у Індоокеанському регіоні. Нами констатовано, що процеси стискання Африканської плити у листопаді 2001- січні 2002 р. передували, тобто могли бути причиною, найпотужнішої за 35 років посухи в Індії у 2002 році (рис. 4).

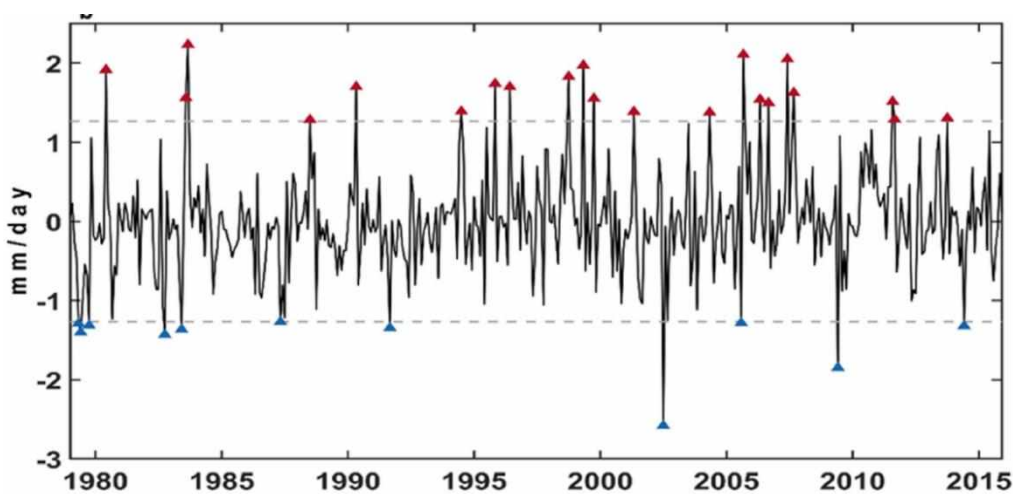


Рисунок 4 - Атмосферні опади в Індії (осереднені за місяць добові показники опадів (пунктирні лінії позначають 2 СКВ) у зоні прямокутника 10°N–30°N та 60°E–95°E [33].

На рис. 4 показано що у 2002 році посуха під час зимового мусону опустилася нижче статистичного показника - практично до 3-х середньоквадратичних відхилень (СКВ).

Слід зазначити, що у монографії [11] кліматична аномалія у Південній Атлантиці, що проявлена відсутністю тропічного циклогенезу, також пояснюється аномальними геодинамічними процесами, що відбуваються під Південно-Американською плитою, і через просторово-часові зміни гравітаційного поля впливають на поле атмосферного тиску та формують відповідні особливості тропічного циклогенезу в регіоні. За умов аномального за швидкістю руху тектонічної плити Наска під Південно-Американську плиту, остання на східному фланзі занурюється, що на регіональному рівні зменшує Δg . Зазначені процеси руйнують типові для тропічної зони умови високого атмосферного тиску, що блокує процес перетворення конвективних комірок у тропічні циклони [34].

Враховуючи те, що просторові варіації гравітаційного поля Землі формуються процесами, що відбуваються у надрах Землі, були проаналізовані загальні характеристики плитової тектоніки Землі (рис. 5).

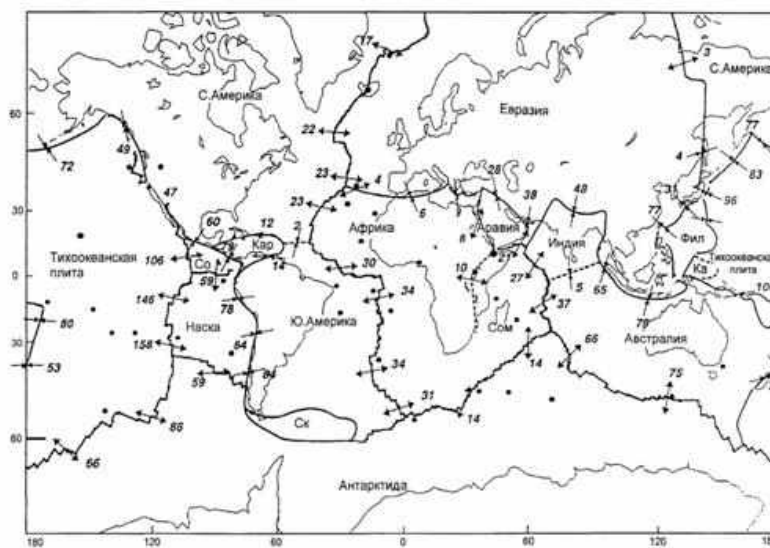


Рисунок 5 – Карта плитової тектоніки Землі [35].

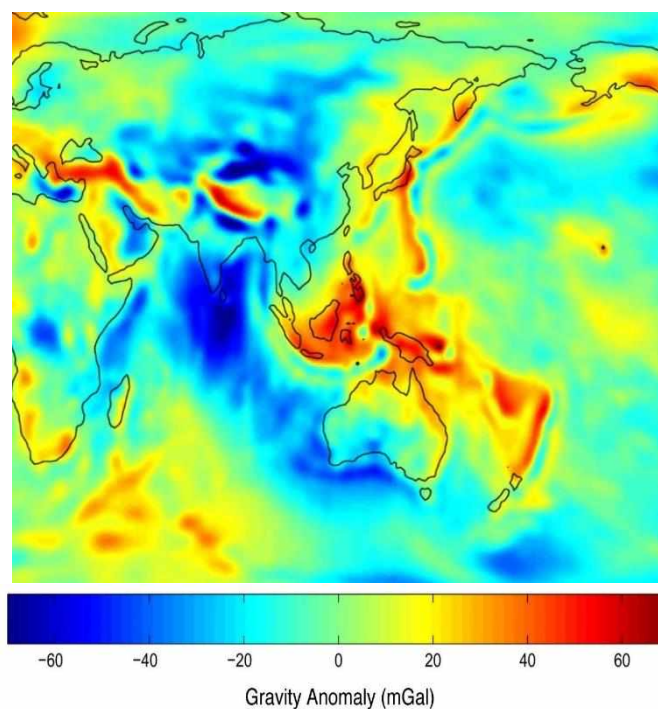
На рисунку 5 можна побачити, що Африканська тектонічна плита, на відміну від інших тектонічних плит, не має зони субдукції, тобто, у жодному місці Африканська плита не підсувається під сусідню тектонічну плиту. Це порушує принцип ізоастазії. За умов стиснення Африканської плити, вона вимушена підійматися [30].

Лише декілька років тому у роботі [36] було встановлено, що від'ємна аномалія Δg у Індійському океані пов'язана з процесами під Африканською тектонічною плитою. Аномалія низької щільності мантії, яка простягається з глибини 300 км аж до ~900 км у північній частині Індійського океану походить від гарячого матеріалу, який піднімається з глибокої мантії під Африкою та рухається на північний схід. Тобто результати досліджень, що опубліковані у роботі [36] опосередковано підтверджують те, що аномальний зимовий мусон 2002 року і пов'язана з ним екстремальна посуха може бути викликана аномальними геодинамічними процесами, які проявилися у незвичайних погодних умовах, що показані на рисунках 3,4.

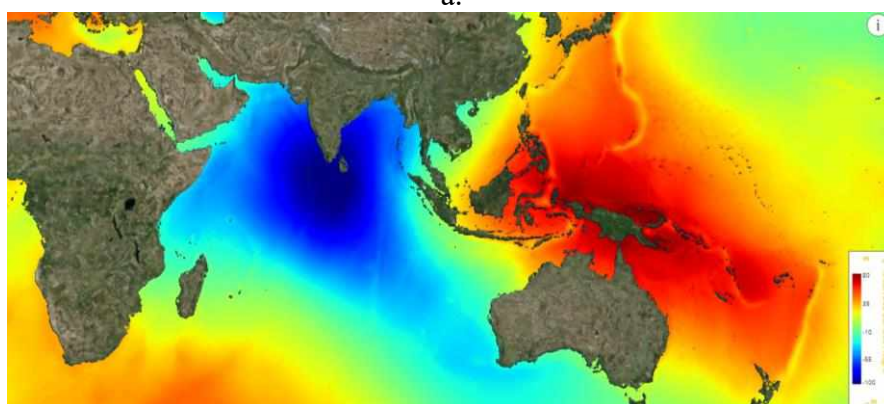
Методи досліджень. Метою нашого дослідження є підтвердження методами фізико-статистичного моделювання тези, опублікованої у роботах [24,25], стосовно того, що часові зміни форми геоїду в Аравійському морі (як одна з причин виникнення сезонних вітрів) відбуваються під впливом змін гравітаційного поля Землі. Підставою для цього є те, що під час зимового мусону, коли біля західного берега півострова Індостан під впливом згінного вітру повинна формуватися від'ємна аномалія рівня моря, формується позитивна аномалія форми геоїду, а під час літнього

мусону, за умов нагінного вітру повинна формуватися позитивна аномалія рівня моря, а формується від'ємна аномалія форми геоїду [25].

На рисунку 7 наведено карти аномалій гравітаційного поля Землі (мГал) [37] та аномалій форми геоїду (м) [38] у Індійському океані. Таким чином, аномалія Δg обумовлює аномалію середнього рівня океану.



а.



б

Рисунок 6 – Карти: а) аномалії гравітаційного поля Землі (мГал) [37],
б) аномалії форми геоїду, тобто, середній рівень моря (м) [38].

В роботі [24] показано, що найбільш виражена мусонна циркуляція (в Індійському океані в районі Аравійського моря) просторово узгоджується з найбільш масштабною аномалією гравітаційного поля, що досягає 66 mGal. [39], що відповідає $\Delta g = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$.

Для отримання оцінки сезонної мінливості рівня моря та сезонної мінливості Δg біля західного берега півострова Індостан, були використані дані супутникової альтиметрії [38] та супутникової гравіметрії [40]. Слід зазначити, що фізичний принцип супутникової альтиметрії принципово відрізняється від фізичного принципу супутникової гравіметрії.

Для перевірки твердження стосовно впливу просторово-часових змін гравітації на динаміку рухомих оболонок Землі (на просторово-часові зміни рівня моря) в кліматичній зоні мусонів Індійського океану були використані дані географічних інформаційних систем. Це AVISO+, що використовує дані вимірювань рівня моря супутниковими альтиметрами та дані, отримані в

результаті виконання супутникової програми GRACE (вимірювання Δg), отримані супутниками, що мають інші орбіти та інші фізичні принципи вимірювань. Тобто, методи та засоби вимірювань відрізняються [41,42].

За результатами осереднених за місяць вимірювань рівня моря та Δg біля узбережжя Індійської провінції Гоа отримано відповідні часові ряди (рис. 7) довжиною 15 років (2002-2017 рр.).

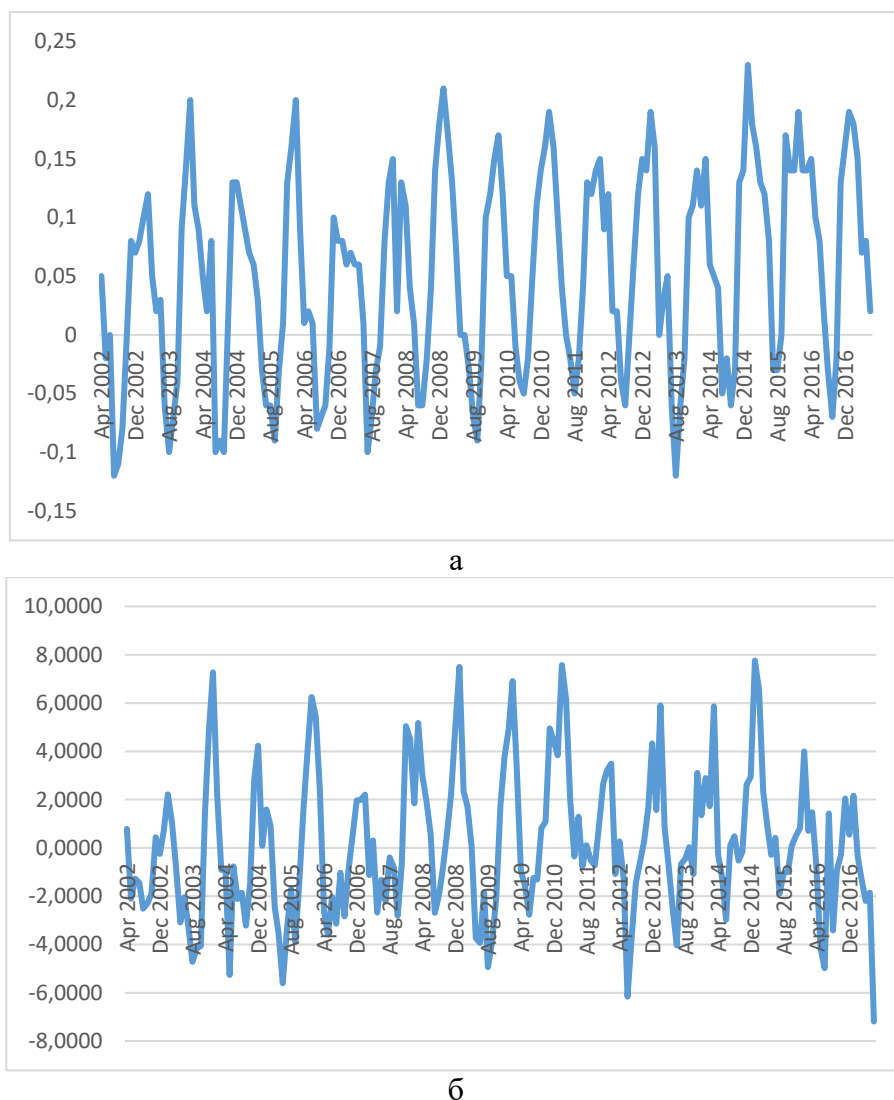


Рисунок 7 – Графіки змін у часі: а) форми геоїду та б) гравітації (район західного узбережжя півострова Індостан (провінція Гоа, Індія)).

Дані вимірювань рівня моря біля провінції Гоа підтвердили твердження [25], що всупереч дії вітру щорічно взимку рівень моря вищий, а влітку - нижчий.

Критерієм порівняння даних супутникової альтиметрії та гравіметрії обрано порівняння відповідних амплітудних спектрів альтиметрії та гравіметрії, та взаємного амплітудного, фазового спектрів та спектру когерентності.

Отримані результати. За результатами наших попередніх досліджень в [25] обговорювалось питання наявності залежності між регіональними змінами Δg і рівнем моря, як характеристики форми геоїда. Зазначена теза досі не була підтверджена на кількісному рівні. На нашу думку, за наявності кількісних доказів впливу змін гравітаційного поля на гідросферу (на рівень моря) в районі потужної гравітаційної аномалії в Індійському океані, виникнуть підстави вважати, що зміни Δg впливають і на атмосферні процеси. Завдяки тому, що зміни Δg відбуваються з річним циклом,

як і мусонні вітри, виникають підстави для більш детального аналізу впливу змін Δg на баричне поле, поле вітру та поле вітрових хвиль. Нами було використано результати супутникового експерименту з вимірювань змін топографії поверхні океану (AVISO+) та вимірювань регіональних змін гравітаційного поля Землі (GRACE). Оцінка змін гравітаційного поля та висоти геоїду отримувалася щомісячно. У якості району досліджень нами обрано район західного узбережжя півострову Індостан (провінція Гоа, Індія), де сезонна мінливість мусонного клімату (вітер та хвилі) додатково підтверджується мінливістю кількості атмосферних опадів.

Були обчислені часові ряди змін рівня Аравійського моря та змін Δg у Аравійському морі. Оцінка коефіцієнту кореляції між двома часовими рядами складає $R=0,73$. Аналіз даних, наведених на рисунку 7, свідчить про наявність періодичної складової у мінливості форми геоїду та Δg .

Дані змін гравітаційного поля та форми геоїду можуть бути представлені у часовій та частотній областях. Амплітудний спектр отримується шляхом задіяння до часового ряду процедури швидкого перетворення Фур'є. Для оцінки існуючих періодичностей змін гравітаційного поля Землі та змін форми геоїду Землі було розраховано відповідні амплітудні спектри (рис. 8).

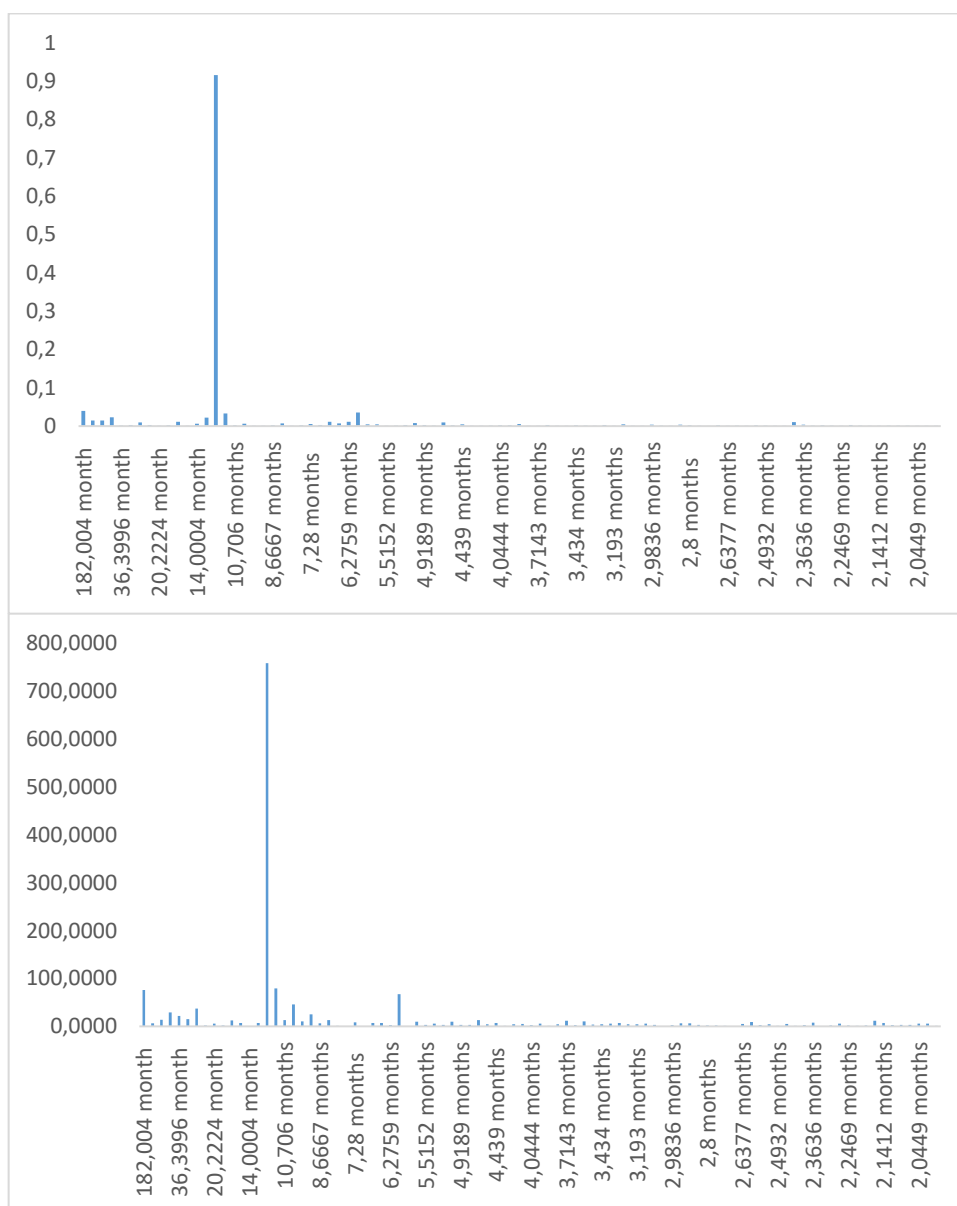


Рисунок 8 – Графіки амплітудного спектру змін гравітаційного поля (а) і спектру змін форми геоїду Землі (б) в районі західного узбережжя півострова Індостан (провінція Гоа, Індія).

У районі досліджень в Індійському океані за умов від'ємної аномалії гравітаційного поля зафіксована депресія поверхні океану, що може досягати глибини 102 метра і є динамічною. За даними розрахунку амплітудного спектру часових змін гравітаційного поля Землі, у зазначеному регіоні виділяється періодична складова - період 1 рік (рис. 8а). За даними розрахунку амплітудного спектру змін форми геоїду Землі також виділяється річна періодична складова (рис. 8б).

З метою визначення ідентичності річної мінливості гравітаційного поля та річної мінливості форми геоїду в обраному регіоні були виконані розрахунки оцінок кроспектру, фазового спектру та спектру когерентності (рис. 9).

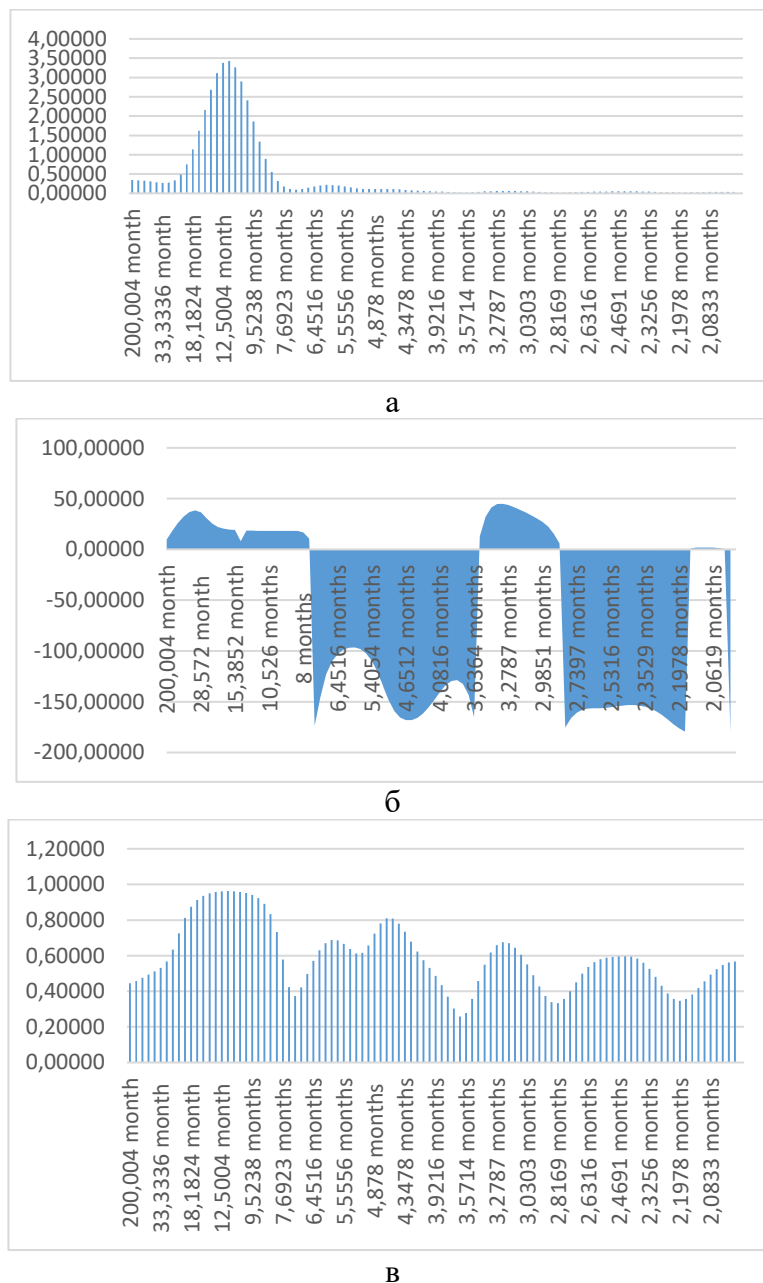


Рисунок 9 – Графіки розрахунку оцінок: а) кроспектру, б) спектру зміни фаз та в) спектру когерентності в районі західного узбережжя півострову Індостан (провінція Гоа, Індія).

В результаті виконаних досліджень вперше зафіксовано високий рівень когерентності річних гармонік змін гравітаційного поля і змін форми геоїду в районі найпотужнішої аномалії Δg , де щорічно виникають найпотужніші мусони.

Для річного періоду отримано кількісні характеристики: кроспектру - 3,5, спектру фазових зсувів - 18° ; спектру когерентності - 0,96.

Висновок. В результаті аналізу умов виникнення мусонних вітрів у Індокоеанському регіоні, який характеризується найпотужнішою аномалією гравітаційного поля Землі, прийнято до уваги те, що зміни Δg можуть викликати (бути причиною) рухів атмосферного повітря [9]. Це актуалізувало дослідження причин виникнення аномалії гравітаційного поля Індокоеанського регіону і було знайдено її пояснення глибинними процесами під Африканською тектонічною плитою [36]. Опосередковано, через аномальні погодні умови у листопаді 2001 – січні 2002 отримано підтвердження впливу Африканських тектонічних процесів на Індокоеанські геодинамічні процеси включно з аномалією гравітаційного поля.

Для забезпечення безпеки мореплавства потрібні методики прогнозування початку та закінчення “сезону” несприятливих погодних умов у зазначеному регіоні. Це потребує створення теорії мусонних вітрів та чисельних розрахунків просторово-часової мінливості літнього мусону. На кількісному рівні отримано підтвердження співпадіння змін Δg з динамікою рідкої оболонки Землі в районі Індокоеанської аномалії. За супутниковими даними про зміни у часі гравітаційного поля Землі (міжнародний проєкт GRACE) та топографії поверхні океану (міжнародний проєкт AVISO) отримано кількісні оцінки наявності статистично значимого зв'язку часових змін топографії поверхні океану у Аравійському морі зі змінами гравітаційного поля. По-перше, встановлено наявність прямо пропорційної залежності між змінами сили тяжіння і рівня океану в районі Аравійського моря. По-друге, визначено, що гравітаційне поле і форма геоїду змінюються у часі виключно з річними циклами. По-третє, встановлено, що так звані, “сезонні” зміни зазначених полів когерентні, але мають незначний зсув за фазою.

Таким чином, на кількісному рівні вперше було підтверджено, що в районі Індокоеанської гравітаційної аномалії з мусонним типом клімату рідка (рухома) оболонка Землі коливається синхронізовано зі змінами Δg .

ЛІТЕРАТУРА

1. Дегтярев А.И. Муссоны в системе глобальной циркуляции атмосферы: диагностика и моделирование: автореф. дис. док. фیز-мат. наук. 2004. URL: <https://www.disscat.com/content/mussony-v-sisteme-globalnoi-tsirkulyatsii-atmosfery-diagnostika-i-modelirovanie> (дата звернення 10.09.2024).
2. Воейков А.И. и современные проблемы климатологии. Збірник статей ред. Будыко М.И. Л.: Гидрометеорологическое изд-во. 1956. 282 с.
3. Дроздов О.А., Сорочан О.Г. Краткий обзор работ, выполненных в России и СССР по характеристике муссонов. *Труды ГГО*. Вып. 111. 1961. С. 49-63.
4. Сорочан О.Г. Муссоны Азии. В кн. *Современные проблемы климатологии*. - Л.: Гидрометеиздат. 1966. 450 с.
5. Осмаловская Е.В., Дмитриев А.А., Гутман Л.Н., Монин А.С. Риль Г. Современные проблемы климатологии. Л.: Гидрометеорологическое изд-во. 1966. 450 с.
6. Рамедж К. Метеорология муссонов. Л.: Гидрометеиздат. 1976. 335 с.
7. Риль Г. Климат и погода в тропиках. Л.: Гидрометеиздат. 1984. 605 с.
8. Тропические муссоны. ред. Петросянца М.А., Белова П.Н. ПГЭП, Т. 9. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 338 с.
9. Руткевич, П.Б. О реакции атмосферы на локальные изменения плотности мантии Земли. *Гидродинамика*. Збірник наукових праць. Вип. 11. 1998. С. 241–248.
10. Бороздич, Э. В. Воздействие короткоживущих подкорковых локальных возмущений на лито-, гидро-и атмосферу. Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. монографія: Наука. 1990. С. 130–140.
11. Гладких І. І. Капочкін Б.Б., Кучеренко Н. В., Лісоводський В. В. Формування погодних умов в морських та прибережних районах. Одеса: Астропринт, 2007. 142 с.

12. Капочкін Б.Б., Доля В.Д. Атмосферні процеси як відображення гравітаційного поля та його мінливості. зб. матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції - І-й Всеукраїнський з'їзд екологів. 2006. Вінниця: ВНТУ. 2006. С. 50.
13. Конкін В.В., Капочкін Б.Б., Доля В.Д. Вплив геодинамічних процесів на атмосферну циркуляцію. *Географія і сучасність*. Науковий часопис національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова. серія 4. Вип. 19. Київ. 2008.С. 37-44.
14. Dolia V. D. The gravitational theory of baric formations. Geophysical Research Abstracts. Vol. 10, EGU2008-A-11100. 2008.
15. Dolia V. D. Basic mechanism of interaction of a gravitational field of the Earth and atmospheric circulation. International conference Global and regional climate changes, conference abstracts, 2010. Kyiv. С. 16-19.
16. Доля В.Д. Капочкін Б.Б. Вплив геофізичних полів на атмосферні процеси - вплив геофізичних полів на атмосферні процеси. Конференція: III-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю. Вересень 2012. DOI:10.13140/RG.2.1.4484.5921.
17. Доля В.Д. Механізм взаємодії гравітаційного поля та атмосферної циркуляції планети: Зб. наук. пр. IX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Випуск IX. Київ. 2013. 330 с.;
18. Доля В.Д. Гравитационное поле – фундаментальный климатообразующий фактор циркуляции атмосферы планеты. Всероссийская научная интернет-конференция с международным участием – “Современное понимание Солнечной системы и открытые вопросы”. Казань. 2014. С. 36-37.
19. Доля В. Д. Гравітаційне поле - основа циркуляції атмосфери планети. 15 українська конференції з космічних досліджень НАН України: тези доповіді. Одеса, 24-28 серпня 2015. с. 16.
20. Спосіб виявлення змін гравітаційного поля Землі: Пат. № 63796 Україна. Опубліковано 25.10.2011. Бюл. N 20.
21. A New Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1065328> (дата звернення 12.09.2024).
22. Доля В.Д. Мусони, як частина глобальної циркуляції атмосфери Землі, геофізична природа явища. зб. наук. праць XII Міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Шевченківська весна – 2014, Частина 3: географія”: тези доповіді. Випуск XII. Київ, 18-22 бер. 2014. С.93.
23. Доля В. Д., Кучеренко Н. В., Капочкин Б. Б. Влияние временной изменчивости гравитационного поля на атмосферу и океан. Scientific Journal “ScienceRise”. Том 2 № 1 (7) 2015, С. 30-34 URL: <https://journals.urau.ua/sciencerrise/article/view/37631> DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.37631> (дата звернення 12.09.2024)
24. Колесник А. В., Доля В. Д., Кучеренко Н. В. Использование ГИС для изучения причин формирования муссонов Индийского океана. Часопис картографії. 2015. Вип. 12. С. 82-89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11] (дата звернення 12.09.2024)
25. Капочкін Б. Б., Кучеренко Н.В., Лісоводський В. В., Конкін В. В. Фізичні механізми вирівнювання баричних градієнтів в атмосфері. К., 2003. 12 с. Деп. в ГНТБ України 04.08.03, № 105.
26. National Weather Service Climate Prediction Centre URL:<http://www.cpc.noaa.gov> дата звернення (14.09.2024).
27. Most Accurate Gravity Map Of The Earth URL: https://www.behance.net/gallery/2290102/extract-Most-Accurate-Gravity-Map-Of-The-Earth?locale=ru_RU (дата звернення 15.09.2024).
28. Войтенко С.П., Учитель И.Л., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б. Геодинамика. Основы кинематической геодезии, Одесса: Астропринт, 2007. — 259 с.
29. Учитель И.Л., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б. Геодинамика. Основы динамической геодезии. под ред. Войтенко С. П. Одесса: Астропринт, 2008, 311 с.

30. Kapochkin A., Kapochkin B., Kucherenko N., Uchytel I. Floods and droughts as a result of deformability of the geological environment Meteorology Hydrology and Water Management. 3(2), p. 3-7. DOI: <https://doi.org/10.26491/mhwm/58810>
31. Гнатюк М. В., Кучеренко А. В., Капочкіна А. Б., Доля В. Д. “Гидрогеодинамический эффект” и наводнения: зб. наук. праць XI Науково-практичної конференції Шевченківська весна – 2013: географія. Випуск XI. Київ, 18-22 бер. URL: <https://www.researchgate.net/publication> (дата звернення 16.09.2024).
32. Pao-Wei Huang, Yong-Fu Lin & Chau-Ron Wu Impact of the southern annular mode on extreme changes in indian rainfall during the early 1990s. Scientific Reports. volume 11, Article number: 2798 (2021) URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-82558-w> (дата звернення 16.09.2024).
33. Капочкіна А.Б., Капочкін Б.Б. Влияние газовой составляющей флюидного режима литосферы в районах акваторий на атмосферные процессы. Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. Т. 4. Вип. 1 2013 22 с. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-gazovoy-sostavlyayuschey-flyuidnogo-rezhima-litosfery-v-rayonah-akvatoriy-na-atmosfernye-protssessy> (дата звернення 10.10.2024).
34. Скорости и направления движения плит. URL: <https://studbooks.net/1787298/geografiya/> (дата звернення 10.10.2024).
35. Attreyee Ghosh, G. Thyagarajulu, Bernhard Steinberger The Importance of Upper Mantle Heterogeneity in Generating the Indian Ocean Geoid Low. Geophysical Research Letter. October 2017 URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley>. <https://doi.org/10.1002/2017GL075392> (дата звернення 10.10.2024).
36. Nasa gravity map of earth URL:<https://mapofsouthwesternontario.pages.dev/posts/nasa-gravity-map-of-earth> (дата звернення 20.10.2024).
37. Seewater aviso altimetry URL:<https://seewater.aviso.altimetry.fr/#/> (дата звернення 20.10.2024).
38. How precise is Earth's gravity URL:<http://www.calpoly.edu/~gthorncr> (дата звернення 20.10.2024).
39. NASA: спутники выявили резкое снижение уровня пресной воды во всем мире URL:<https://www.ixbt.com/news/2024/11/18/nasa-sputniki-vyjavili-rezkoe-snizhenie-urovnja-presnoj-vody-vo-vsem-mire.html> (дата звернення 10.11.2024).
40. Гладких І.І., Симоненков С.В., Михайлов В.І., Кучеренко Н.В., Капочкіна М.Б., Барган О.Г., Чеча О.П. Перспективи розвитку оперативної океанографії в Україні.
41. Гладких І.І., Капочкіна М.Б., Кучеренко Н.В. Капочкін Б.Б. Нова парадигма формування акумулятивного рельєфу мілководних ділянок океанів і морів. Том 3. Раніше невідомі аспекти формування клімату, погоди, в тому числі природні небезпеки: монографія – Одеса : НУ "ОМА", 2021. 199 с.

REFERENCES

1. Degtyarev A.I. Monsoons in the global atmospheric circulation system: diagnostics and modeling: abstract of doctoral dissertation physics and mathematics of science 2004. URL: <https://www.dissercat.com/content/mussony-v-sisteme-globalnoi-tsirkulyatsii-atmosfery-diagnostics-i-modelirovanie> (date of application 10.09.2024).
2. Voeikov A.I. and modern problems of climatology. Collection of articles edited by Budyko M.I. Hydrometeorological Publishing House. 1956. 282 p.
3. Drozdov O.A., Sorochan O.G. Brief overview of works carried out in Russia and the USSR on the characteristics of monsoons. Proceedings of the GTO. Issue 111. 1961. 49-63 p.
4. Sorochan O.G. Monsoons of Asia. In the book Modern Problems of Climatology. - L: Gidrometeoizdat. 1966. 450 p.
5. Osmalovskaya E.V., Dmitriev A.A., Gutman L.N., Monin A.S. Ril G. Modern problems of climatology. JL: Hydrometeorological publishing house. 1966. 450 p.
6. Ramage K. Monsoon meteorology. JL: Hydrometeoizdat. 1976. 335 p.

7. Ril G. Climate and weather in the tropics. L.: Gidrometeoizdat. 1984. 605 p.
8. Tropical monsoons. edited by Petrosyants M.A., Belov P.N. T. 9. L.: Gidrometeoizdat. 1988. 338 p.
9. Rutkevich, P.B. On the reaction of the atmosphere to local changes in the density of the Earth's mantle. *Hydrodynamics*. Collection of scientific works. Issue 11. 1998. P. 241–248.
10. Borozdich, E. V. Impact of short-lived subcortical local disturbances on the litho-, hydro- and atmosphere. Gagarin Scientific Readings on Cosmonautics and Aviation. Monograph: Science. 1990. P. 130–140.
11. Gladkikh I. I. Kapochkin B.B., Kucherenko N.V., Lisovodsky V.V. Formation of weather minds in sea and coastal areas. Odessa: Astroprint, 2007. 142 p.
12. Kapochkin B.B., Dolya V.D. Atmospheric processes such as the reflection of the gravitational field and its flow. zb. materials of the International Scientific and Practical Conference - 1st All-Ukrainian Congress of Ecologists. 2006. Vinnytsia: VNTU. 2006. P. 50.
13. Konkin V.V., Kapochkin B.B., Dolya V.D. Influx of geodynamic processes on atmospheric circulation. Geography and reality. Scientific record of the National Pedagogical University named after M.P. Dragomanova. episode 4. VIP. 19. Kiev. 2008. pp. 37-44.
14. Dolia V. D. The gravitational theory of baric formations. Geophysical Research Abstracts. Vol. 10, EGU2008-A-11100. 2008.
15. Dolia V. D. Basic mechanism of interaction of a gravitational field of the Earth and atmospheric circulation. International conference Global and regional climate changes, conference abstracts, 2010. Kyiv. C. 16-19.
16. Dolya V.D. Kapochkin B.B. The influence of geophysical fields on atmospheric processes - the influence of geophysical fields on atmospheric processes. Conference: III All-Ukrainian Congress of Ecologists with International Participation. September 2012. DOI:10.13140/RG.2.1.4484.5921.
17. Dolya V.D. Mechanism of interaction between the gravitational field and atmospheric circulation of the planet: Collection of scientific works of the IX All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. Issue IX. Kyiv. 2013. 330 p.
18. Dolya V.D. Gravitational field – a fundamental climate-forming factor of the planet's atmospheric circulation. All-Russian scientific Internet conference with international participation – “Modern understanding of the Solar system and open questions”. Kazan. 2014. P. 36-37.
19. Dolya V. D. Gravitational field - the basis of the circulation of the planet's atmosphere. 15th Ukrainian Conference on Space Research of the NAS of Ukraine: abstracts. Odesa, August 24-28, 2015. p. 16.
20. Method for detecting changes in the Earth's gravitational field: Pat. No. 63796 Ukraine. Published 10/25/2011. Bulletin No. 20.
21. A New Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1065328> (date of application 12.09.2024).
22. Dolya V.D. Monsoons, as part of the global circulation of the Earth's atmosphere, the geophysical nature of the phenomenon. Collection of scientific works of the XII International scientific interdisciplinary conference of students, postgraduates and young scientists “Shevchenko Spring – 2014, Part 3: geography”: abstracts of the report. Issue XII. Kyiv, 18-22 Mar. 2014. P.93.
23. Dolya V. D., Kucherenko N. V., Kapochkin B. B. Influence of temporal variability of the gravitational field on the atmosphere and ocean. Scientific Journal "ScienceRise". Volume 2 No. 1 (7) 2015, p. 30-34 URL: <https://journals.urau.ua/sciencerrise/article/view/37631> DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.37631> (date of application 12.09.2024)
24. 24. Kolesnyk A. V., Dolya V. D., Kucherenko N. IN. The use of GIS to study the causes of the formation of monsoons in the Indian Ocean. Journal of cartography. 2015. Issue 12. pp. 82-89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11 (date of application 12.09.2024)
25. Kapochkin B. B., Kucherenko N. V., Lisovodsky V. V., Konkin V. V. Physical mechanisms of equalization of baric gradients in the atmosphere. K., 2003. 12 p. Dep. in the State Scientific and Technological Research Council of Ukraine 04.08.03, No. 105.

26. National Weather Service Climate Prediction Centre URL: <http://www.cpc.noaa.gov> (date of application 14.09.2024).
27. Most Accurate Gravity Map Of The Earth URL: https://www.behance.net/gallery/2290102/extract-Most-Accurate-Gravity-Map-Of-The-Earth?locale=ru_RU (date of application 15.09.2024).
28. Voitenko S.P., Uchitel I.L., Yaroshenko V.N., Kapochkin B.B. Geodynamics. Fundamentals of kinematic geodesy, Odessa: Astroprint, 2007. — 259 p.
29. Uchitel I.L., Yaroshenko V.N., Kapochkin B.B. Geodynamics. Fundamentals of dynamic geodesy. edited by Voitenko S.P. Odessa: Astroprint. 2008. 311 p.
30. Kapochkin A., Kapochkin B., Kucherenko N., Uchitel I. Floods and droughts as a result of deformability of the geological environment Meteorology Hydrology and Water Management. 3(2), p. 3-7. DOI: <https://doi.org/10.26491/mhwm/58810>
31. Hnatyuk M. V., Kucherenko A. V., Kapochkina A. B., Dolya V. D. "Hydrogeodynamic effect" and floods: collection of scientific papers of the XI Scientific and Practical Conference Shevchenko Spring – 2013: geography. Issue XI. Kyiv, March 18-22. URL: https://www.researchgate.net/publication/281114732_Hydrogeodynamic_effekta_and_floods_-_Gidrogeodinamiceskij_effekt_i_navodnenia?channel=doi&linkId=55d6de7808aeb38e8a841ece&showFulltext=true (date of application 16.09.2024).
32. Pao-Wei Huang, Yong-Fu Lin & Chau-Ron Wu Impact of the southern annular mode on extreme changes in indian rainfall during the early 1990s. Scientific Reports. volume 11, Article number: 2798 (2021) URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-82558-w> (date of application 16.09.2024).
33. Kapochkina A.B., Kapochkin B.B. The influence of the gas component of the fluid regime of the lithosphere in the water areas on atmospheric processes. The electronic scientific publication Almanac Space and Time. T. 4. Issue 1. 2013. 22 p. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-gazovoy-sostavlyayuschey-flyuidnogo-rezhima-litosfery-v-rayonah-akvatoriy-na-atmosfernye-protsessy> (date of application 10.10.2024).
34. Speeds and directions of plate movement. URL: <https://studbooks.net/1787298/geografiya> (date of application 10.10.2024).
35. Attreyee Ghosh, G. Thyagarajulu, Bernhard Steinberger The Importance of Upper Mantle Heterogeneity in Generating the Indian Ocean Geoid Low. Geophysical Research Letter. October 2017 URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley> <https://doi.org/10.1002/2017GL075392> (date of application 10.10.2024).
36. Nasa gravity map of earth URL: <https://mapofsouthwesternontario.pages.dev/posts/nasa-gravity-map-of-earth> (date of application 20.10.2024).
37. Seewater aviso altimetry URL: <https://seewater.aviso.altimetry.fr/#!> (date of application 20.10.2024).
38. How precise is Earth's gravity URL: <http://www.calpoly.edu/~gthorncr/ME302/> (date of application 20.10.2024).
39. NASA: Satellites have revealed a sharp decline in fresh water levels around the world URL: <https://www.ixbt.com/news/2024/11/18/nasa-sputniki-vyjavili-rezkoe-snizhenie-urovnja-presnoj-vody-vo-vsem-mire.html> (date of application 10.11.2024).
40. Gladkikh I.I., Symonenkov S.V., Mykhaylov V.I., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B., Bargin O.G., Checha O.P. Prospects for the development of operational oceanography in Ukraine. Odesa: Astroprint, 2017 – 116 p.
41. Gladkikh I.I., Kapochkina M.B., Kucherenko N.V., Kapochkin B.B. A new paradigm of the formation of accumulative relief of shallow areas of oceans and seas. Volume 3. Previously unknown aspects of climate and weather formation, including natural hazards: monograph Odesa: National University "OMA", 2021. 199 p.

Kucherenko N.V., Tomchakovsky G. G., Kapochkina M.B., Kalinichenko E.V.

CONDITIONS OF THE FORMATION OF MONSOON WIND OVER THE INDOCEAN GRAVITY ANOMALY

The tropical zone of the World Ocean is characterized by the practical absence of spatiotemporal changes in insolation, the absence of baric gradients, and as a result, the presence of a shift of atmospheric air from east to west with a speed of up to 6 m/s. This situation contributes to safe navigation. The exception is the water area of the northern part of the Indian Ocean, where from June to August, southwesterly winds are generated with a speed of more than 10 m/s, which form wind waves with a height of up to 7 m. To ensure the safety of navigation, methods for predicting the beginning and end of the "season" of adverse weather conditions are needed. This requires the creation of a theory of monsoon winds and numerical forecasts of the spatiotemporal variability of the summer monsoon. The paper analyzes existing hypotheses of the causes of the disruption of the trade wind circulation in the Indian Ocean region, and obtains numerous estimates of the impact on the moving shells of the Earth, using the example of a liquid shell, of the spatiotemporal changes Δg .

Keywords: *Monsoon wind, geoid, satellite altimetry, satellite gravimetry, physical and statistical modeling, navigational hydrometeorology, shipping safety.*

Хуссейн Ю.М.

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ОПЕРАЦІЙНИМИ РИЗИКАМИ ПРИ ВАНТАЖНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ РОБОТАХ У ПОРТАХ

Метою дослідження є розробка методики оцінки операційних ризиків для її реалізації у системі підтримки прийняття рішень при виконанні вантажно-розвантажувальних робіт у порту в умовах небезпечних ситуацій із судном. Для досягнення мети дослідження розглядаються тільки ті операційні ризики, що зустрічаються під час вантажно-розвантажувальних робіт у портах, що сприяє ефективному управлінню ними. Запропоновано з множини машин, механізмів й обладнання, які використовуються під час вантажно-розвантажувальних робіт у портах, розглянуті лише п'ять типів машин, що найчастіше працюють у подібних ситуаціях. Такими типами обладнання обрані термінальні тягачі, крани Gottwald, портальні крани, механічні укладачі, вилочні навантажувачі. Найбільш суттєвим науковим результатом є застосування методу нечіткого аналізу ієрархії, що дозволило врахувати виявлені ризики, які виникають при роботі розглянутих машин, і ранжувати їх у порядку важливості. Даний метод також застосований для порівняння потенційних ризиків для всіх розглянутих видів обладнання. Встановлені найважливіші ризики, з яким стикається кожен вид досліджуваного обладнання. Запропоновані запобіжні заходи, які відповідають кращим практикам, що дозволить зменшити шкідливі наслідки для кожного ризику, описаного для конкретного виду обладнання. Відповідно до порядку важливості розрахованих ризиків доведено, що ризик виникнення пожежі або вибуху при заправці розглянутих видів машин є найбільш критичним ризиком, що спостерігається. Розроблений підхід та отримані за запропонованою методикою управління операційними ризиками машин й обладнання, що використовуються в вантажно-розвантажувальних роботах, результати фактично є формально-логічним апаратом, який застосовується у системі підтримки прийняття рішень для реагування на небезпечні стани зі судном у порту.

Ключові слова: судноводіння, безпека судноводіння, система підтримки прийняття рішень, вантажно-розвантажувальні роботи, судно, ситуація, обстановка, управління судном, порт, прийняття рішень, безпека, ризик, машина.

Постановка проблеми. Управління операційними ризиками (УОР) має важливе значення в кожній галузі, але особливого значення воно набуває в морському секторі, який займає важливе місце у світовій торгівлі. Сучасні тенденції розвитку морської галузі спрямовані на розвиток «розумних» портів, всебічного втілення різноманітних систем підтримки прийняття рішень (СППР) на різних етапах плавання, у різноманітних умовах, у тому числі таких, що характеризуються неоднозначністю, неточністю та суперечливістю інформації, що надходить, швидкою динамікою зміни обстановки, необхідністю приймати нестандартні рішення. При виникненні таких ситуацій у порту часто виникає необхідність швидкого та безпечного проведення вантажно-розвантажувальних операцій із залучення всього можливого комплексу обладнання. Будучи важливою частиною морського операційного процесу, при виникненні надзвичайних ситуацій у порту, необхідно провести аналіз ризиків вантажно-розвантажувальної техніки, що використовується в цих операціях. Для оцінки безпеки використовується метод нечіткого аналізу ієрархій (MAI). У цьому контексті проаналізовано потенційні ризики цих машин, що використовуються в портах, і оцінено, як ці ризики і наслідки можуть бути зменшені. Отримані результати можуть бути використані як початкові дані для функціонування СППР. Така система не тільки пропонуватиме для осіб, що приймають рішення, конкретні напрямки дій для ліквідації небезпечної ситуації. Система також зможе оцінювати потенційні ризики застосування вантажно-розвантажувальної техніки в конкретних умовах небезпечної ситуації в порту.

Аналіз літератури. Судноплавство, будучи однією з найважливіших галузей промисловості, надає найбільш вигідні з точки зору економіки методи транспортування різноманітних вантажів між портами у різних країнах світу [1, 2]. В останні десятиріччя виконано величезну роботу щодо підвищення безпеки судноплавства, у тому числі у портах при виконанні вантажно-розвантажувальних робіт. Але завжди є деяка ймовірність (ризик) виникнення небажаних подій при виконанні цих робіт. Тому поняття «ризик» завжди розглядалося як основний фактор, що впливає на судноплавство на всіх ділянках виконання плавання [1, 3, 4]. Більш того, на сьогоднішній час управління операційними ризиками набуває все більш важливого значення, враховуючи особливе місце судноплавства у світовій торгівлі [5–8]. Розглянемо операційні ризики, що мають місце в судноплавстві, для подальшого дослідження управління операційними ризиками в цій галузі.

У загальному випадку операційні ризики у судноплавстві можна поєднати у дві великі групи: ризики, що виникають під час морських перевезень, і ризики, що виникають під час вантажно-розвантажувальних робіт у портах. Причому дуже важкою вважається ситуація, що може статися у порту, коли до надзвичайної події додаються несправності вантажно-розвантажувальної техніки, що виникають під час виконання вантажно-розвантажувальних робіт у портах. Для врахування і порівняння ризиків, з якими стикаються фахівці при експлуатації таких машин у портах, можна застосувати МАІ та його модифікацію – метод нечіткого аналізу ієрархій (МНАІ). Крім того, для кожного потенційного ризику можна запропонувати запобіжні заходи для зменшення самого факту виникнення ризиків і можливих наслідків від їхнього настання.

Таким чином, виконання вантажно-розвантажувальних робіт у портах вимагає управління операційними ризиками на раціональній основі.

Метою дослідження є розробка методики оцінки операційних ризиків для її реалізації у системі підтримки прийняття рішень при виконанні вантажно-розвантажувальних робіт у порту в умовах небезпечних ситуацій з судном.

Виклад основного матеріалу. Загальний характер управління операційним ризиком

Виконання організацією своїх бізнес-функцій завжди приводить до виникнення операційного ризику. Основними причинами його виникнення є невдалі (найчастіше – неадекватні) внутрішні процеси, що протікають в організації, або зовнішні події, що мають безпосередній або опосередкований вплив на неї. Але це – не всі причини виникнення ризику. Основні компоненти операційного ризику та їхні взаємозв'язки наведені на рис. 1.

Управління операційним ризиком являє собою безперервний циклічний процес, що складається з оцінки ризику, прийняття рішень щодо нього та впровадження засобів контролю ризику, у результаті чого відбувається прийняття, пом'якшення або уникнення ризику [9]. Отже, управління операційними ризиками можна визначити як нагляд за ними, включаючи ризик збитків, що виникають через неадекватні або неправильні внутрішні процеси, що відбуваються у системі, людський фактор або зовнішні події [10].

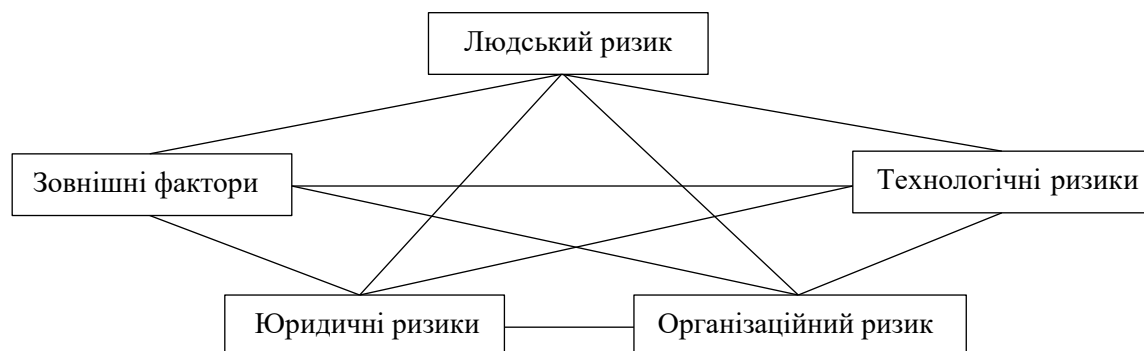


Рисунок 1 – Основні складові операційного ризику та взаємозв'язки між ними

Операційні ризики в судноплавстві

Етимологія поняття «ризик» пов'язана з небезпеками і невизначеністю морської торгівлі. Втрати від морського транзиту вважаються ризиком і пов'язані з непередбачуваною природою моря, досвідом капітана і надійністю судна, про яке йде мова [11]. Операційні ризики в судноплавстві складаються з ризиків, що виникають під час морських перевезень, і ризиків, що виникають під час вантажно-розвантажувальних робіт у портах (рис. 2). До першої групи операційних ризиків відносяться зіткнення, пожежі, терористичні акти, погані погодні умови і несправності вантажних систем. Людський фактор, погані погодні умови, поломки машин й обладнання, несправності в кріпленні та збої в програмному забезпеченні складають групу операційних ризиків, що виникають під час вантажно-розвантажувальних робіт у портах.

Дослідження ризиків у машинах й обладнанні за допомогою МНАІ

Для виконання вантажно-розвантажувальних робіт у портах використовують лінійку різноманітних машин й обладнання. Проаналізуємо ризики, що виникають у використовуваних у портах машинах за допомогою МНАІ. Ризики перераховані в порядку важливості і запропоновані запобіжні заходи для зменшення кожного ризику і його наслідків. Крім того, метод нечіткого аналізу ієрархій використовується для порівняння потенційних ризиків, з якими можуть зіткнутися всі розглянуті машини й обладнання.



Рисунок 2 – Загальна класифікація операційних ризиків у судноплавстві

У вантажно-розвантажувальних роботах у портах використовуються термінальні тягачі, екскаватори, навантажувачі, механічні укладачі (контейнеровози з повними та порожніми контейнерами), мобільні навантажувальні крани на гумових колесах (RTG), мобільні навантажувальні крани на залізничному ході (RMG), крани типу «судно-берег» (SSG), мобільні портові крани Gottwald, портальні крани [12].

З усієї номенклатури обладнання виділимо множину {Термінальні тягачі; Крани Gottwald; Портальні крани; Механічні укладачі; Вилочні навантажувачі}. Ризики, пов'язані з кожним видом машин, позначимо як Ri , ($i = \overline{1, 5}$), де i – вид машин з введеної множини. Кожен Ri представляє

собою один підфакторний набір з виразом r_{ij} – де j номер ризику для i –го виду (групи) машин (обладнання).

Тоді ризики, що виникають в портовому обладнанні і машинах, утворюють множину $R = \{R1, R2, R3, R4, R5\}$, де $R1$ – ризики, що виникають у термінальних тягачах; $R2$ – ризики, пов'язані з кранами Gottwald; $R3$ – ризики, що виникають у портальних кранах; $R4$ – ризики, пов'язані з механічними укладачами; $R5$ – ризики, пов'язані з виловними навантажувачами.

Ризики, характерні для термінальних тягачів (R1)

Термінальний тягач – це сидельний тягач, який переміщує напівпричепа у межах вантажного двору, складського приміщення або інтермодального об'єкта. Дії та ризики, з якими стикається термінальний тягач, показані у таблиці 1, а нечіткі перетворення МНАІ для ризиків, що виникають на термінальному тягачі, показані в таблицях 2–4.

Отже надаємо перелік описів основних ризиків що виникають у термінальних тягачах:

r_{11} – ризик виникнення пожежі/вибуху внаслідок наближення до зони заправки з предметами, які можуть спричинити пожежу та вибух, а також виконання заправки без дотримання інструкції з заправки;

r_{12} – ризик зіткнення термінальних тягачів і транспортних засобів через нерегульований транспортний потік, ризик розчавлення працівників терміналу тягачем;

r_{13} – ризик перекидання термінального тягача та/або контейнера в результаті швидкого маневрування;

r_{14} – ризик контакту з кислотою або ураження електричним струмом внаслідок невикористання захисних засобів або недотримання інструкцій під час контролю акумуляторів, ризик вибуху акумуляторів;

r_{15} – ризик травмування персоналу такими деталями, як штифти та підшипники, що виймаються під час операцій з видалення штифтів у місцях з'єднання машини.

Таблиця 1 – Діяльність/ризики, характерні для термінального тягача

	Діяльність	Ризики	Ймовірність	Тяжкість	Загалом
r_{11}	Заправка	Ризик виникнення пожежі/вибуху внаслідок наближення до зони заправки з предметами, які можуть спричинити пожежу та вибух, а також виконання заправки без дотримання інструкції по заправці	2	5	10
r_{12}	Транспортування контейнерів на майданчики для штабелювання	Ризик контакту з кислотою або ураження електричним струмом внаслідок невикористання засобів захисту або недотримання інструкцій під час роботи з акумуляторами, ризик вибуху акумуляторів	2	4	8
r_{13}	Процес перевірки електричними акумуляторної системи	Ризик контакту з кислотою або ураження електричним струмом внаслідок невикористання засобів захисту або недотримання інструкцій під час роботи з акумуляторами, ризик вибуху акумуляторів	2	3	6
r_{14}	Роботи з технічного обслуговування тягача, що	Ризик травмування персоналу в результаті видалення деталей, таких як штифти і підшипники, під час операцій	4	2	8

	виконуються технічним відділом	видалення штифтів на точках з'єднання машини			
r_{15}	Транспортування контейнерів на майданчики для штабелювання	Ризик перекидання термінального тягача та/або контейнера внаслідок швидкого маневрування	5	1	5

Таблиця 2 – Матриця попарного порівняння

	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}
r_{11}	1	2	3	4	6
r_{12}	$\frac{1}{2}$	1	2	4	5
r_{13}	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	3	4
r_{14}	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	1	2
r_{15}	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1

Таблиця 3 – Нечітка матриця попарного порівняння

	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}
r_{11}	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(5, 6, 7)
r_{12}	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(3, 4, 5)	(4, 5, 6)
r_{13}	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)
r_{14}	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)
r_{15}	($\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{7}$)	($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)

Таблиця 4 – Нечіткі кроки МНАІ для термінального тягача

	Нечітке середнє геометричне значення ($\check{r}$)	Нечітка вага ($\bar{w}$)	Вага (w)	Нормалізована вага ($\bar{w}$)	Ранг
r_{11}	(1,97; 2,70; 3,35)	(0,307; 0,465; 0,640)	0,419	0,414	1
r_{12}	(1,64; 1,82; 1,97)	(0,256; 0,313; 0,378)	0,281	0,277	2
r_{13}	(1,25; 1,15; 1,11)	(0,173; 0,176; 0,189)	0,179	0,177	3
r_{14}	(0,56; 0,53; 0,50)	(0,087; 0,091; 0,094)	0,081	0,080	4
r_{15}	(0,44; 0,33; 0,28)	(0,069; 0,058; 0,053)	0,0531	0,052	5

Для зменшення ризиків та наслідки ризиків, що виникають у термінальних тягачах, можна рекомендувати такі запобіжні заходи:

p_{11} : Використовувати пояснювальні знаки різними мовами в зоні заправки, закрити цю зону і забезпечити доступ до неї тільки уповноваженому персоналу за картками, мати пожежну команду і транспортний засіб досить близько до цієї зони;

p_{12} : Використання чітких попереджувальних дорожніх знаків різними мовами, безпечний інтервал між перемиканнями світлофора, використання бар'єрів у місцях, де транспортний потік дуже складний;

p_{13} : Завантаження програмного забезпечення для обмеження швидкості на двигуни термінальних тягачів, призначення польового персоналу для перевірки правильності кріплення контейнера, завантаженого на тягач, перед виїздом;

p_{14} : Проведення регулярних тренінгів для персоналу, відповідального за заміну акумуляторів та електротехнічні роботи, повне забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту, наявність добре обладнаного медпункту та присутність медичного персоналу в майстерні технічного обслуговування;

p_{15} : Забезпечити весь персонал необхідними засобами індивідуального захисту та призначити польовий персонал для нагляду за їх використанням, мати добре обладнаний медпункт та медичний персонал в майстерні технічного обслуговування.

Ризики, з якими стикаються крани Gottwald (R2)

Крани Gottwald – це мобільні портові крани, які переміщують контейнери, генеральні та проектні вантажі в багатоцільовому терміналі, здебільшого мають дизель-електричний двигун. Діяльність та ризики, з якими стикаються крани Gottwald, наведені в таблиці 5.

Основними ризиками, що виникають у кранах Gottwald, є:

r_{21} – ризик розриву та вибуху кабелю внаслідок потрапляння транспортних засобів та працівників у зону руху крана, здавлювання високовольтного кабелю транспортними засобами;

r_{22} – ризик вибуху гідравлічного шланга внаслідок роботи портової машини без усунення високого гідравлічного тиску в гідравлічній напірній магістралі та/або портової машини без дотримання запобіжних заходів;

r_{23} – ризик обриву канатів лебідки через відсутність технічного обслуговування канатів і шківів, ризик падіння вантажу в результаті обриву канатних шківів;

r_{24} – ризик пожежі та вибуху через розбризкування палива, мастила;

r_{25} – ризик пошкодження вантажопідйомних засобів, таких як канати та гаки, а також падіння вантажу внаслідок використання крана понад допустиму вантажопідйомність через недотримання оператором зазначених інструкцій з експлуатації крана.

Таблиця 5 – Діяльність/ризики, характерні для кранів Gottwald

	Діяльність	Ризики	Ймовірність	Тяжкість	Загалом
r_{21}	Завантаження та розвантаження	Ризик розриву та вибуху кабелю внаслідок потрапляння транспортних засобів та працівників у зону руху крана, здавлювання високовольтного кабелю транспортними засобами	3	5	15
r_{22}	Обслуговування, усунення несправностей і контроль процесу	Ризик вибуху гідравлічного шланга внаслідок роботи портової машини без усунення високого гідравлічного тиску в гідравлічній напірній магістралі та/або портової машини без дотримання запобіжних заходів	3	4	12
r_{23}	Завантаження та розвантаження	Ризик обриву канатів лебідки через відсутність технічного обслуговування канатів і шківів, ризик падіння вантажу в результаті обриву канатних шківів	2	5	10
r_{24}	Заправка дизель-генераторів, які забезпечують електроенергією кран	Ризик пожежі та вибуху через розбризкування палива, мастила	2	4	8

r_{25}	Завантаження та розвантаження	Ризик пошкодження вантажопідйомних засобів, таких як канати та гаки, а також падіння вантажу внаслідок використання крана понад допустиму вантажопідйомність через недотримання оператором зазначених інструкцій з експлуатації крана	1	5	5
----------	-------------------------------	---	---	---	---

Нечіткі кроки МНАІ для ризиків, що виникають при роботі крана Gottwald, показані в таблицях 6-8.

Таблиця 6 – Матриця попарного порівняння

	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}	r_{25}
r_{21}	1	1	2	3	3
r_{22}	1	1	3	3	2
r_{23}	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	1	2	1
r_{24}	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2
r_{25}	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	1

Таблиця 7 – Нечітка матриця попарного порівняння

	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}	r_{25}
r_{21}	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)
r_{22}	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)
r_{23}	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)
r_{24}	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)
r_{25}	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)

Таблиця 8 – Нечіткі кроки МНАІ для кранів Gottwald

	Нечітке середнє геометричне значення ($\check{r}$)	Нечітка вага ($\bar{w}$)	Вага (w)	Нормалізована вага ($\bar{w}$)	Ранг
r_{21}	(1,32; 1,78; 2,17)	(0,214; 0,321; 0,437)	0,324	0,319	1
r_{22}	(1,32; 1,78; 2,17)	(0,214; 0,321; 0,437)	0,324	0,319	1
r_{23}	(0,76; 0,85; 0,89)	(0,123; 0,153; 0,180)	0,152	0,150	2
r_{24}	(0,87; 0,61; 0,49)	(0,141; 0,110; 0,983)	0,116	0,177	3
r_{25}	(0,70; 0,53; 0,44)	(0,114; 0,095; 0,089)	0,099	0,098	4

Для зменшення ризиків та наслідки ризиків, що виникають для кранів Gottwald, можна рекомендувати такі запобіжні заходи:

p_{21} : Проходження високовольтного кабелю на висоті, що запобігає його перетисканню / розриву, використання мобільних загороджень для запобігання в'їзду транспортних засобів в робочу зону крана Gottwald, або призначення навченого персоналу на місці проведення робіт;

p_{22} : Використовувати датчик тиску та програмне забезпечення для запобігання початку роботи без зняття гідравлічного тиску, регулярно інформуючи про це персонал;

p_{23} : Планування регулярного технічного обслуговування кранових канатів і блоків та використання програмного забезпечення для нагадування з метою запобігання забуванню;

p_{24} : Забезпечити, щоб заправку здійснював лише уповноважений та навчений персонал, а також наявність достатньої кількості засобів реагування на надзвичайні ситуації для запобігання поширенню вогню у разі пожежі;

p_{25} : Встановлення датчиків на канатах лебідки та використання програмного забезпечення, яке б дозволяло автоматично зупиняти кран/сповіщати уповноважених осіб у разі перевищення безпечної межі підйому вантажу.

Ризики, що виникають на порталних кранах (R3)

Портальний кран є потужною машиною, яка використовується для підйому дуже великих об'єктів (морські контейнери та автомобілі). Кожен порталний кран складається з пари вертикальних сталевих опор з довгою горизонтальною колією, з'єднаною з верхньою частиною кожної опори. Діяльність та ризики, з якими стикаються порталні крани, показані у таблиці 9.

Отже надаємо перелік описів основних ризиків, що виникають у порталних кранах:

r_{31} – ризик обриву канатів лебідки через відсутність технічного обслуговування канатів і блоків, ризик падіння вантажу внаслідок обриву канатних блоків;

r_{32} – ризик сходження крана з рейок через деформацію коліс або рейок крана та/або швидкий рух крана під час навантаження;

r_{33} – ризик пошкодження вантажопідйомного обладнання, такого як канати та гаки, а також падіння вантажу внаслідок використання оператором крана з перевищенням вантажопідйомності через недотримання зазначених інструкцій з експлуатації крана;

r_{34} – ризик падіння персоналу з висоти внаслідок початку роботи без вживання заходів безпеки під час виконання робіт з контролю та технічного обслуговування, що проводяться на верхівці крана;

r_{35} – ризик зіткнення в результаті завантаження / паркування транспортного засобу на підкрановій доріжці.

Таблиця 9. Діяльність/ризики, характерні для порталних кранів

	Діяльність	Ризики	Ймовірність	Тяжкість	Загалом
r_{31}	Обробка та укладання вантажу	Ризик обриву канатів лебідки через відсутність технічного обслуговування канатів і блоків, ризик падіння вантажу внаслідок обриву канатних блоків	2	5	10
r_{32}	Портальна естакада	Ризик сходження крана з рейок через деформацію коліс або рейок крана та/або швидкий рух крана під час навантаження	1	5	5
r_{33}	Обробка та укладання вантажу	Ризик пошкодження вантажопідйомного обладнання, такого як канати та гаки, а також падіння вантажу внаслідок використання оператором крана з перевищенням вантажопідйомності через недотримання зазначених інструкцій з експлуатації крана	2	4	8
r_{34}	Роботи з технічного обслуговування, ремонту та контролю	Ризик падіння персоналу з висоти внаслідок початку роботи без вживання заходів безпеки під час виконання робіт з контролю та технічного обслуговування, що проводяться на верхівці крана	4	2	8
r_{35}	Портальна естакада	Ризик зіткнення в результаті завантаження / паркування транспортного засобу на підкрановій доріжці	1	4	4

Нечіткі кроки МНАІ для ризиків, що виникають при роботі порталних кранів, наведені в таблицях 10-12.

Таблиця 10 – Матриця попарного порівняння

	r_{31}	r_{23}	r_{33}	r_{34}	r_{35}
r_{31}	1	1	2	3	4
r_{32}	1	1	2	3	4
r_{33}	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	2
r_{34}	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	1	3
r_{35}	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	1

Таблиця 11 – Нечітка матриця попарного порівняння

	r_{31}	r_{23}	r_{33}	r_{34}	r_{35}
r_{31}	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)
r_{32}	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)
r_{33}	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)
r_{34}	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)
r_{35}	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, 1, 1)

Таблиця 12 – Нечіткі кроки МНАІ для порталних кранів

	Нечітке середнє геометричне значення ($\tilde{r}$)	Нечітка вага ($\bar{w}$)	Вага (w)	Нормалізована вага ($\bar{w}$)	Ранг
r_{31}	(1,43; 1,89; 2,27)	(0,222; 0,321; 0,422)	0,322	0,318	1
r_{32}	(1,43; 1,89; 2,27)	(0,222; 0,321; 0,422)	0,322	0,318	1
r_{33}	(1,00; 0,87; 0,80)	(0,155; 0,148; 0,149)	0,151	0,149	2
r_{34}	(0,87; 0,80; 0,86)	(0,135; 0,136; 0,141)	0,138	0,136	3
r_{35}	(0,64; 0,44; 0,34)	(0,100; 0,074; 0,063)	0,079	0,078	4

Для зменшення ризиків та наслідки ризиків, що виникають для порталних кранів, можна рекомендувати такі запобіжні заходи:

p_{31} : Планування регулярного технічного обслуговування кранових канатів і блоків та використання програми-нагадування для запобігання забуванню;

p_{32} : Перевірка та обслуговування коліс і рейок крана через регулярні проміжки часу, використання програмного забезпечення з нагадуванням для запобігання зриву цього обслуговування, використання програмного забезпечення, яке встановлює обмеження швидкості кранів відповідно до ваги вантажу, який вони перевозять;

p_{33} : Встановлення датчиків на канатах лебідки та використання програмного забезпечення, яке б дозволяло автоматично зупиняти кран/сповіщати уповноважених осіб у разі перевищення безпечної межі підйому вантажу;

p_{34} : Періодично проводити навчання персоналу, який працює на висотних кранах, для роботи на висоті, а також призначати персонал на місці для контролю за роботою персоналу на висоті для обслуговування крана;

p_{35} : Використання чітких попереджувальних знаків різними мовами біля підкранової колії, забезпечення належного освітлення, щоб рейки крана було видно вночі.

Ризики, що виникають з механічними укладачами (R4)

Механічний укладач – це транспортний засіб, що використовується для обробки інтермодальних вантажних контейнерів на невеликих терміналах або в портах середнього розміру. Механічні укладачі здатні дуже швидко транспортувати контейнери на короткі відстані і складати їх у різні ряди в залежності від доступу до них. Дії та ризики, з якими стикається механічний укладач, показані в таблиці 13.

Отже надаємо перелік описів основних ризиків, що виникають у механічних укладачах:

r_{41} – ризик пожежі/вибуху в результаті наближення до зони заправки з предметами, які можуть спричинити пожежу та вибух, а також виконання заправки без дотримання інструкції з заправки;

r_{42} – ризик нещасного випадку в результаті швидкого маневрування операторів механічних укладачів на території порту та/або перевищення встановленого обмеження швидкості;

r_{43} – ризик падіння контейнера і пошкодження машин і устаткування в результаті неправильної роботи ламп, що вказують на положення поворотних замків спредера;

r_{44} – ризик зіткнення з транспортними засобами, такими як легкові та вантажні автомобілі, а також з працівниками, які заїжджають у робочу зону механічного укладача;

r_{45} – ризик контакту з кислотою або ураження електричним струмом внаслідок невикористання захисних засобів або недотримання інструкцій під час роботи з акумуляторами, ризик вибуху акумуляторів.

Таблиця 13 – Діяльність/ризик, характерні для механічних укладачів

	Діяльність	Ризики	Ймовірність	Тяжкість	Загалом
r_{41}	Заправка паливом	Ризик пожежі/вибуху в результаті наближення до зони заправки з предметами, які можуть спричинити пожежу та вибух, а також виконання заправки без дотримання інструкції з заправки	1	5	5
r_{42}	Штабелювання вантажу	Ризик нещасного випадку в результаті швидкого маневрування операторів механічних укладачів на території порту та/або перевищення встановленого обмеження швидкості	2	3	6
r_{43}	Штабелювання вантажу	Ризик падіння контейнера і пошкодження машин і устаткування в результаті неправильної роботи ламп, що вказують на положення поворотних замків спредера	3	3	9
r_{44}	Штабелювання вантажу	Ризик зіткнення з транспортними засобами, такими як легкові та вантажні автомобілі, а також з працівниками, які заїжджають у робочу зону механічного укладача	1	4	4
r_{45}	Контроль та обслуговування акумуляторної системи	Ризик контакту з кислотою або ураження електричним струмом внаслідок невикористання захисних засобів або недотримання інструкцій під час роботи з акумуляторами, ризик вибуху акумуляторів	4	2	8

Нечіткі кроки МНАІ для ризиків, що виникають при роботі механічного укладача, наведені в таблиці 14-16.

Таблиця 14 – Матриця попарного порівняння

	r_{41}	r_{42}	r_{43}	r_{44}	r_{45}
r_{41}	1	1	2	3	5
r_{42}	1	1	2	2	3
r_{43}	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	3
r_{44}	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	1	4
r_{45}	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	1

Таблиця 15 – Нечітка матриця попарного порівняння

	r_{41}	r_{42}	r_{43}	r_{44}	r_{45}
r_{41}	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)
r_{42}	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)
r_{43}	(1, 1, 1)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)
r_{44}	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(3, 4, 5)
r_{45}	($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	(1, 1, 1)

Таблиця 16 – Нечіткі кроки МНАІ для механічних укладачів

	Нечітке середнє геометричне значення ($\check{r}$)	Нечітка вага ($\bar{w}$)	Вага (w)	Нормалізована вага ($\bar{w}$)	Ранг
r_{41}	(1,52; 1,97; 2,35)	(0,237; 0,338; 0,439)	0,338	0,335	1
r_{42}	(1,15; 1,64; 2,05)	(0,180; 0,282; 0,382)	0,281	0,278	2
r_{43}	(1,15; 0,94; 0,85)	(0,180; 0,162; 0,159)	0,167	0,165	3
r_{44}	(1,08; 0,920; 0,84)	(0,170; 0,158; 0,157)	0,162	0,160	4
r_{45}	(0,46 0,35; 0,29)	(0,072; 0,061; 0,054)	0,062	0,062	5

Для зменшення ризиків та наслідки ризиків, що виникають для механічних укладачів, можна рекомендувати такі запобіжні заходи:

p_{41} : Використовувати пояснювальні таблички різними мовами в зоні заправки, закрити цю зону і забезпечити доступ до неї тільки уповноваженого персоналу за картками, мати пожежну команду і транспортний засіб досить близько до цієї зони;

p_{42} : Завантаження програмного забезпечення для обмеження швидкості на двигуни механічних укладачів;

p_{43} : Регулярно перевіряти та обслуговувати лампи поворотних замків, забезпечуючи належне освітлення робочої зони під час роботи вночі;

p_{44} : Використання чітких попереджувальних знаків різними мовами, використання бар'єрів навколо зони роботи механічних укладачів;

p_{45} : Проведення регулярних тренінгів для персоналу, відповідального за заміну акумуляторів та електротехнічні роботи, повне забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту, наявність добре обладнаного медпункту та присутність медичного персоналу в майстерні технічного обслуговування.

Ризики, пов'язані з вилковими навантажувачами (R5)

Вилковий навантажувач – це промисловий навантажувач, який використовується для підйому та переміщення матеріалів на невеликі відстані. Дії та ризики, пов'язані з вилковим навантажувачем, наведені в таблиці 17.

Перелік описів основних ризиків, що виникають у вилкових навантажувачах:

r_{51} – ризик пожежі/вибуху в результаті наближення до зони заправки з предметами, які можуть спричинити пожежу та вибух, а також виконання заправки без дотримання інструкції з заправки;

r_{52} – ризик зіткнення з транспортними засобами, такими як легкові та вантажні автомобілі, а також з працівниками, які заїжджають у робочу зону механічного укладача;

r_{53} – ризик падіння контейнера і пошкодження машин і устаткування в результаті неправильної роботи ламп, що вказують на положення поворотних замків спредера;

r_{54} – ризик нещасного випадку в результаті швидкого маневрування операторів механічних укладачів на території порту та/або перевищення встановленого обмеження швидкості;

r_{55} – ризик контакту з кислотою або ураження електричним струмом внаслідок невикористання захисних засобів або недотримання інструкцій під час роботи з акумуляторами, ризик вибуху акумуляторів.

Таблиця 17 – Діяльність/ризик, характерні для вилкових навантажувачів

	Діяльність	Ризики	Ймовірність	Тяжкість	Загалом
r_{51}	Заправка паливом	Ризик пожежі/вибуху в результаті наближення до зони заправки з предметами, які можуть спричинити пожежу та вибух, а також виконання заправки без дотримання інструкції з заправки	1	5	5
r_{52}	Обробка та штабелювання вантажу	Ризик зіткнення навантажувачів і транспортних засобів внаслідок неконтрольованого в'їзду працівників і транспортних засобів у зону роботи навантажувачів, ризик защемлення працівників	2	4	8
r_{53}	Обробка та штабелювання вантажу	Ризик падіння вантажу, що перевозиться або підвішується, або перекидання навантажувача внаслідок неправильного завантаження вантажу	4	3	12
r_{54}	Заміна шин	Ризик защемлення працівника під час зняття шини внаслідок пошкодження компонентів, які фіксують шини, або якщо шини закріплені неправильно	3	1	3
r_{55}	Роботи з технічного обслуговування, ремонту та контролю	Ризик контакту з кислотою або ураження електричним струмом внаслідок невикористання захисних засобів або недотримання інструкцій під час роботи з акумуляторами, ризик вибуху акумуляторів	4	1	4

Нечіткі кроки МНАІ для ризиків, що виникають при роботі вилковим навантажувач, наведені в таблиці 18-20.

Таблиця 18 – Матриця попарного порівняння

	r_{51}	r_{52}	r_{53}	r_{54}	r_{55}
r_{51}	1	2	3	5	5
r_{52}	$\frac{1}{2}$	1	2	4	4
r_{53}	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	3	2
r_{54}	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	1	5
r_{55}	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$	1

Таблиця 19 – Нечітка матриця попарного порівняння

	r_{51}	r_{52}	r_{53}	r_{54}	r_{55}
r_{51}	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)	(4, 5, 6)
r_{52}	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(3, 4, 5)	(3, 4, 5)
r_{53}	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_{54}	($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
r_{55}	($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)

Таблиця 20 – Нечіткі кроки МНАІ для вилкових навантажувачів

	Нечітке середнє геометричне значення ($\check{r}$)	Нечітка вага ($\bar{w}$)	Вага (w)	Нормалізована вага ($\bar{w}$)	Ранг
r_{51}	(2,00; 2,72; 3,37)	(0,299; 0,445; 0,597)	0,447	0,443	1
r_{52}	(1,15; 1,74; 1,90)	(0,232; 0,285; 0,3382)	0,285	0,282	2
r_{53}	(0,87; 0,70; 0,61)	(0,130; 0,114; 0,108)	0,117	0,116	3
r_{54}	(0,61; 0,48; 0,41)	(0,091; 0,078; 0,072)	0,080	0,080	4
r_{55}	(0,61; 0,48; 0,41)	(0,091; 0,078; 0,072)	0,080	0,080	4

Для зменшення ризиків та наслідки ризиків, що виникають для вилкових навантажувачів, можна рекомендувати такі запобіжні заходи:

p_{51} : Використовувати пояснювальні таблички різними мовами в зоні заправки, закрити цю зону і забезпечити доступ до неї тільки уповноваженому персоналу за картками, мати пожежну команду і транспортний засіб досить близько до цієї зони;

p_{52} : Використання чітких попереджувальних знаків різними мовами, наявність достатньої кількості персоналу для спостереження на ділянці;

p_{53} : Встановлення програмного забезпечення для обмеження швидкості на двигун навантажувача, призначення персоналу на місцях для перевірки правильності завантаження навантажувача, проведення регулярних тренінгів для операторів навантажувачів;

p_{54} : Проведення регулярних тренінгів для персоналу, відповідального за виконання робіт з обслуговування шин, повне забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту та необхідним технічним обладнанням, наявність добре обладнаного медпункту та медичного персоналу в цеху технічного обслуговування;

p_{55} : Проведення регулярних тренінгів для персоналу, відповідального за технічне обслуговування, повне забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту, наявність добре обладнаного медпункту та медичного персоналу в цеху технічного обслуговування.

Порівняння потенційних ризиків, що виникають у вибраних вантажно-розвантажувальних машинах (з МНАІ)

Для оцінювання потенційних операційних ризиків, які мають місце у розглянутих машинах, що використовуються для вантажно-розвантажувальних робіт у портах, застосовуються дані, наведені в таблиці 21. Пропонуються врахувати такі ризики:

r_1 : Ризик зіткнення в результаті того, що людина або транспортний засіб потрапляють в робочу зону машини або залишають вантаж у робочій зоні;

r_2 : Ризик пожежі / вибуху під час заправки портової машини паливом;

r_3 : Ризик падіння вантажу, що перевозиться, внаслідок недотримання оператором інструкцій;

r_4 : Ризик травмування обслуговуючого персоналу внаслідок ураження електричним струмом, відкидання рухомих частин, впливу кислоти під час операцій з технічного обслуговування;

r_5 : Ризик пошкодження вантажопідйомного обладнання в результаті використання оператором машини з перевищенням вантажопідйомності;

r_6 : Ризик втоми деталей машини та пошкодження машини внаслідок тривалої роботи вантажно-розвантажувальної машини без відпочинку;

r_7 : Ризик нещасного випадку / зіткнення внаслідок необережності / некомпетентності оператора.

Таблиця 21 – Матриця попарного порівняння

	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
r_1	1	2	3	2	2	4	5
r_2	$\frac{1}{2}$	1	3	2	3	3	4
r_3	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	2	2	3	2
r_4	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	1	3	2	1
r_5	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	1	1	2
r_6	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	1	3
r_7	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	1

Етапи аналізу та ранжування ризиків з використанням нечіткого МАІ наведені у таблицях 22, 23.

Таблиця 22 – Нечітка матриця попарного порівняння

	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
r_1	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(4, 5, 6)
r_2	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)
r_3	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)
r_4	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)
r_5	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)
r_6	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)
r_7	($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$)	(1, 1, 1)

Таблиця 23 – Нечіткі кроки МНАІ потенційних ризиків

	Нечітке середнє геометричне значення ($\check{r}$)	Нечітка вага ($\bar{w}$)	Вага (w)	Нормалізована вага ($\bar{w}$)	Ранг
r_1	(1,74; 2,56; 3,31)	(2,112; 2,874; 3,445)	2,813	0,293	1
r_2	(1,43; 1,67; 1,87)	(1,739; 1,873; 1,949)	1,854	0,193	2
r_3	(1,17; 1,49; 1,72)	(1,486; 1,669; 1,795)	1,630	0,170	3
r_4	(1,22; 1,12; 1,04)	(1,426; 1,261; 1,086)	1,276	0,133	4
r_5	(0,85; 0,67; 0,58)	(1,042; 0,756; 0,605)	0,801	0,083	5
r_6	(0,82; 0,66; 0,58)	(1,000; 0,743; 0,599)	0,781	0,081	6
r_7	(0,52; 0,37; 0,29)	(0,635; 0,414; 0,302)	0,451	0,047	7

Висновки. Розділення операційних ризиків у судноплавстві на дві основні групи: ризики, що зустрічаються під час морських перевезень, і ризики, що зустрічаються під час вантажно-розвантажувальних робіт в портах, сприяє ефективному управлінню ними.

Використання методу нечіткого аналізу ієрархії дозволило врахувати виявлені ризики, що виникають при роботі п'яти обраних машин, які використовуються під час вантажно-розвантажувальних робіт у портах, і ранжувати їх у порядку важливості. Метод нечіткого аналізу ієрархій застосовується для порівняння потенційних ризиків для всіх розглянутих механізмів.

Встановлені найважливіші ризики, з яким стикаються все досліджене обладнання. Так, найважливішими ризиками для термінальних тягачів є ризик пожежі/вибуху в результаті наближення до зони заправки з предметами, які можуть спричинити пожежу та вибух, а також виконання заправки без дотримання інструкцій з заправки термінального трактора; для кранів Gottwald – ризик розриву та вибуху кабелю в результаті в'їзду транспортних засобів та працівників у зону руху крана, що може призвести до перетискання високовольтного кабелю транспортних засобів; для портальних кранів – ризик обриву канатів лебідки через відсутність технічного обслуговування канатів і шківів / ризик падіння вантажу в результаті обриву канатних шківів; для механічних укладачів – ризик пожежі / вибуху в результаті наближення до зони заправки з предметами, які можуть спричинити пожежу та вибух, а також виконання заправки без дотримання інструкції з заправки машини; для вілкових навантажувачів – ризик пожежі/вибуху внаслідок наближення до зони заправки предметів, які можуть спричинити пожежу та вибух, а також виконання заправки без дотримання інструкцій з заправки навантажувача.

Для зменшення шкідливих наслідків для кожного ризику пропонуються запобіжні заходи.

Відповідно до порядку важливості розрахованих ризиків доведено, що ризик виникнення пожежі/вибуху при заправці розглянутих машин є найбільш критичним ризиком, що спостерігається.

Методика управління операційними ризиками машин й обладнання, що використовуються в вантажно-розвантажувальних роботах, є формально-логічним апаратом, який застосовується у системі підтримки прийняття рішень для реагування на небезпечні стани зі судном у порту.

Операції можна проводити більш ефективно при щоденному вживанні запобіжних запропонованих заходів, відповідно до порядку важливості ризиків, які часто зустрічаються в портах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Osorio, J. C., Manotas, D. F., & García, J. L. (2017). *Operational Risk Assessment in 3PL for Maritime Transportation*. Research in Computing Science, 132(1), 63–69. <https://doi.org/10.13053/rcs-132-1-6>.
2. Sener, Z., & Ozturk, E. (2015). A QFD-Based Decision Model for Ship Selection in Maritime Transportation. International Journal of Innovation, Management and Technology, 6(3), 202–205. <https://doi.org/10.7763/ijimt.2015.v6.602>.
3. Aven, T. (2012b), “The risk concept—historical and recent development trends”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 99, pp. 33-44.
4. Branch, A.E. and Robarts, M. (2014), *Elements of Shipping*, Routledge, Taylor and Francis, New York, NY.
5. Barnes, P. and Oloruntoba, R. (2005), “Assurance of security in Maritime supply chains: Conceptual issues of vulnerability and crisis management”, Journal of International Management, Vol. 11 No. 4, pp. 519-540.
6. Eleye-Datubo, A.G., Wall, A., Saajedi, A. and Wang, J. (2006), “Enabling a powerful marine and offshore decision-support solution through Bayesian network technique”, Risk Anal, Vol. 26No. 3, pp. 695-721.
7. Goerlandt, F. and Montewka, J. (2015b), “Maritime transportation risk analysis: review and analysis in light of some foundational issues”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 138, pp. 115-134.
8. Soares, C.G. and Teixeira, A.P. (2001), “Risk assessment in Maritime transportation”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 74 No. 3, pp. 299-309. Retrieved.
9. Federal Aviation Administration. (2000). *FAA System Safety Handbook Glossary*.
10. UK Essays. (November 2018). *Concept of Risk Management in Navy Management Essay*. from: <https://www.ukessays.com/essays/management/concept-of-riskmanagement-in-navy-management-essay.php?vref=1>
11. Walker, R. (n.d.). *The Increasing Importance of Operational Risk in Enterprise Risk Management*.

12. Güller, A., & Gündüz, T. (2016). Limanlarda Kullanılan İş Makinelerinde Risk Analizi Çalışması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5(0), 127. <https://doi.org/10.21923/jesd.08213>.

Khussein Y.

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR MANAGING OPERATIONAL RISKS DURING LOADING AND UNLOADING OPERATIONS IN PORTS

The aim of the study is to develop a methodology for assessing operational risks for its implementation in a decision support system for cargo handling operations in a port in the context of dangerous situations with a ship. To achieve the research goal, only those operational risks encountered during loading and unloading operations in ports are considered, which contributes to their effective management. Out of the variety of machines, mechanisms and equipment used in port handling operations, only five types of machines that are most often used in such situations are considered. These types of equipment are terminal tractors, Gottwald cranes, portal cranes, mechanical stackers, and forklifts. The most significant scientific result is the application of the fuzzy hierarchy analysis method, which made it possible to consider the identified risks arising from the operation of the machines in question and rank them in order of importance. This method was also used to compare the potential risks for all types of equipment under consideration. The most important risks faced by each type of equipment under study are identified. Precautionary measures in line with best practices are proposed to reduce the harmful effects of each risk described for a particular type of equipment. In accordance with the order of importance of the calculated risks, it is proved that the risk of fire or explosion during refuelling of the considered types of machines is the most critical risk observed. The developed approach and the results obtained by the proposed methodology for managing operational risks of machinery and equipment used in loading and unloading operations are a formal logical apparatus used in a decision support system for responding to dangerous conditions with a ship in port.

Keywords: decision support system, cargo handling, ship, situation, condition, ship management, port, decision making, safety, risk, machine

Фуклєв О.І., Ярмак В.Л.

МЕТОД УПРАВЛІННЯ МАНЕВРУВАННЯМ СУДНА НА МІЛКОВОДДІ

У статті визначено, що одним із шляхів оптимізації управління рухом судна в різних умовах руху є створення систем, що застосовують метод, здатний адаптуватися відповідно до цих умов. Результати досліджень свідчать, що отримана адаптивна модель руху судна відповідає основним законам гідромеханіки та разом з алгоритмом адаптації може бути використана як базова при синтезі адаптивного методу управління рухом судна. У статті удосконалено адаптивний метод управління маневруванням судна на мілководді, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на застосуванні динамічної системи управління рухом та дозволяє підвищити точність настроюваних коефіцієнтів управління судном у стиснених водах і на мілководді для систем автоматичного управління та підтримки прийняття рішень.

Ключові слова: судноводіння, безпека судноплавства, безпека на морі, навігація, стислі води, попередження зіткнення суден, маневрування, маршрут судна, метод управління, морський транспорт

Вступ. Одним із шляхів оптимізації управління рухом судна в різних умовах руху є створення систем, що застосовують метод, здатний адаптуватися відповідно до цих умов. Однак перебудова параметрів моделі або її зв'язків на підставі маневрених якостей, отриманих у процесі ходових випробувань судна, не може дати прийнятних результатів через значну кількість факторів, що впливають на рух судна, та складності їх аналітичного представлення. Широкі можливості надаються при використанні адаптивних методів, які налаштовуються на підставі завдання ідентифікації модельованого процесу з реальним процесом руху судна в момент настроювання. Таким чином, виникає актуальне завдання розроблення адаптивного до умов мілководдя методу управління маневруванням судна.

Аналіз літературних джерел. Вплив стінок судна під час звичайних випробувань на стійкість під час маневрування кількісно оцінено в роботі [1]. Течія навколо моделі судна чисельно отримується за допомогою моделі об'єму рідини (VOF). Вплив ширини судна досліджується на основі чисельних розрахунків та модельних випробувань одного й того самого судна з різним масштабом.

Зроблено висновок, що вплив стінок судна під час випробування на стійкість є незначним, якщо ширина судна W в 5 разів перевищує ширину балки B ($W/B > 5$). Слід зазначити, що це перевіряється тільки для глибокої води ($h/T > 7,5$) і, отже, при відносно невеликій глибині води – залежні числа Фруда Fr_h .

В роботі [2] спочатку проблема вирішується в 2D розрахунковій моделі. За допомогою того ж CFD-пакету, що і в [3], зроблено розрахунки для створення регресійної моделі для впливу берегів. Ця модель враховує кут дрейфу і порівнюється з модельними тестами. Математична модель реалізована в симуляторі маневрування судна та протестована.

CFD розрахунки з доступним усередненим методом Рейнольдса Navier Stokes Equation (RANSE) моделлю (Fluent) наведені в роботі [3]. Модель турбулентності SST $k - \omega$ прийнята для врахування в'язкої течії на мілководді. Деякі з розрахунків порівнюються з опублікованими результатами модельних випробувань [4]. Також розраховано багато варіацій положення в поперечному перерізі та глибин води.

Панельний метод (3D Ренкіна першого порядку) був прийнятий для розрахунку сили качки і рискання, викликаних вертикальним і похилим ($1/3$) берегом на контейнеровозі вантажопідйомністю 8 000 TEU. Ці розрахунки порівнюються з опублікованими відкритими даними про вплив крену [5].

У науковій роботі [6] наводиться порівняння між CFD-розрахунками і модельними тестами з VLCC на різних глибинах й вздовж різних типів похилих берегів різного типу. Основна увага приділяється невизначеності розрахунків та вимірювань. Доводиться, що метод RANS може задовільно врахувати деякі параметри маневрування судна у стиснених водах. Набагато менше це стосується (старішого) методу потенційного потоку, який не враховує в'язкість, оскільки у ньому рідина є ідеалізованою. В той же час відсутні, окрім емпіричних, формалізація методу маневрування судном на мілководді, що може бути реалізованих у знанняорієнтованих системах підтримки прийняття рішення судноводіння.

Мета статті: розроблення адаптивного до умов мілководдя методу управління маневруванням судном на мілководді.

Основна частина. Принципи формування процесів ідентифікації та адаптації параметрів моделі руху судна на мілководді можна подати функціональними елементами (рис. 1).

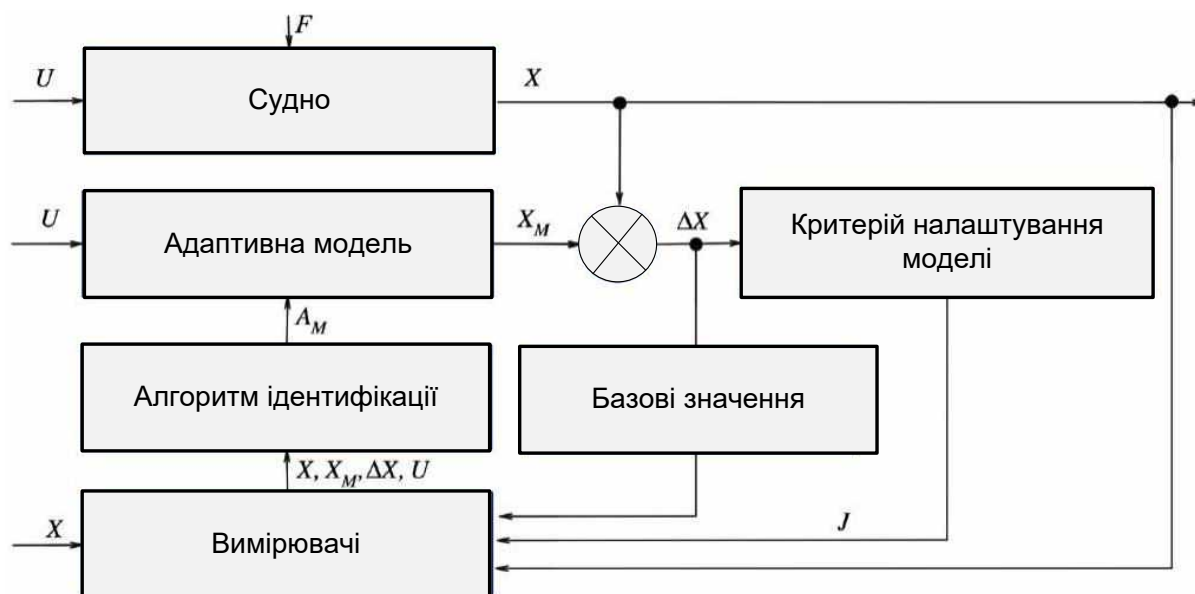


Рисунок 1 – Узагальнена адаптивна модель руху судна

Порядок функціонування елементів розробленої схеми полягає в такому.

У кожний момент часу до входів судна та адаптивної моделі додані керуючі дії (U). На судно діють також зовнішні збурення (F), які можуть бути вимірюваними. Вектор стану судна (X) залежить від керуючого впливу, зовнішніх збурень та вектора параметрів моделі судна на даний момент (A), отриманий на попередньому етапі ідентифікації, що характеризують динамічні якості судна.

Вектор стану адаптивної моделі (X_M) залежить від вектора настроюваних параметрів (A_M), які перераховуються за поточним алгоритмом ідентифікації. Цей алгоритм функціонує на основі обробки вимірювань вектора стану судна та моделі, їх неузгодженості ($\Delta X = X - X_M$), критеріїв якості та налаштування адаптивної моделі (J). Оскільки алгоритм ідентифікації визначається прийнятою адаптивною моделлю ідентифікованого об'єкта та критерієм якості ідентифікації, що оцінює їх близькість, однозначний вибір алгоритму можливий лише за однозначного вибору адаптивної моделі та критерію.

Теорія ідентифікації надає широкий вибір настоюваних моделей [7, 8]. Однак, як правило, ці математичні моделі можуть бути застосовні для часткових режимів руху судна. У роботі [9] досліджується узагальнена адаптивна прогноуюча модель руху судна за різних умов плавання. В якості вихідної для подальшої адаптації пропонується використовувати нелінійну модель руху судна:

$$\dot{x}_{1M} - x_{2M} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{2M} + a_{1M}x_{4M}x_{6M} + a_{2M}n + a_{3M}\delta &= 0, \\
\dot{x}_{3M} - x_{4M} &= 0, \\
\dot{x}_{4M} + a_{4M}x_{2M}x_{6M} + a_{5M}n + a_{6M}\delta &= 0, \\
\dot{x}_{5M} - x_{6M} &= 0, \\
\dot{x}_{6M} + a_{7M}x_{2M}x_{4M} + a_{8M}n + a_{9M}\delta &= 0,
\end{aligned}$$

представлену у просторі станів:

$$\begin{aligned}
a_{1M} &= \frac{m + \lambda_2}{m + \lambda_1}, a_{4M} = \frac{m + \lambda_1}{m + \lambda_2}, a_{7M} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{I_z + \lambda_3}, \\
a_{2M} &= \frac{b_1}{m + \lambda_1}, a_{5M} = \frac{b_3}{m + \lambda_2}, a_{8M} = \frac{b_5}{I_z + \lambda_3}, \\
a_{3M} &= \frac{b_2}{m + \lambda_1}, a_{6M} = \frac{b_4}{m + \lambda_2}, a_{9M} = \frac{b_6}{I_z + \lambda_3}, \\
\dot{x}_{1M} = x_{2M} = V_x; \dot{x}_{3M} = x_{4M} = V_y; \dot{x}_{5M} = x_{6M} = \omega; \\
x_M &= [x_{1M}, \dots, x_{6M}]^T, A_M = [a_{1M}, \dots, a_{9M}]^T.
\end{aligned} \tag{2}$$

Адаптивну ідентифікацію моделі (2), як процес управління її параметрами на відповідність реальному руху судна, пропонується здійснювати методом аналітичного конструювання оптимальних регуляторів (АКОР) за мінімумом квадратичного критерію узагальненої роботи (КУР), тобто сумарних дій керуючих впливів та неузгодженості виходів адаптивної моделі з реальним рухом судна (див. рис. 1). Метод АКОР для синтезу систем управління та поняття критерію узагальненої роботи отримали апробацію та додатки у дослідженнях з розробки систем навігації та управління судном [10, 11].

Тоді, квадратичним КУР оцінки якості ідентифікації моделі руху судна (2) є:

$$\begin{aligned}
J &= W_K[\Delta X, X_M, A_M] \exp\left(\frac{t}{T_j}\right) + \frac{1}{2} \int_t^{t+T} \Delta X^T Q_x \Delta X \exp\left(\frac{t}{T_j}\right) dt \\
&+ \frac{1}{2} \int_t^{t+T} [U_A^T K_A^{-2} U_A + U_{A,op}^T K_A^{-2} U_{A,op}] dt; \\
K_A^{-2} &= K^2 \exp\left(\frac{2t}{T_j}\right),
\end{aligned} \tag{3}$$

де J – квадратичний КУР оцінки якості ідентифікації; W_K – квадратична функція кінцевої оцінки якості ідентифікації; Q_x – діагональна матриця квадратичної форми неузгодженості векторів стану моделі та реального судна; K_A^{-2} – діагональна матриця ваги доданків критерію якості ідентифікації (обирається пропорційно швидкостям зміни настановлених параметрів); T – інтервал оптимізації процесу адаптації моделі; T_j – постійна часу згасання критерію узгодження; U_A – вектор управління процесом ідентифікації (відповідає швидкості зміни налаштовуваних параметрів).

Оскільки процес ідентифікації нелінійний та нестационарний експоненційні множники введені для забезпечення позитивної визначеності мінімізуючої функції критерію узгодження (3) та його згасання. Його застосування далі підтверджується результатами моделювання процесів ідентифікації моделі.

Таким чином, завдання ідентифікації зводиться до оптимізації КУР (3) управління швидкостями зміни настроюваних параметрів узагальненої адаптивної моделі (2).

Відповідно до основної теореми аналітичного конструювання оптимальних регуляторів КУР (3), оптимізація управління перебудовою параметрів адаптивної моделі з урахуванням змін, аналогічних наведеним у роботах [10, 11], зводиться до розв'язання матричних лінійних рівнянь,

що мінімізують неузгодженість руху моделі з реальним процесом:

$$\begin{aligned} \dot{P}_X + \frac{1}{T_J} P_X - J_X^T P_X &= -Q_X [X_M - X]; & P_X &= \left[\frac{\partial W_M}{\partial X_M} \right]; \\ \dot{P}_A + \frac{1}{T_J} P_A &= J_X^T P_X; & P_A &= \left[\frac{\partial W_A}{\partial X_A} \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$J_X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & a_{4M}x_{6M} & 0 & a_{7M}x_{4M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{1M}x_{6M} & -1 & 0 & 0 & a_{7M}x_{2M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{1M}x_{4M} & 0 & a_{4M}x_{2M} & -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$J_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{4M}x_{6M} & n & \delta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{2M}x_{6M} & n & \delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{2M}x_{4M} & n & \delta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де P_X – вектор проєкцій функції W_K , що мінімізує критерій 3), на вектор стану моделі судна; P_A – вектор проєкцій функції W_K на вектор налаштованих параметрів моделі; J_X , J_A – матриці Якобі, утворені з функціональних залежностей рівняння стану моделі (2) за векторами стану й параметрами, відповідно.

У результаті шукане оптимальне керування швидкістю налаштування параметрів адаптивної моделі (2), що забезпечує мінімум КУР (3) та її узгодження з реальним рухом судна, набуде вигляду:

$$U_{\text{оп}} = \dot{A}_M = K_A^{-2} P_A. \quad (7)$$

Розв'язання систем диференціальних рівнянь (5)-(7) дає адаптивну модель горизонтального руху судна, настроювану значеннями гідродинамічних коефіцієнтів, оптимальних за КУР (3) для конкретного режиму руху та умов плавання на мілководді. При роботі алгоритму ідентифікації та оптимізації адаптивної моделі її параметри будуть залежати від поточних вимірювань вектора стану (X) та вектора стану адаптивної моделі (X_M) (рис. 2).

Отже, похибки вимірювання вектора стану судна будуть корельованими з похибками параметрів моделі. Тому матрицю квадратичної форми (Q_X) похибок моделі в КУР (1) доцільно задавати у вигляді коваріаційної матриці похибок вимірів ($Q_X = R^{-1}$).

Для роботи методу адаптації (4)-(5) моделі маневрування судном на мілководді (2) в якості початкових умов доцільно використовувати значення векторів стану та параметрів, характерних для режимів руху конкретного судна прямому курсі, циркуляції.

З фізичного погляду алгоритми адаптації моделі (5)-(7) представляють собою динамічну систему, зовнішнім впливом на яку є неузгодженість між векторами стану моделі та судна [$X_M - X$]. Динаміка даної системи залежить від параметрів моделі (2) її стану та постійного часу згасання за критерієм якості (T_J).

Постійна часу згасання, у свою чергу, повинна обиратися в залежності від нестационарності моделі руху судна (2). Малі значення постійного часу методу адаптації (5)-(7) відповідатимуть локальній оптимізації властивостей моделі (2), тобто, в околиці цієї точки траєкторії руху судна, та диференціальні рівняння (4) перетворюються в алгебраїчні. Такі значення постійного часу згасання доцільно вибирати для малих відрізків руху (маневрування) судна. Значення постійного часу

загасання на тривалих ділянках руху судна необхідно обирати відповідно більшими для оптимізації параметрів моделі (2) для всієї ділянки руху судна.

Рівняння (7) є інтегруючими ланками, виходами, які у разі збільшення значень параметрів залежать від величини вхідного сигналу (P_A) та коефіцієнтів відповідних посилень (K_A^2) системи адаптації.

Отже, значення параметрів моделі матимуть збільшення при ненульових розв'язках рівнянь (4), тобто за наявності неузгодженостей векторів станів моделі та судна (див. рис. 2). Результати рішень рівнянь (5) можуть бути ненульовими навіть за умови збігу векторів станів моделі та судна, й у даному випадку залежатимуть від самих параметрів судна (7), а також значень вектора стану моделі (1). Таке явище характерне при повороті судна або зміні режиму роботи двигуна. Це повністю підтверджує реальні фізичні процеси, що відбуваються при маневруванні судна, які впливають з теоретичних та експериментальних досліджень з керованості судна. Для підтвердження теоретичних положень проводилось експериментальне моделювання за даними руху імітаційної моделі швидкохідного, стійкого на курсі судна водотоннажністю 700 т на спокійній воді зі швидкістю 14 вузлів, отримані з використанням судноводійського тренажера.

За формулами (1) у середовищі MATLAB Simulink побудовано модель руху судна у системі прямокутних координат. Вихідні параметри моделі руху судна $A_M = [a_{1M}, \dots, a_{9M}]$ обрані довільно на підставі рекомендацій, наведених у роботі [12] (таблиця 1).

Таблиця 1 – Початковий довільний набір коефіцієнтів моделі

V_x		V_y		ω	
a_{1M}	0,0005	a_{4M}	0,0001	a_{7M}	0,011
a_{2M}	0,00004	a_{5M}	0,00004	a_{8M}	0,000001
a_{3M}	0,0000001	a_{6M}	0,013	a_{9M}	0,2542

Результати моделювання наведені на рис. 2.

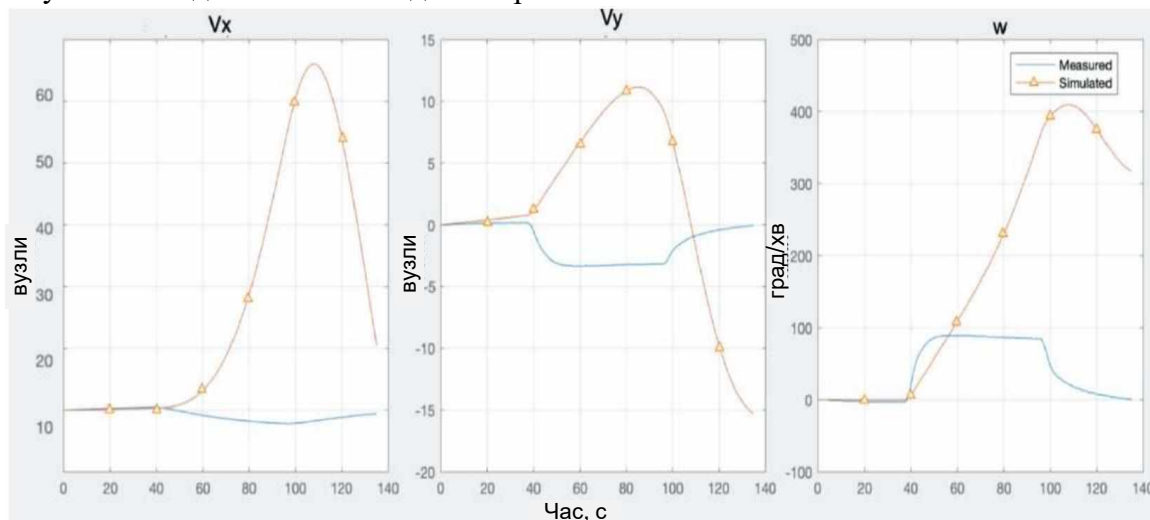


Рисунок 2 – Моделювання руху судна на повороті з вихідним набором параметрів моделі

Далі на основі вихідних параметрів моделі (2) налаштовуються або адаптуються її параметри у процесі маневрування за цими ж вимірами за допомогою формул (5)-(7). Процес налаштування та зміни коефіцієнтів моделі наведений на рис. 2, з якого видно, що процес адаптації зайняв 26 ітерацій, а найбільших змін зазнали лише коефіцієнти (a_{7M}) та (a_{9M}), що враховує вплив проекцій лінійних швидкостей та перекладання керма.

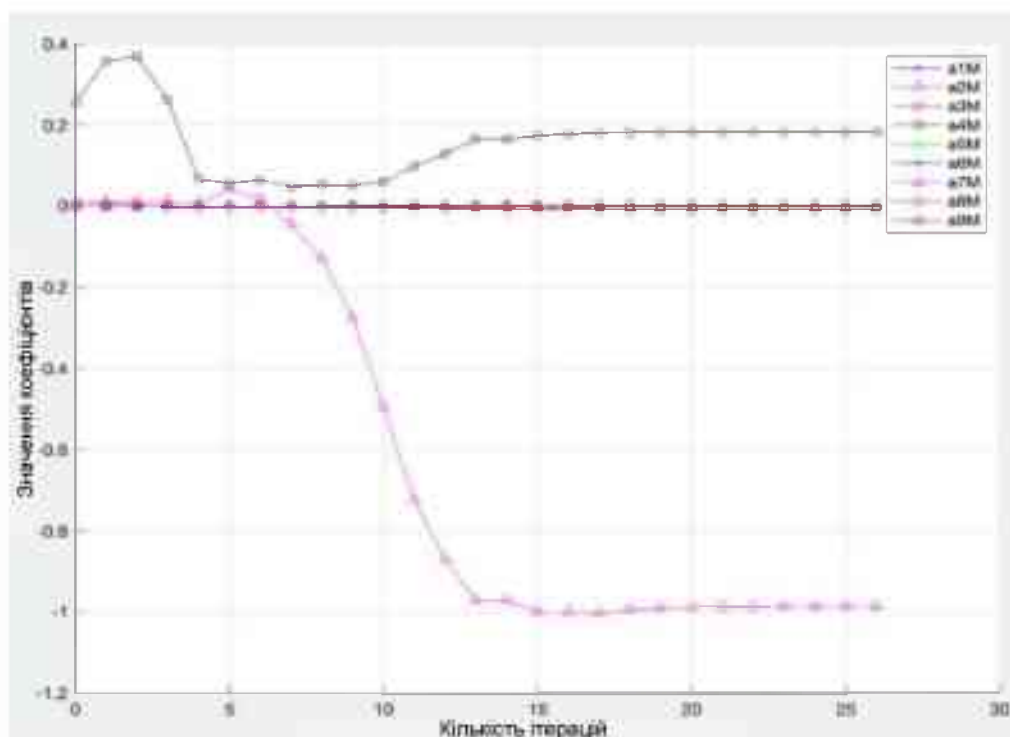


Рисунок 3 – Ідентифікація гідродинамічних коефіцієнтів моделі руху судна на повороті

Значення уточнених ідентифікованих параметрів моделі (1) наведено в табл. 2, а результати моделювання руху судна з підстроєними алгоритмом адаптації ідентифікованими параметрами моделі – на рис. 4, що демонструє значне покращення якості прогнозування руху судна в порівнянні з даними рис. 3.

Таблиця 2– Значення ідентифікованих коефіцієнтів моделі руху

V_x		V_y		ω	
a_{1M}	-0,000289	a_{4M}	0	a_{7M}	-0,98612
a_{2M}	0,0001104	a_{5M}	0,0015117	a_{8M}	0,0020759
a_{3M}	-0,007399	a_{6M}	-0,008235	a_{9M}	0,18333

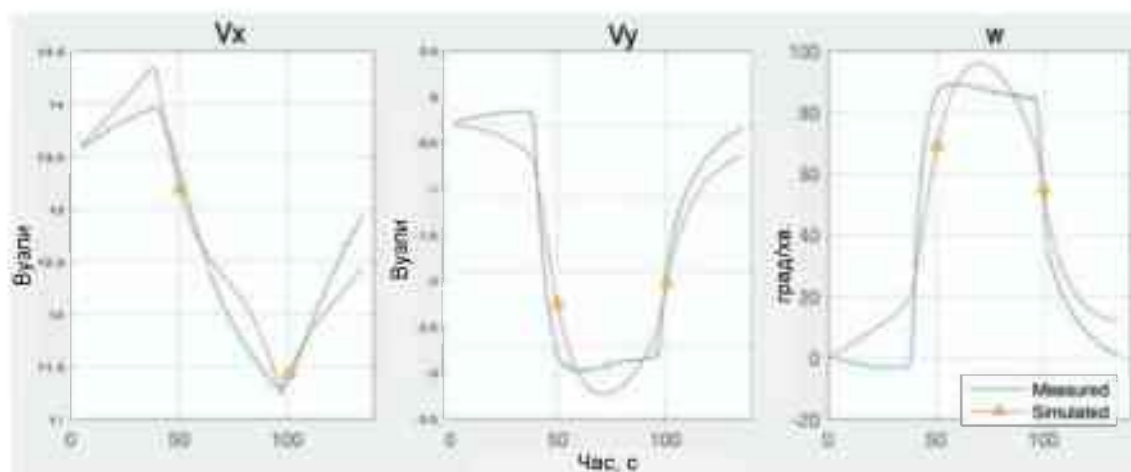


Рисунок 4 – Моделювання руху судна на повороті з ідентифікованим набором параметрів моделі руху судна

Перевірка працездатності моделі руху судна (1) проводилась на незалежному наборі даних, отриманих при маневруванні у змінних умовах плавання (вітер 10 м/с – 1 400, хвилювання моря 2,0 м – 1 600) (рис. 5).

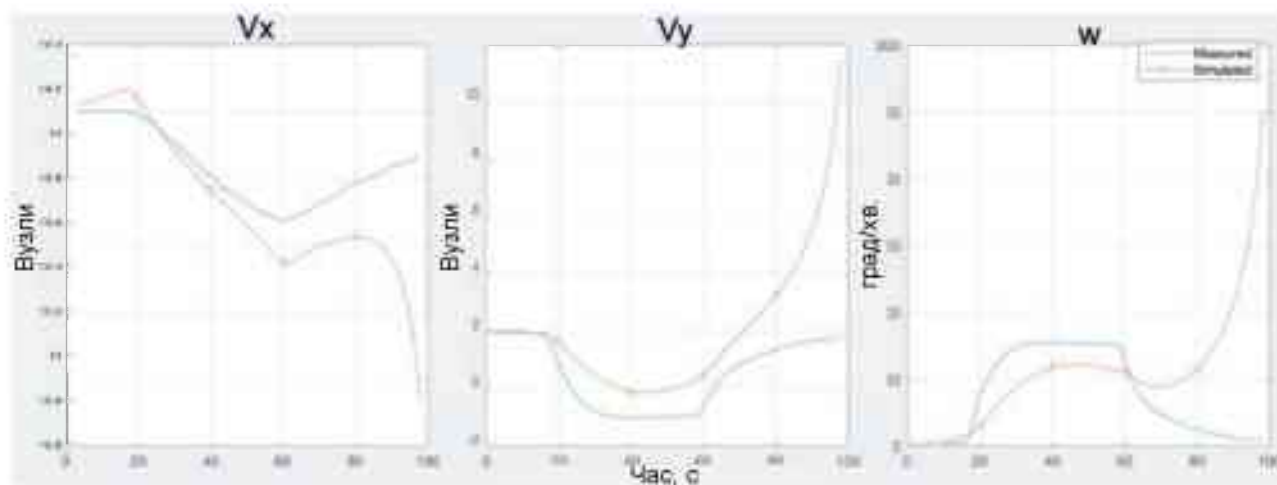


Рисунок 5 – Моделювання руху судна на повороті у змінних умовах плавання

Результати свідчать, що елементи руху судна з коефіцієнтами інших умов значно відрізняються від вимірювань параметрів руху судна, особливо після 60-ої секунди маневру. Це підтверджує необхідність їх адаптації.

Процес переналаштування параметрів адаптивної моделі (1) за формулами (5)-(6) під час руху судна на повороті наведено на рис. 6.

Кількість ітерацій при адаптації коефіцієнтів моделі руху судна у даному випадку знизилася до 15, найбільшій зміні піддавався коефіцієнт (a_{9M}), що враховує вплив перекладки керма у мінливих умовах плавання.

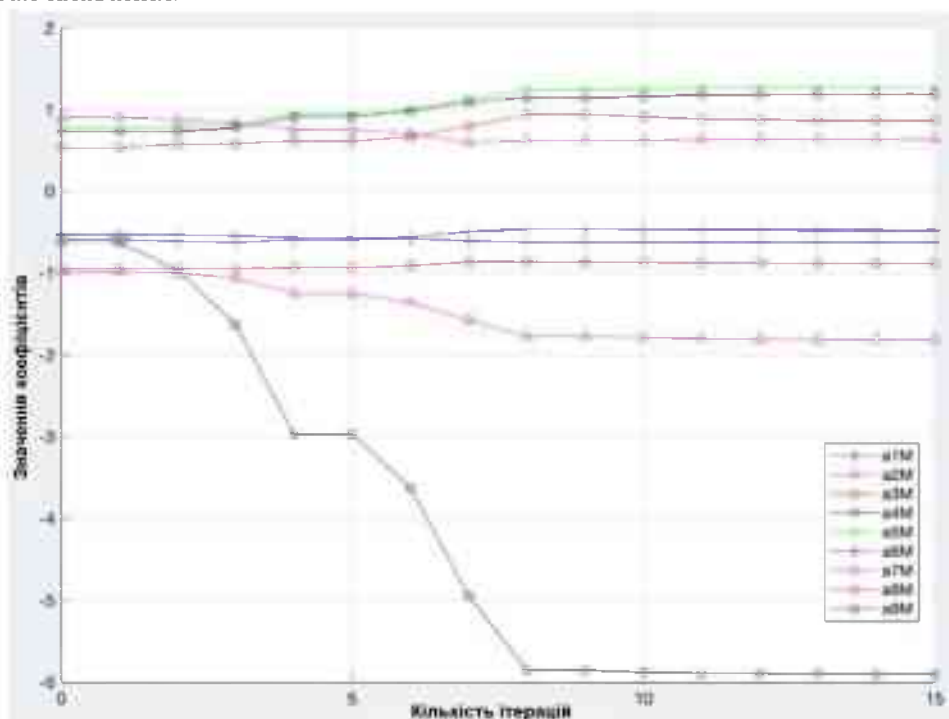


Рисунок 6 – Адаптація гідродинамічних коефіцієнтів моделі руху судна на повороті

Як зазначалося вище, коефіцієнти моделі руху судна (1) змінюються під впливом різних факторів та повинні підлаштовуватися, зокрема, до зовнішніх умов руху судна. Значення

адаптованих параметрів моделі (2) під нові, відмінні від попередніх, умови плавання судна наведені в табл. 3. Результати моделювання руху за адаптованою моделлю судна (1) до нових умов наведена на рис. 7.

Таблиця 3 – Набір адаптованих коефіцієнтів моделі

V_x		V_y		ω	
a_{1M}	-0,000231	a_{4M}	-0,00017	a_{7M}	-1,8072
a_{2M}	0	a_{5M}	0,0024736	a_{8M}	0,0033926
a_{3M}	0,0068688	a_{6M}	-0,009773	a_{9M}	0,29731

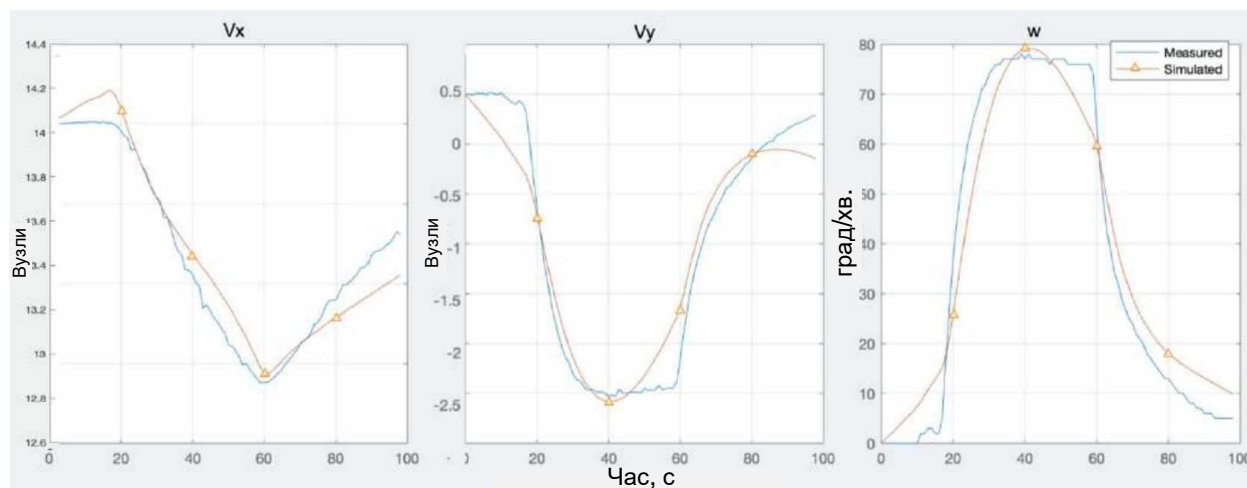


Рисунок 7 – Моделювання руху судна на повороті у змінних умовах плавання з адаптованим набором коефіцієнтів

Висновки. Результати проведених досліджень свідчать, що отримана адаптивна модель руху судна відповідає основним законам гідромеханіки та разом з алгоритмом адаптації може бути використана як базова при синтезі адаптивного методу управління рухом судна.

Час, який витрачається на адаптацію такої моделі, а також необхідність мати весь часовий ряд виміряних параметрів руху судна під час виконання маневру вимагає застосування комп'ютера з достатньо високою продуктивністю за безпосереднього використання алгоритму у САУ судна під час здійснення ним маневрування на мілководді.

Удосконалено адаптивний метод управління маневруванням судном на мілководді, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на застосуванні динамічної системи управління рухом та дозволяє підвищити точність настроюваних коефіцієнтів управління судном у стиснених водах і на мілководді для систем автоматичного управління та підтримки прийняття рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kumar, M. & Anantha Subramanian, V., 2007. A Numerical and Experimental Study on Tank Wall Influences in Drag Estimation. *Ocean Engineering*, 34(1), pp.192–205.
2. Chetvertakov, A.M., Lebedeva, M.P., Nikushchenko, D. V & Maritime, K., 2011. Numerical Investigation of Bank Influence on a Ship Motion. In 2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction, May 18 - 20, 2011, Trondheim, Norway. pp. 83– 88.
3. Wang, H., Zou, Z., Xie, Y. & Kong, W., 2010. Numerical Study of Viscous Hydrodynamic Forces on a Ship Navigating near Bank in Shallow Water. In *Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*. ISOPE, pp. 523–528.

4. Vantorre, M., 2002. Modelling of Ship-Bank Interaction Forces. In IST, The Ship Interaction with the Waterway., 13-15 June. pp. 1–17.
5. Lataire, E., Vantorre, M. & Delefortrie, G., 2009. Captive Model Testing for Ship-to-Ship Operations. In MARSIM '09 Conference, Proceedings. Panama City, Panama: [S.n.], pp. M– 14–1/10.
6. Zou, L., Larsson, L., Delefortrie, G. & Lataire, E., 2011. CFD Prediction and validation of Ship-Bank Interaction in a Canal. In B. Pettersen, T. E. Berg, K. Eloot, & M. Vantorre, eds. Second International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction. pp. 413–422.
7. Васьков, А. С. Перспективные технологии управления процессами судовождения [Текст]/ А. С. Васьков, А. А. Мироненко // AFES 2005. The sixth international scientific forum AIMS for future of engineering science. March 23 – 30, 2005. – Hong Kong. – С. 72 – 73.
8. Odegard V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models// Norwegian University of Science and Technology, 2009. P. 100–107.
9. Панкратова, Н. Д. Квазіоптимальне згладжування як інструментарій аналізу складних слабо структурованих динамічних процесів [Текст]/ Н. Д. Панкратова, Д. Г. Стрелков // Кібернетика та системний аналіз. - 2009. - № 6. - С. 79 - 87.
10. Luo, W. Parameter Identifiability of Ship Manoeuvring Modeling Using System Identification [Text]/ Mathematical Problems in Engineering. – 2016. – Article ID 8909170 – 10 p.
11. Mironenko, A. Determining and tracking the programmed trajectory of a vessel [Text]/ A. Mironenko, A. Vaskov// Humanities & Science University Journal.– 2015. – № 13. – pp.74 – 87.
12. Yodegord, V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models [Text]/ Master of Science in Engineering Cybernetics. // Norwegian University of Science and Technology. – 2009. – 100 p

Fukliev O.I., YARMAK V.

METHOD OF MANEUVERING A VESSEL IN SHALLOW WATER

The article determines that one of the ways to optimize the control of vessel movement in different conditions of movement is to create systems that use a method that can adapt to these conditions. The results of the research show that the obtained adaptive model of vessel movement corresponds to the basic laws of hydromechanics and, together with the adaptation algorithm, can be used as a base in the synthesis of an adaptive method of vessel movement control. The article improves the adaptive method of vessel maneuvering in shallow water, which, unlike existing ones, is based on the use of a dynamic motion control system and allows you to increase the accuracy of adjustable vessel control coefficients in compressed waters and in shallow water for automatic control and decision-making support systems.

Keywords: *navigation, navigation safety, safety at sea, navigation, compressed waters, vessel collision prevention, maneuvering, vessel route, control method, marine transport*

Голубєва С.М., Юрченко Є.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВАРІАНТІВ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК НА ВОДНОМУ ТРАНСПОРТІ

Метою статті є аналіз технологічних альтернатив для електричних суден та електричних рушійних систем у сфері водного транспорту. Мета роботи досягається шляхом виконання аналізу технологічних альтернатив для суден із застосуванням електричних силових установок. Наведена чітка класифікація технологічних альтернативних джерел енергії для експлуатації електричних суден. В якості таких альтернативних варіантів силових установок розглянуті були акумулятори, відновлювані джерела енергії, виробництво паливних елементів, а також електричні системи з виробництвом енергії від двигунів внутрішнього згоряння та акумуляторів. Огляд номенклатури існуючих і діючих суден дозволив виявити основні характеристики різних суден. Більшість комерційних суден, пропонує промисловістю, призначені для експлуатації в морі. Доведено, що у сучасних умовах впровадження невеликих електричних суден на судноплавних водних шляхах з відстанню між акумуляторною інфраструктурою понад 50 миль може бути важко реалізовуваним завданням. Силові установки, які повністю залежать від акумуляторів, складні в реалізації, оскільки автономність обмежена, а відстані між доками перевищують їх запас ходу. Деякі судноплавні водні шляхи розташовані в районах з ускладненим доступом до електроенергії через географічні умови. Основним науковим результатом, одержаним у статті, є висновок, що гібридна система при теперішньому рівні розвитку транспортної галузі й інфраструктури є найкращою технологічною альтернативою для електричних суден. Ця система підвищує ефективність за рахунок впровадження електричних силових установок та акумуляторів, зменшує викиди за рахунок використання відновлюваної енергії та підтримує автономію за рахунок використання викопних ресурсів. Дана альтернатива є короткостроковим рішенням енергетичного переходу у водному транспорті.

Ключові слова: енергоефективність, екологічність, електротранспорт, силова електроніка, морський та річковий транспорт, судові енергетичні установки, діагностування, ефективна потужність, передача потужності, судовий дизель.

Вступ. На долю морського та внутрішнього водного транспорту припадає приблизно 90% перевезень вантажів у світі [1]. Проте, використання судових рушіїв на викопному паливі призводить до виникнення екологічних проблем з викидами, які необхідно вирішувати [2]. Дані викиди спричиняють місцеве забруднення води та повітря [3], залежність від невідновлюваних ресурсів, в першу чергу, нафти [4, 5] та створюють бар'єр для енергетичного зеленого переходу [6].

Нові технології розповсюджуються на судна з електродвигунами, джерела енергії та системи накопичення енергії [7-9]. Впровадження даних систем призводить до значного скорочення викидів парникових газів та забруднення повітря порівняно з традиційними суднами, що застосовують двигуни внутрішнього згоряння [10]. Однак застосування електродвигунів пов'язане з низкою проблем, основними з яких є інфраструктура зарядки, обмежена автономність судна, початкова вартість, доступність технології життєвого циклу акумуляторів, вплив та доступність на виробництво електроенергії [11-13]. Крім того, перехід від традиційних систем до електричних технологій може передбачати значні інвестиції та необхідність навчання персоналу новим методам і технологіям. Занепокоєння також викликає питання належного поводження з відпрацьованими

електричними елементами живлення, забезпечення їхньої переробки та мінімізації впливу на довкілля [14, 15].

Таким чином, необхідно дослідити переваги та недоліки різних технологічних альтернатив у електричних системах суднових пропульсивних комплексів.

Метою статті є аналіз технологічних альтернатив для електричних суден та електричних рушійних систем у сфері водного транспорту.

Аналіз літературних джерел. У роботах [16, 17] наведено порівняльний аналіз альтернативних суднових рушіїв. У статтях [9, 18, 19] досліджена низка електроенергетичних суднових систем, починаючи від систем з виключно акумуляторними батареями, до використання електродвигунів, гібридів з генерацією на викопному паливі. У роботах [20, 21] запропоновано використовувати на суднах відновлювані джерела енергії (ВДЕ), а у роботах [22, 23] – паливні елементи (ПЕ). Низка дослідників розробляють технології електромобільності суден шляхом пошуку різних конфігурацій між джерелом живлення (акумулятори, ВДЕ, водень та гідрокарбід) й рушійною системою (електродвигуни та двигуни внутрішнього згорання). В якості результату отримується порівняльна таблиця технологій, що демонструє переваги та недоліки підходів. Аналіз літературних джерел доводить, що існує значна кількість досліджень, пов'язаних з використанням новітніх електричних технологій на судноплавних водних шляхах і суднах. Однак для електричних рушійних систем кількість публікацій є незначною, саме тому ці дослідження набувають важливого значення.

Огляд міжнародного досвіду та найкращих практик дозволив виявити закономірності та успішні стратегії впровадження електричних двигунів на річкових суднах та суднах прибережного плавання. Такі країни, як Норвегія [24], Нідерланди [25], Бразилія [26], Канада [27], США [28], Латвія, Естонія [8] та Китай [29], досягли прогресу в електрифікації. Їхній досвід пропонує цінні приклади вирішення конкретних проблем. Міжнародна співпраця та обмін знаннями можуть сприяти розвитку електромобільності в усьому світі

Існує незначний зв'язок із судноплавними внутрішніми водними шляхами і відсутній зв'язок з питаннями, пов'язаними зі скороченням викидів внаслідок використання викопного палива, що підтверджує актуальність мети статті.

Проведемо дослідження технологічних рішень для суден з електроприводом. На теперішній час існує лінійка суден з електроприводом. Наприклад, EELEX 8000 – це човен, який був розроблений і виготовлений у Швеції компанією Xshore (рис. 1).



Рисунок 1 – Загальний вигляд човна EELEX 8000
[Джерело – [24]]

Він має 100% електричну силову установку і корпус, побудований з матеріалів з низьким впливом на навколишнє середовище. EELEX 8000 представляє початок більш стійкої морської традиції, використовуючи електричну енергію від акумулятора на 126 кВт-год на додаток до електродвигуна потужністю 170 кВт. Він має мінімальний вуглецевий слід у порівнянні з двигунами на викопному паливі, допомагаючи боротися зі зміною клімату [24].

Інший приклад – човен Q30, який був виготовлений та спроектований у Фінляндії компанією Q-Yachts [29]. Він має 100% електричну силову установку з двох електродвигунів по 10 кВт кожен, літєву батарею на 30 кВт-год з можливістю додавання ще 10 кВт-год – загалом 40 кВт-год, використовує найсучасніші технології, а завдяки оптимізованому гідродинамічному корпусу є достатньо ефективним (рис. 2).

Даний ефект досягається завдяки інноваційній електричній силовій установці Hynova 40.



Рисунок 2 – Загальний вигляд човна Q30
[Джерело – [28]]

Інший варіант – судно Silent 60, яке спроектувала і виготовила в Австрії компанія Silent Yachts (рис. 3).



Рисунок 3 – Загальний вигляд судна Silent 60
[Джерело – [29]]

Судно має два електродвигуни потужністю 340 кВт, які дозволяють комфортно рухатися. Сонячно-електрична силова установка з сонячною системою потужністю Вт, дизель-генератором потужністю 148 кВт та літєвою батареєю ємністю 286 кВт-год забезпечує надійність та безпеку.

Судно Volt 180 було розроблене й виготовлене в Канаді компанією Vision Marine [27]. Воно складається зі 100% електричної силової установки та корпусу зі склопластику. Volt 180 використовує підвісний двигун потужністю 5 к.с. та має місткість 11 пасажирів, досягаючи швидкості 6 вузлів і дальності ходу 6,5 год, а також можливість встановлення літєвої батареї від 1 × 5 кВт-год до 3 × 5 кВт-год [27].

SAY 29E RUNABOUT був розроблений і виготовлений в Іспанії компанією Sayachting. Він має 100% електричну силову установку потужністю 170 кВт, літєву батарею на 126 кВт-год і корпус з вуглецевого волокна. SAY 29E використовує вбудований двигун, що дозволяє йому розвивати максимальну швидкість 50 вузлів, вміщує вісім пасажирів і має запас ходу 6,5 год [28].

Candela C-8 був розроблений і виготовлений у Швеції компанією Candela. Він має 100% електричну силову установку з електродвигуном потужністю 50 кВт і літій-іонною акумуляторною батареєю ємністю 45 кВт-год, а також корпус на підводних крилах. Він оснащений найсучаснішою сенсорною системою, яка автоматично регулює крила, щоб тримати човен рівним і стабільним [26].

Інший варіант – Soelcat 12, катамаран, розроблений і виготовлений компанією Premium Catamarans [26], орієнтований на «денний чартер», який працює виключно на електриці, генеруючи достатньо енергії за наявності сонячного світла, що дозволяє йому долати великі відстані. Весь дах являє собою велику сонячну батарею, що складається з 36 панелей, здатних виробляти майже 10 кВт для живлення двох двигунів потужністю 30 кВт і акумуляторної батареї ємністю 260 кВт-год [26].

У табл. 1 наведено порівняльний аналіз електричних суден.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз характеристик електричних (гібридних) суден
[Джерело – розроблено автором]

Назва	Пропульсивний комплекс	Довжина (м)	Ширина (м)	Максимальна швидкість (вуз.)	Крейсерська швидкість (вуз.)	Країна	Тип судна	Автоматична генерація
EELEX 8000	Батареї	8,00	2,50	30,0	20,0	Швейцарія	Морське	-
Q-Yachts	Батареї	9,30	2,20	15,0	9,0	Фінляндія	Морське	-
Hynova 40	Водневі паливні елементи	12,00	3,80	25,0	15,0	Франція	Морське	+
Silent 60	Гібрид	18,00	9,00	20,0	15,0	Австрія	Морське	+
Volt 180	Батареї	5,40	2,13	5,6	3,4	Канада	Морське/річкове	-
Say 29E	Батареї	8,86	2,76	52,0	40,0	Іспанія	Морське	-
Candela C-8	Батареї	8,50	2,45	30,0	25,0	Швейцарія	Морське	-

У літературних джерелах [15, 17, 21] визначено шість альтернатив, застосовних до суден у межах електромобільності, які використовують акумулятори, відновлювальну енергетику (ВДЕ), двигун на водневих паливних елементах (ВПЕ) та дизельні генератори. Ці системи утворені об'єднанням кількох компонентів, таких як двигун, вал силової передачі та гребний гвинт, які разом складають силову установку.

Інтеграція різних типів технологій робить системи більш економічними, універсальними, конкурентоспроможними та екологічними.

Розглянемо види силових установок.

1. Силова установка з акумуляторним живленням

Дана силова установка характеризується своєю рушійною потужністю [6], яка генерується електродвигуном, що отримує енергію для своєї роботи від акумуляторної батареї, яка заряджається системою підзарядки від джерела живлення на суші. Цей тип системи реалізований у невеликих суднах у зв'язку з низькою автономністю, оскільки вона на 100% залежить від заряду акумулятора. Збільшення кількості акумуляторів на борту судна збільшує автономність, але впливає на вантажопідйомність. Дана силова установка використовується на рибальських та прогулянкових суднах, наприклад, на озерах з невеликими підвісними електродвигунами (менше 1,1 кВт), невеликих пасажирських човнах та автомобільних поромках, оснащених літій-іонними батареями високої ємності. Акумуляторна система забезпечує набагато більшу автономність і більш тривалий термін служби, але все ще має обмеження, такі як вантажопідйомність і автономність. Таким чином,

дані системи рекомендуються в основному для невеликих човнів довжиною менше 24 м. Для інших типів суден рекомендується використання змішаних систем.

Системи накопичення енергії зазвичай розробляються з літій-іонними акумуляторами, де їх напруга в розімкненому колі може бути виражена як функція заряду. Залежно від ступеня їх заряду напруга холостого ходу в акумуляторах може змінюватися приблизно на 20%. Отже, електрична вхідна і вихідна потужність змінюється в залежності від ступеня заряду акумуляторів. Ємність акумулятора представлена в ампер-годинах, а стан заряду обчислюється шляхом вимірювання в режимі реального часу поточного значення кулонівським метром. Дані судна мають безшумні двигуни, не створюють вібрацій, оскільки для їх руху не використовуються коробки передач. Двигуни є екологічними.

2. Силова установка з відновлювальних джерел енергії

Дана силова установка характеризується наявністю електродвигуна, який отримує струм від відновлюваних джерел енергії, наприклад, фотопанелей або вітрогенератора, який зберігається в акумуляторній батареї [20]. Система може мати реалізоване допоміжне джерело на базі дизельного генератора або іншого типу генерації.

3. Силова установка генерації на водневих паливних елементах

Дана силова установка характеризується наявністю електродвигуна. Енергія надходить від водневого двигуна, в якому водень зазвичай використовується як паливо. Потім, за допомогою хімічного процесу, він виробляє енергію, яка використовується для живлення електродвигунів і допоміжних систем судна й одночасно зберігається в основній і вторинній акумуляторній системі для майбутнього використання. На річкових судах можуть використовуватися різні системи залежно від конкретного призначення судна та наявності портової інфраструктури. Найбільш поширеними є протонообмінні мембранні клітини (PEMFC), за ними йдуть розплавлені карбонатні паливні елементи (MCFC) і прямі метанольні паливні елементи (DMFC).

4. Електрична силова установка з виробленням енергії з двигунів внутрішнього згоряння та акумуляторних батарей (гібрид)

Система характеризується наявністю електродвигуна, який отримує енергію для своєї роботи від термоелектричних генераторів. Крім того, електрична енергія накопичується за допомогою акумуляторної батареї. До складу даної силової установки входять один або кілька генераторів внутрішнього згоряння, перетворювачі енергії (DC/DC–AC/DC–DC/AC), шини постійного струму, що забезпечують передачу електроенергії з меншими втратами, а також шини змінного струму для забезпечення живленням електродвигунів.

5. Електрична силова установка, що працює за рахунок генерації з двигунів внутрішнього згоряння без акумуляторних батарей

Робота цієї технології заснована на повністю електричній силовій установці. Вона отримує свою енергію за допомогою теплових генераторів з тією особливістю, що досягається баланс між генерацією та споживанням і не використовуються системи зберігання. Однак установка не має системи накопичення електричної енергії. Генерована електроенергія надходить на головні розподільні щити та розподіляється по всьому судну за допомогою проводки та перетворювачів енергії для правильної роботи силових двигунів та всіх навантажень. Оскільки електрична енергія зазвичай працює з постійною напругою та фіксованою частотою, швидкість силового двигуна регулюється приводом зі змінною швидкістю, який генерує відповідну частоту для досягнення необхідної швидкості. У порівнянні зі звичайними силовими установками, інтегрована архітектура електричних силових установок відкриває значні можливості з точки зору підвищення ефективності та конструкції корабля.

6. Гібридна силова установка з генерацією з двигунів внутрішнього згоряння

Гібридні силові установки поєднують механічну та електричну силові компоненти, що призводить до більш високої ефективності руху. Орієнтовно використання дизель-електричних силових установок дозволяє знизити витрату палива на 20% у порівнянні зі звичайними двигунами. У складі гібридних силових установок можна виділити два важливих елементів: по-перше, блок

генератора та енергетичний трансформатор, а по-друге, привід від електродвигуна і двигуна внутрішнього згоряння [4]. Дизельні генератори подають живлення на розподільні щити, які надсилають струм на трансформатори напруги, а потім на перетворювачі частоти. У цей блок зазвичай входять акумулятори, навіть якщо вони не виробляють енергію.

У момент початку руху дизельні двигуни виступають в ролі генераторів, виробляючи змінний струм, який буде подавати енергію на рушійні синхронні електродвигуни. Найважливішими деталями цього типу силових установок є частотні перетворювачі, оскільки вони адаптують струм до типу двигуна, уникаючи енергетичних втрат. Це дозволяє ефективно контролювати швидкість і обертальний момент. На даний час цей тип силової установки має систему силової електроніки, яка управляє хвостовим генератором. Таким чином, і дизельний двигун, і гребний гвинт синхронізуються на одній частоті. Значною перевагою цієї системи є саме поєднання двох двигунів. Електродвигун підтримує двигун внутрішнього згоряння при цьому останній підтримує свою оптимальну ефективність. Оскільки дизельний двигун буде працювати стабільно, то витрата палива значно знижується.

Переваги та недоліки відповідних технологій наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Переваги та недоліки аналізованих технологічних схем

№	Технологія	Переваги	Недоліки
1	Акумуляторні батареї	Відсутність забруднень в процесі експлуатації. Висока енергоефективність силової установки завдяки накопиченій енергії. Витримування перевантаження за рахунок системи зберігання енергії. Займають на судні менший об'єм, ніж в інших технологіях	Акумуляторні батареї мають значну вагу. Потрібна спеціалізована інфраструктура зарядки, а постачання силових установок орієнтоване на судна з низькими вимогами до потужності. Після закінчення терміну служби батарей їх необхідно утилізувати, що веде до екологічного навантаження на оточуюче середовище.
2	ВДЕ	Висока енергоефективність за рахунок самостійного вироблення енергії та її використання. Витримування перевантаження за рахунок системи зберігання енергії в акумуляторах.	Збільшення ваги судна. Працездатність системи залежить від умов навколишнього середовища та геопозиціонування судна. Системи самогенерації використовують палубний простір, особливо при самогенерації за допомогою фотоелектричних систем. Після закінчення терміну служби батарей їх необхідно утилізувати, що веде до екологічного навантаження на оточуюче середовище.
3	ВПЕ	Не утворює забруднень під час експлуатації. Витримування перевантаження за рахунок системи зберігання енергії. Якщо водень, який використовується як паливо, виробляється з відновлюваних джерел, то його вплив на	Видобуток водню з викопного палива створює більший вплив на навколишнє середовище, ніж видобуток дизельного палива або зрідженому природному газі (ЗПГ); однак це компенсується зменшенням викидів

		навколишнє середовище набагато нижчий, ніж у будь-якого викопного палива.	парникових газів. Зберігання водню на судах є одним з основних обмежень, оскільки це призводить до втрат, а для безпечного зберігання потрібні спеціалізовані контейнери. Для забезпечення потреб суден потрібна інфраструктура водневої заправки. Цей недолік передбачає не лише наявність джерел водню, а й наявність необхідної вантажної інфраструктури для його безпечного транспортування та/або безпечного зберігання в порту.
4	Двигуни внутрішнього згоряння з накопиченням енергії акумуляторними батареями.	Витримування перевантаження за рахунок системи зберігання енергії в акумуляторах. Забезпечення більшої автономності, ніж повністю електричні системи з самогенерацією або без неї. Можливість працювати як на дизельному паливі, так і на ЗПГ. Викиди парникових газів зменшуються при роботі на ЗПГ в порівнянні з тією ж системою, яка працює на дизельному паливі.	При використанні таких систем, як двигуни внутрішнього згоряння або турбіни для генерації, ефективність системи низька в порівнянні з паливними елементами або повністю електричними системами генерації з самогенерацією або без неї, а викиди парникових газів, що генеруються, високі. Завдяки використанню акумуляторних батарей об'єм, який займає система, більший, ніж у системи з прямою генерацією двигуном внутрішнього згоряння або турбіною. Для забезпечення потреб суден потрібна інфраструктура дозаправки. Цей недолік передбачає не тільки наявність джерел палива, але й те, що для його безпечного транспортування та зберігання в порту потрібна зарядна інфраструктура. Після закінчення терміну служби батарей їх необхідно утилізувати, що веде до екологічного навантаження на оточуюче середовище.
5	Двигуни внутрішнього згоряння без накопичення	Більша автономність навігації в порівнянні з повністю електричними системами з самогенерацією або без неї. Можливість працювати як на	При використанні таких систем, як двигуни внутрішнього згоряння або турбіни для генерації, енергетична

	енергії акумуляторними батареями	дизельному паливі, так і на ЗПГ. Викиди парникових газів зменшуються при роботі на ЗПГ в порівнянні з тією ж системою, яка працює на дизельному паливі.	ефективність системи низька в порівнянні з паливними елементами або повністю електричними системами генерації з самогенерацією або без неї, а викиди парникових газів, що генеруються, високі. Для забезпечення потреб суден потрібна інфраструктура дозаправки.
6	Гібридна силова установка	Постійна низька частота обертання дизельного двигуна в комбінованій силовій установці зменшує викиди забруднюючих газів і витрату палива. Універсальність між різними режимами роботи та гнучкість у використанні.	Для забезпечення потреб суден потрібна інфраструктура дозаправки. Це передбачає наявність доступних джерел палива та завантажувальної інфраструктури для їх безпечного транспортування та зберігання в порту.

[Джерело – узагальнено авторами]

Узагальнюючи дані, наведені у табл. 2, можна зробити висновок, що найкращою технологією в короткостроковій перспективі для досягнення енергетичного переходу в секторі річкового транспорту є гібридна система. Ця технологія може бути поєднана з існуючими системами, що підвищує ефективність енергетичної установки, зменшує викиди парникових газів і підтримує інфраструктуру в поєднанні з існуючими системами.

Висновки. У роботі наведено аналіз технологічних альтернатив для суден із застосуванням електричних силових установок. Наведені різні технологічні альтернативи джерел енергії для експлуатації суден. Альтернативними варіантами силових установок, які розглядалися в цій статті, були акумулятори, відновлювані джерела енергії, виробництво паливних елементів, а також електричні системи з виробництвом енергії від двигунів внутрішнього згоряння та акумуляторів. Огляд різних існуючих і діючих суден дозволив виявити основні характеристики різних суден. Більшість комерційних суден, пропонує промисловістю, призначені для експлуатації в морі. Впровадження невеликих електричних суден на судноплавних водних шляхах з відстанню між акумуляторною інфраструктурою понад 50 миль може бути складним завданням. Силові установки, які повністю залежать від акумуляторів, складні в реалізації, оскільки автономність обмежена, а відстані між доками перевищують їх запас ходу. Деякі судноплавні водні шляхи розташовані в районах з ускладненим доступом до електроенергії через географічні умови.

Гібридна система є найкращою технологічною альтернативою для електросуден. Ця система підвищує ефективність за рахунок впровадження електричних силових установок і акумуляторів, зменшує викиди за рахунок використання відновлюваної енергії та підтримує автономію за рахунок використання викопних ресурсів. Дана альтернатива є короткостроковим рішенням енергетичного переходу у водному транспорті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rodrigue, J.P. *The Geography of Transport Systems*; Routledge: Oxfordshire, UK, 2020.
2. Kreps, B.H. The rising costs of fossil-fuel extraction: An energy crisis that will not go away. *Am. J. Econ. Sociol.* 2020, 79, 695–717.
3. Perera, F.; Nadeau, K. Climate Change, Fossil-Fuel Pollution, and Children's Health. *N. Engl. J. Med.* 2022, 386, 2303–2314.

4. Shang, Y.; Han, D.; Gozgor, G.; Mahalik, M.K.; Sahoo, B.K. The impact of climate policy uncertainty on renewable and non-renewable energy demand in the United States. *Renew. Energy* 2022, 197, 654–667.
5. Bigerna, S.; Micheli, S.; Polinori, P. Willingness to pay for electric boats in a protected area in Italy: A sustainable tourism perspective. *J. Clean. Prod.* 2019, 224, 603–613.
6. Kaškosz, K. Analysis and Evaluation of Ferry Services in the Baltic Sea Region in the Context of Environmental Solutions. *Conf. Qual. Prod. Improv. CQPI* 2021, 3, 357–368.
7. Breucker, S.D.; De Breucker, S.; Peeters, E.; Driesen, J. Possible applications of plug-in hybrid electric ships. In Proceedings of the 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Baltimore, MD, USA, 20–22 April 2009.
8. Traut, M.; Gilbert, P.; Walsh, C.; Bows, A.; Filippone, A.; Stansby, P.; Wood, R. Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Appl. Energy* 2014, 113, 362–372.
9. Ihrfelt, F. Electric Leisure Boats: Enablers and Barriers: A Case Study of Leisure Boat Manufacturers. Ph.D. Thesis, KTH Royal Institute Of Technology, Stockholm, Sweden, 2023. [Google Scholar]
10. Medina, I.I.A.; Castillo, S.M.C.; Pasqualino, J.C.; Mendoza, C.D. Viabilidad de electromovilidad náutica en el distrito de Cartagena-Colombia. *Investig. Innov. Ing.* 2019, 7, 20–46. [Google Scholar] [CrossRef]
11. Janjevic, M.; Ndiaye, A.B. Inland waterways transport for city logistics: A review of experiences and the role of local public authorities. *Urban Transp. XX* 2014, 138, 279–290.
12. Ammar, N.R.; Almas, M.A.; Nahas, Q.H. Overview of the main benefits and challenges of different ship propulsion systems. *Int. J. Multidiscip. Curr. Res.* 2023, 11, 314–320.
13. Kifune, H.; Satou, M.; Oode, T. A Study on Battery System Design for Battery Ships Conforming to CHAdeMO. *Mar. Eng.* 2016, 51, 879–886.
14. Giraldo-Pérez, E.; Gaviria, G.; Betancur, E.; Osorio-Gómez, G.; Mejía-Gutiérrez, R. Influence of energy consumption on battery sizing of electric fluvial vessels: A Colombian Case Study. In Proceedings of the 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, 10–12 September 2020; pp. 1–8.
15. Geertsma, R.D.; Negenborn, R.R.; Visser, K.; Hopman, J.J. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Appl. Energy* 2017, 194, 30–54.
16. Bennabi, N.; Charpentier, J.F.; Menana, H.; Billard, J.Y.; Genet, P. Hybrid Propulsion Systems for Small Ships: Context and Challenges. In Proceedings of the 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 4–7 September 2016.
17. Obaid, W.; Hamid, A.K.; Ghenai, C. Wind-Fuel-Cell-Solar Hybrid Electric Boat Power Design with MPPT System. In Proceedings of the 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), Manama, Bahrain, 15–17 April 2019; pp. 1–5.
18. Madsen, R.T.; Klebanoff, L.E.; Caughlan, S.A.M.; Pratt, J.W.; Leach, T.S.; Appelgate, T.B.; Kelety, S.Z.; Wintervoll, H.C.; Haugom, G.P.; Teo, A.T.Y.; et al. Feasibility of the Zero-V: A zero-emissions hydrogen fuel-cell coastal research vessel. *Int. J. Hydrogen Energy* 2020, 45, 25328–25343.
19. Shakeri, N.; Zadeh, M.; Bremnes Nielsen, J. Hydrogen Fuel Cells for Ship Electric Propulsion: Moving Toward Greener Ships. *IEEE Electr. Mag.* 2020, 8, 27–43.
20. Xshore. Eelex 8000. 2022. Available online: <https://xshore.com/eelex-8000/> (accessed on 26 March 2023).
21. Rocha, C.H.; Silva, G.L.; Abreu, L.M.d. Analysis of the evolution of Brazilian ports' environmental performances. *Rev. Gest. Costeira Integr.* 2018, 18, 103–109.
22. Park, C.; Jeong, B.; Zhou, P.; Jang, H.; Kim, S.; Jeon, H.; Nam, D.; Rashedi, A. Live-Life cycle assessment of the electric propulsion ship using solar PV. *Appl. Energy* 2022, 309, 118477.
23. Hemez, C.; Chiu, J.; Ryan, E.C.; Sun, J.; Dubrow, R.; Pascucilla, M. Environmental and health impacts of electric service vessels in the recreational boating industry. *Water Pract. Technol.* 2020, 15, 781–796.

24. Електронний ресурс Q Yachts. 2017. Режим доступу: <https://q-yachts.com/> (доступ 24.01.2025).
25. Електронний ресурс Hynova. Hynova 40. 2022. Режим доступу: <https://www.hynova-yachts.fr/hynova-40/> (доступ 24.01.2025).
26. Електронний ресурс Silent. Silent 60. 2022. Режим доступу: <https://www.silent-yachts.com/es/silent-60/> (доступ 24.01.2025).
27. Електронний ресурс Vision—Marine Technologies. Volt 180 Electric Boat. 2021. Режим доступу: <https://visionmarinetechologies.com/volt-en/> (доступ 24.01.2025)..
28. Електронний ресурс INMEDIA. SAY E. 2023. Режим доступу: <https://www.seyachting.com/es/new-boats/say-29e-electric-silent-boat/> (доступ 24.01.2025).
29. Електронний ресурс Candela. Candela C-8. 2022. Available Режим доступу: <https://candela.com/candela-c-8/> (доступ 24.01.2025).

Golubeva S.M., Yurchenko Ye.M.

RESEARCH OF TECHNOLOGICAL OPTIONS FOR CONSTRUCTION OF ELECTRIC POWER PLANTS IN WATER TRANSPORT

The purpose of the article is to analyze technological alternatives for electric vessels and electric propulsion systems in the field of water transport. The purpose of the work is achieved by performing an analysis of technological alternatives for vessels using electric power plants. A clear classification of technological alternative energy sources for the operation of electric vessels is given. As such alternative options for power plants, batteries, renewable energy sources, fuel cell production, as well as electrical systems with energy production from internal combustion engines and batteries were considered. A review of the nomenclature of existing and operating vessels made it possible to identify the main characteristics of various vessels. Most commercial vessels offered by the industry are intended for operation at sea. It has been proven that in modern conditions, the implementation of small electric vessels on navigable waterways with a distance between battery infrastructure of more than 50 miles can be a difficult task to implement. Power plants that are completely dependent on batteries are difficult to implement, since autonomy is limited and distances between docks exceed their range. Some navigable waterways are located in areas with difficult access to electricity due to geographical conditions. The main scientific result obtained in the article is the conclusion that a hybrid system at the current level of development of the transport industry and infrastructure is the best technological alternative for electric vessels. This system increases efficiency by introducing electric power plants and batteries, reduces emissions by using renewable energy, and maintains autonomy by using fossil resources. This alternative is a short-term solution for the energy transition in water transport.

Keywords: *energy efficiency, environmental friendliness, electric transport, power electronics, marine and river transport, ship power plants, diagnostics, effective power, power transmission, marine diesel.*

Сазін С.В., Заблоцький Ю.В., Сазін А.С.

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ РОБОТИ СУДНОВИХ СЕРЕДНЬООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

Надані результати досліджень, щодо визначення впливу паливних присадок на економічні показники роботи суднових дизелів. Експерименти виконувались на судні класу Container ship необмеженого району плавання, здатного для перевезення 9850 TEU-контейнерів (до 620 з яких – рефрижераторні). Дослідження виконувались на чотирьох однотипних суднових дизелях Wartsila 6L32, що використовувались як допоміжні дизель-генераторів. Дизелі експлуатувались на дистильованих паливах DMA20 (зі вмістом сірки 0,077 % за масою) та RMG450 (зі вмістом сірки 0,46 % за масою). У разі знаходження судна у спеціальних екологічних районах експлуатація дизелів виконувалася на паливі DMA20, під час знаходження судна поза цих районів – на паливі RMG450. Як паливні присадки використовувались продукти фірми Drew Marine: Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus. В трьох дизелях Wartsila 6L32 використовувалась паливна суміш, яка складалась з палива нафтового походження (RMG450 або DMA20) та паливної присадки Amergy 1000, паливна суміш з RMG450 або DMA20 та паливної присадки Amergize, з RMG450 або DMA20 та паливної присадки Amergy XLS Plus. Саме на цих дизелях виконувались експериментальні дослідження з визначення ефективності використання біодизельного палива FAME. Один з дизелів експлуатувався виключно на паливі RMG450 або DMA20, без використання паливної присадки. Під час проведення експериментальних досліджень дизелі Wartsila 6L32 експлуатувались рівні проміжки часу на важкому паливі RMG450 або DMA20 з різними паливними присадками Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus. При цьому їх експлуатація виконувалась на навантаженнях 50 %, 60 %, 70 %, 80 % від номінальної потужності. Тривалість проведення експерименту на кожному з навантажень становила 1...3 години і залежала від умов плавання судна. Метою першого етапу дослідження було визначення з вказаних присадок такої, яка сприяє найкращій економічності роботи дизеля – а саме забезпечує мінімальну питому витрату палива. Як така присадка були визначена паливна присадка Amergy XLS. Завданням другого етапу було визначення оптимальної концентрації присадки в паливі. Це дало можливість визначити концентрацію, яка забезпечує мінімальну питому витрату палива, що сприяє підвищенню економічності роботи суднових середньообертових дизелів

Ключові слова: дистильоване паливо, економічність роботи, морський транспорт, паливна присадка, концентрація, питома витрата палива, судновий дизель-генератор, судновий середньо обертовий дизель

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Морський та внутрішній водний транспорт забезпечує перевезення вантажу між країнами та континентами, що поєднані річками або роз'єднані морями та океанами. При цьому судна морського транспорту є єдиним засобом транспорту, який забезпечує трансокеанське перевезення вантажів.

Рух морських та річкових суден неможливий без використання теплових двигунів (парових або газових турбін, а також двигунів внутрішнього згорання). Сучасні тенденції використання сонячної енергії, гнучких та жорстких вітрил, а також акумуляторних батарей здатні лише частково компенсувати потреби судна в енергії. Крім того, подібні технології поки що перебувають у стадії розробки, розвитку та вдосконалення. Тому на сьогоднішній день існують поодинокі приклади використання подібних енергетичних установок та, відповідно, подібних суден.

Головними та допоміжними двигунами на морських судах є двигуни внутрішнього згоряння / дизелі [1, 2]. Саме цей тип теплових двигунів має найвищий коефіцієнт корисної дії та найнижчу питому витрату палива [3, 4]. Дизелі – основний тип теплових двигунів, що забезпечує рух морських суден, а також функціонування їх систем та механізмів [5, 6]. Сучасні альтернативи судовим дизелям, якими є сонячні батареї, вітрогенератори, жорсткі вітрила та скайт вітрила, акумуляторні батареї, паливні елементи можуть забезпечити енергетичні потреби морських суден лише за певних умов та обмежений період часу.

Отримання ефективної потужності в судових дизелях неможливе без використання в них рідкого палива нафтового походження. Нині є лише поодинокі приклади дизелів, функціонування яких забезпечується з допомогою використання газового палива [7, 8].

В останні роки на транспортних судах морського та внутрішнього водного транспорту для середньообертових дизелів (СОД) все ширше застосовуються важкі сорти палива високої в'язкості, що мають більш низьку вартість [9-11]. 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 500 мм²/с. Перспективи розвитку транспортного суднобудування із застосуванням СОД в світовій практиці тісно пов'язані з використанням подібних видів палива. При цьому слід зазначити, що важкі сорти палива використовуються для роботи як головних СОД, що передають свою потужність на рушій, так і допоміжних, які є приводом електричних генераторів. Крім того, в судову практику чітко простежується тенденція використання важких сортів палива не тільки для сучасних моделей СОД, а також переведення СОД попередніх моделей (спроектованих з умовою їхньої роботи на легких сортах палива) на експлуатацію на паливі з підвищеною в'язкістю [12-15].

Використання 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. При цьому фірми-виробники не рекомендують суворо визначений діапазон концентрації паливних присадок під час їх додавання в паливо. Як правило в інструкціях з їх використання вказується лише можливий діапазон цієї концентрації, при чому в більшості випадків нижні та верхні межі цього діапазону відрізняються один від одного в декілька разів. Це призводить до перевитрати паливних присадок, що, в зв'язку з їх більшою в порівнянні з нафтовим паливом вартістю, зменшує економічну ефективність використання. Також невірно обрана концентрація паливних присадок може призвести до того, що для цього випадку буде спостерігатися більше значення питомої витрати палива в порівнянні з режимом експлуатації дизеля з використанням іншої (оптимальної) концентрації паливної присадки [16-18].

Вказане підкреслює актуальність проведення досліджень, спрямованих на визначення оптимальної концентрації паливних присадок в паливі нафтового походження, перш за все це буде сприятиме підвищенню економічності роботи судових дизелів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Присадки до судових палив в даний час набули досить широкого поширення на судах, однак результат їх застосування не завжди отримує однозначну оцінку [19-22]. Це пов'язано з різними причинами, які, перш за все, залежать від характеристик дизеля та елементів його паливної системи, а також від забезпечення правильної технології використання присадок та необхідності підтримання екологічності роботи судна [23-28]. Використання присадок до палива також обмежується діапазоном концентрації, яку рекомендують фірми-виробники. При цьому ці рекомендації не визначають оптимальну концентрацію присадки, яка в більшості випадків залежить від характеристик дистильованого палива, до якого вона додається, від технічного стану та навантаження на судовий дизель, а також від коректності її додавання до об'єму палива, що знаходиться в паливній системі [29-32].

Формулювання цілей статті. На даний момент конструктивне і технологічне виконання судових двигунів внутрішнього згоряння досягло своєї досконалості, що забезпечує мінімальні

питомі витрати палива даних типів теплових двигунів в порівнянні з іншими. У зв'язку з цим метою дослідження було визначення впливу паливних присадок на економічність роботи дизелів морських суден.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на судні класу Container ship необмеженого району плавання, здатного для перевезення 9850 TEU- контейнерів (до 620 з яких – рефрижераторні). Дослідження виконувались на чотирьох однотипних судових дизелях Wartsila 6L32, що використовувались як допоміжні дизель-генераторів. Основні характеристики дизелів приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики судових дизелів Wartsila 6L32

Показник	Значення
Тип	Чотиритактний, тронковий, з наддувом, з охолодженням прісною водою та циркуляційною системою мащення
Діаметр циліндра, м	0,32
Хід поршня, м	0,40
Частота обертання, хв ⁻¹	720
Кількість циліндрів	6
Потужність, кВт	3210

Експлуатація дизелів вироблялась на двох видах топлива – DMA20 (при плаванні судна в районах SECAs) і RMG450 (при плаванні судна в районах SECAs). Основні характеристики топлив DMA20 та RMG450 приведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики моторних палив

Характеристика	Марка палива	
	DMA20	RMG450
Густина при 20°C, кг/м ³	878	922
В'язкість при 40°C, мм ² /с	19,4	446
Вміст сірки, %	0,077	0,46
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	43320	40020

Розміщення дизелів Wartsila 6L32 в машинному відділенні судна показано на рис. 1.

Паливна система кожного з дизелів передбачала дозування до загального потоку палива, яке прямує до паливних насосів високого тиску, паливної присадки, що забезпечувалось за допомогою дозерної установки [33, 34].

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 [35, 36]. 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...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.



Рисунок 1 – Розміщення суднових дизелів Wartsila 6L32F в машинному відділенні

Паливна присадка Amergize – суміш розчинних в мастилі органометаллів, найбільш ефективна для дизелів, що працюють на важкому паливі. Випробування присадки Amergize в двигунах показали, що поєднання інгредієнтів в Amergize забезпечує синергетичний ефект, що дозволяє знижувати відкладення і покращувати згорання. Amergize підходить як для середньо-, також і для малообертових дизелів, в яких виникають проблеми, пов'язані із згоранням і відкладеннями на внутрішніх поверхнях дизеля через наявність в паливі ванадію, сірки і натрію. Перетворювач відкладень в Amergize діє під час процесу згорання, вступаючи в реакцію з цими речовинами (ванадій, сірка, натрій) і змінюючи склад золи, що зменшує механічні втрати на подолання сил тертя. Стандартне дозування Amergize в межах 1 літр на 1...8 тонн палива. Дози можуть змінюватися залежно від рівня забруднення палива, конструкції двигуна і експлуатаційного стану енергетичної установки [37, 38].

Паливна присадка Amergy XLS Plus призначена для низько сірчистих палив. Amergy XLS Plus – це суміш дисперсантів, активаторів згорання, 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.

Принципова схема паливної системи дизелів наведена на рис. 2.

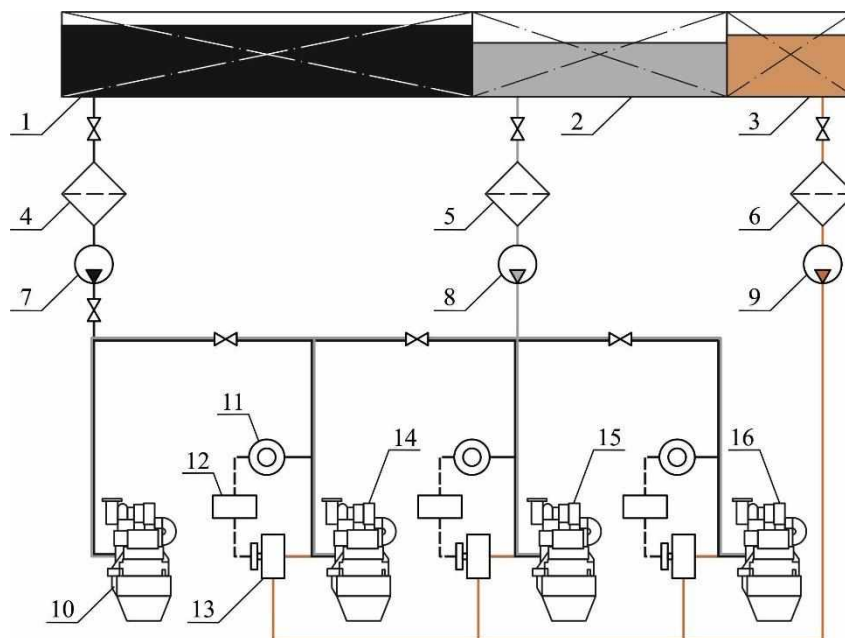


Рисунок 2 – Принципова паливна схема суднових дизелів Wartsila 6L32:

- 1 – витратна цистерна палива RMG450; 2 – витратна цистерна палива DMA20;
 3 – витратна цистерна паливних присадок; 4, 5, 6 – паливні фільтри для палив RMG450, DMA20 та паливних присадок відповідно; 7, 8, 9 – паливні насоси для палив RMG450, DMA20 та паливних присадок відповідно; 10, 14, 15, 16 – дизелі;
 11 – витратомір; 12 – мікроконтролер; 13 – дозатор

Експлуатація дизелів виконувалась в такій спосіб. Під час знаходження судна поза екологічних районів експлуатація дизелів здійснювалась на паливі RMG450, яке знаходилося у витратному танку 1. Стан палива RMG450 (насамперед його густина, в'язкість та температура) дозволяв його подачу до паливної апаратури дизелів 10, 14, 15, 16. Це забезпечувалось паливним насосом 7 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 4. Кількість одночасно працюючих дизелів визначалась залежно від загального навантаження на судову електростанцію, при цьому у будь-яких випадках не перевищувало трьох.

Під час знаходження судна в особливих екологічних районах експлуатація дизелів здійснювалась на паливі DMA20, яке знаходилося у витратному танку 2. Вміст сірки в паливі не перевищував 0,1 %, що забезпечувало вимоги Annex VI MARPOL. Подача палива DMA20 до дизелів здійснювалась паливним насосом 8 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 5.

Крім вказаних варіантів, експлуатацію дизелів також можливо було виконувати з використанням паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus. Подача паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus до дизелів здійснювалась паливним насосом 9 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 6. Вміст паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus в складі палива змінювався відповідно до рекомендацій фірми-виробника. Дозування паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus забезпечувалось дозатором 13, якій

встановлювався на магістралі їх подачі до кожного з дизелів. Кількість паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus в суміші залежало від витрати палива RMG450 або DMA20, яке контролювалось витратоміром 11. Управління роботою дозатора 13 паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus забезпечувалось мікроконтролером 12. Використання суміші палива RMG450 або DMA20 та паливних присадок Amergy 1000, Amergize та Amergy XLS Plus було можливе для дизелів 14, 15, 16. При цьому в дизелі 14 використовувалась паливна суміш, яка складалась з палива нафтового походження (RMG450 або DMA20) та паливної присадки Amergy 1000; в дизелі 15 – паливна суміш з RMG450 або DMA20 та паливної присадки Amergize; в дизелі 16 – паливна суміш з палива RMG450 або DMA20 та паливної присадки Amergy XLS Plus. Саме на цих дизелях виконувались експериментальні дослідження з визначення ефективності використання біодизельного палива FAME. Дизель 10 експлуатувався виключно на паливі RMG450 або DMA20, без використання паливної суміші, до складу якої входили паливні присадки.

Основні параметри роботи паливної системи (тиск, витрата, температура, в'язкість палива) контролювалися та підтримувалися автоматично. Також автоматично підтримувалася частота обертання та навантаження допоміжних двигунів Wartsila 6L32 [39-41]. Крім того, автоматично підтримувався розподіл навантаження між кількома допоміжними двигунами (двома або трьома) у разі їхньої паралельної роботи. Дизелі були обладнані системою діагностики ProPower, яка забезпечувала контроль основних показників робочого процесу – тиску згоряння p_z , ефективної потужності N_e , питомої ефективної витрати палива b_e , температури випускних газів t_f . Система ProPower також здійснювала контроль та аналіз випускних газів дизелів, у тому числі визначення концентрації оксидів азоту NO_x [42, 43]. Система ProPower відноситься до сучасних систем діагностики робочого процесу суднових дизелів та використовується на великій кількості морських суден [44, 45].

Споживачами енергії суднових дизелів Wartsila 6L32 були машини та механізми суднових систем, а також рефрижераторні контейнери, які разом зі звичайними контейнерами транспортувались судном (саме через наявність рефрижераторних контейнерів допоміжна енергетична установка судна характеризувалась високою потужністю). Їх кількість для кожного з морських переходів була різною, але не змінювалась під час транспортування. Це забезпечувало різні між собою, але майже постійні на протязі одного морського переходу навантаження на судову електростанцію (та відповідно на судові дизелі Wartsila 6L32, які виконували функції допоміжних). При цьому експлуатаційні режими судової електростанції забезпечувались 50 %, 60 %, 70 % та 80 % навантаженням на судові дизелі, на яких виконувались дослідження.

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

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

$$b_e = B_{\text{год}} / N_e ;$$

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

N_e – експлуатаційна потужність дизеля, кВт.

Зміна значень питомої витрати палива для різних умов проведення експерименту наведена на рис. 3.

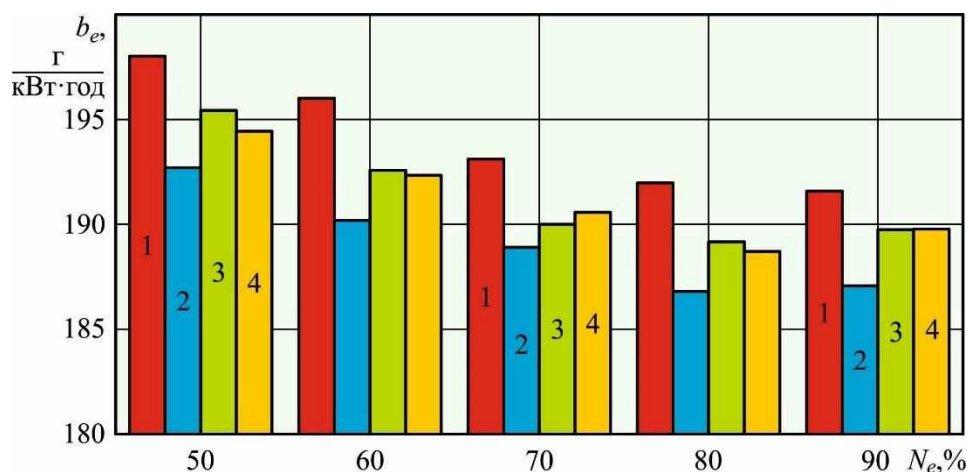


Рисунок 3 – Питома витрата палива на різних навантаженнях суднового середньобертового дизеля Wartsila 6L32F:

1 – робота дизеля без використання паливної присадки; 2, 3, 4 – робота з використанням паливних присадок Amergy XLS, Amergy 1000, Amergize відповідно

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

Метою другого етапу досліджень було визначення оптимальної концентрації паливної присадки Amergy XLS – експериментальне визначення такої її концентрації, яка призводить до мінімальної витрати палива дизелем Wartsila 6L32F. Під час цього етапу досліджень використовувалась лише паливна присадка Amergy XLS, при цьому її концентрація в загальному обсязі палива складала 1 / 2000, 1 / 3000, 1 / 4000, 1 / 5000, 1 / 6000. Результати досліджень наведені на рис. 4.

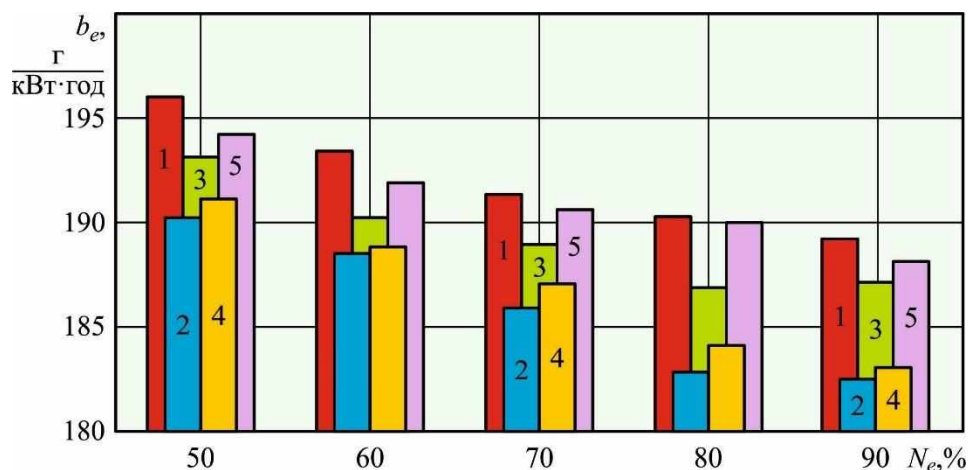


Рисунок 3 – Питома витрата палива на різних навантаженнях суднового дизеля Wartsila 6L32F для різної концентрації паливної присадки Amergy XLS:

1 – 1 / 2000, 2 – 1 / 3000,
3 – 1 / 4000, 4 – 1 / 5000, 5 – 1 / 6000

Висновки. Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки.

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

2. Використання присадок до палива призводить до підвищення паливної економічності суднового дизеля. Під час використання паливних присадок на різних режимах роботи суднового дизеля Wartsila 6L32 було досягнуто 1,8...4,7 % зниження питомої ефективної витрати палива.

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
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)). – Р. 33–42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.
4. 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)). – Р. 37–43. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.
5. 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.
6. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
7. 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.
8. Сагін 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.
9. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизация судовых технических средств: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
10. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності судових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
11. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.

12. 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.
13. 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>.
14. Сагін 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.
15. Сагін 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.
16. Поповский А.Ю., Сагін С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
17. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
18. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
19. 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.
20. Zablotsky Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”*. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
21. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
22. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”*. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
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/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
24. 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/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
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. Тимошук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.

27. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
28. 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: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
29. 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.
30. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.
31. 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.
32. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
33. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pířtšek V., Kuřcera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.
34. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17.
35. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
36. 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.
37. 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. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
38. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78-88.
39. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник, 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
40. 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.
41. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259.
42. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689
43. 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.

44. 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>.
45. 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, Vienna-2018.* – № 7-8 (July-August). – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.

REFERENCES

1. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport.* – 2022. – № 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // *Water transport.* – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
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. 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>.
5. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // *Water transport.* – 2023. – № 2(38). – C. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
6. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // *Water transport.* – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
7. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport.* – 2024. – №. 1(39). – P. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
8. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship facilities.* – 2019. – № 25. – P. 79-89.
9. Levynskiy M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Automation of ship technical facilities.* – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
10. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport.* – 2022. – № 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
11. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Evaluation of operational properties of lubricating and cooling liquids of marine technical equipment // *Automation of ship technical facilities.* – 2016. – Vol. 22. – P. 66-74.
12. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // *Ship power plants.* – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
13. Petrychenko O. Levynskiy 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>.
14. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // *Ship power plants.* – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.

15. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.
16. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // Automation of ship facilities. – 2014. – №20. – P. 74-83.
17. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
18. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // Ship power plants. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
19. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Ensuring operational performance of diesel engines of marine vessels when using fuel of biological origin // Water transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.
20. Zablotsky Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
21. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
22. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
23. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // Water transport. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 206-215. doi.org.10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
24. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Direction of the injection process during the use of fuel mixture that include fuel of biological origin in marine diesel engines Water transport. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
25. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // Water Transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
26. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // Water Transport. – 2020. – № 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
27. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel DSS. // Water transport. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
28. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
29. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
30. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
31. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Ship power plants. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
32. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022.– Vol. 69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

33. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
34. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
35. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
36. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // Ship power plants. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
37. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // Automation of ship facilities. – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
38. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // Problems of technical. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.
39. Kuropyatnyk O.O., Sagin S.V. Controlling the exhaust gases of marine diesel engines to ensure environmental performance // Automation of ship technical facilities. – 2018. – № 24. – P. 72-80.
40. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // Water transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.
41. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259.
42. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689
43. 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
44. 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>.
45. 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, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42

Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Sagin A.S.

INCREASING THE EFFICIENCY OF SHIP'S MEDIUM-SPEED DIESEL ENGINES

The results of research on determining the influence of fuel additives on the economic performance of marine diesel engines are presented. The experiments were performed on a Container ship class vessel of unlimited navigation area, capable of transporting 9850 TEU containers (up to 620 of which are refrigerated). The research was performed on four identical Wartsila 6L32 marine diesel engines, which were used as auxiliary diesel generators. The diesel engines were operated on distillate fuels DMA20 (with a sulfur content of 0.077% by mass) and RMG450 (with a sulfur content of 0.46% by mass). In the case of the vessel being in special ecological areas, the diesel engines were operated on DMA20 fuel, while the vessel was outside these areas - on RMG450 fuel. Drew Marine products were used as fuel additives: Amergy 1000, Amergize and Amergy XLS Plus. Three Wartsila 6L32 diesel engines were run on a fuel

mixture consisting of petroleum-based fuel (RMG450 or DMA20) and Amergy 1000 fuel additive, a fuel mixture of RMG450 or DMA20 and Amergize fuel additive, and a fuel mixture of RMG450 or DMA20 and Amergy XLS Plus fuel additive. These diesel engines were used for experimental studies to determine the efficiency of using FAME biodiesel. One of the diesel engines was operated exclusively on RMG450 or DMA20 fuel, without the use of a fuel additive. During the experimental studies, the Wartsila 6L32 diesel engines were operated at equal intervals on heavy fuel RMG450 or DMA20 with various fuel additives Amergy 1000, Amergize, and Amergy XLS Plus. At the same time, their operation was carried out at loads of 50%, 60%, 70%, 80% of the nominal power. The duration of the experiment at each of the loads was 1...3 hours and depended on the vessel's sailing conditions. The purpose of the first stage of the study was to determine from the specified additives the one that contributes to the best efficiency of the diesel engine - namely, provides the minimum specific fuel consumption. The fuel additive Amergy XLS was determined as such an additive. The task of the second stage was to determine the optimal concentration of the additive in the fuel. This made it possible to determine the concentration that provides the minimum specific fuel consumption, which contributes to increasing the efficiency of the operation of ship medium-speed diesel engines.

Keywords: *concentration, distillate fuel, efficiency of operation, fuel additive, maritime transport, ship diesel generator, ship medium-speed diesel, specific fuel consumption*

Сагін С.В., Куропятник О.А.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА НА ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Надані результати досліджень, щодо визначення впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів. Експерименти виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 58640 тонн під час експлуатації суднового дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group (якій виконував функції головного двигуна) та трьох суднових дизелів 6DL-16 Daihatsu Diesel (що використовувались як допоміжні двигуни). Дизелі експлуатувались на дистилятних паливах DMA (зі вмістом сірки 0,072 % за масою) та RMG380 (зі вмістом сірки 0,043 % за масою). У разі знаходження судна у спеціальних екологічних районах експлуатація дизелів виконувалася на паливі DMA, під час знаходження судна поза цих районів – на паливі RMG380. Під час проведення експериментів дизелі використовували дистилятне паливо RMG380, а також палива B10 та B30, які включають до свого складу дизельне паливо – 90 % або 70 %, а також біодизельне паливо FAME – 10 % або 30 %. Під час проведення експериментальних досліджень головний двигун 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group експлуатувався рівні проміжки часу на важкому паливі RMG380, а також на паливі B10 та B30 на навантаженнях 65 %, 75 %, 85 %, 95 % від номінальної потужності. Тривалість проведення експерименту на кожному з навантажень становила 1 ... 3 години і залежала від умов плавання судна. Допоміжні дизелі 6DL-16 Daihatsu Diesel експлуатувались рівні проміжки часу на важкому паливі RMG380, а також на паливі B10 та B30 на навантаженнях 50 %, 60 %, 70 %, 80 % від номінальної потужності. Тривалість проведення експерименту на кожному з навантажень становила 2...4 години та залежала від енергетичних потреб судна. Ефективність використання палив B10 та B30 оцінювалася за екологічним та економічним критеріями. Як екологічний критерій приймалася концентрація оксидів азоту у випускних газах дизелів. Як економічний критерій приймалась питома ефективна витрата палива. Експериментально підтверджено, що під час використання біодизельного палива B10 та B30 в порівнянні з паливом нафтового походження RMG380 досягається 24...25 % зниження концентрації оксидів азоту в випускних газах, при цьому відбувається 1,7...6,0 % підвищення питомої витрати палива.

Ключові слова: біодизельне паливо, випускні гази, дистилятне паливо, екологічні показники, економічні показники, концентрація оксидів азоту, морський транспорт, питома витрата палива, судновий дизель

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Головними та допоміжними двигунами на морських судах є двигуни внутрішнього згоряння / дизелі [1, 2]. Саме цей тип теплових двигунів має найвищий коефіцієнт корисної дії та найнижчу питому витрату палива [3, 4]. Дизелі – основний тип теплових двигунів, що забезпечує рух морських суден, а також функціонування їх систем та механізмів [5, 6]. Сучасні альтернативи судовим дизелям, якими є сонячні батареї, вітрогенератори, жорсткі вітрила та скайт вітрила, акумуляторні батареї, паливні елементи можуть забезпечити енергетичні потреби морських суден лише за певних умов та обмежений період часу.

Функціонування судових дизелів неможливе без використання рідкого палива нафтового походження, що є основним джерелом енергії всіх теплових двигунів. Відповідно до міжнародного стандарту на паливо DIS DP-8217, розробленого міжнародною організацією зі стандартизації ISO, у судових дизелях використовуються два сорти дистилятного палива – чисте дизельне паливо DMA, DMB та змішане паливо DMC, а також очищене паливо RM [7, 8]. Діапазон в'язкості палива класу DMA, DMB,

DMC за 50 °C лежить у межах 2...15 сСт, їх густина за 15 °C становить 880...920 кг/м³. У зв'язку з цим дані сорти палива називають легкими. Теплотворна здатність палив DMA, DMB, DMC знаходиться в межах 42000...44000 кДж/кг. Паливо класу RM (наприклад, RMA30, RME180, RMG380, RMK700) мають в'язкість 30...700 сСт (за температурою 50 °C), густину 960...1010 кг/м³ (за температурою 15 °C) та називаються важкими. Теплотворна здатність палив класу RM знаходиться в межах 39000...42000 кДж/кг. Важкі сорти палива мають нижчу вартість порівняно з легкими, що обумовлює використання цих сортів в суднових дизелях для скорочення фінансових витрат на їх придбання [9, 10]. Також слід зазначити, що у сучасних суднових дизелях (як головних, також і допоміжних) важкі сорти палив використовуються для забезпечення всіх режимів роботи, зокрема режимів пуску і реверсування [11, 12].

Основним негативним фактором, що пов'язаний з використанням палива нафтового походження, є його шкідливий вплив на довкілля. Перш за все це пов'язано з емісією оксидів вуглецю CO та CO₂, оксидів сірки SO_x, а також оксидів азоту NO_x. В зв'язку з цим екологічні показники роботи суднових дизелів регламентуються з боку міжнародних організацій та класифікаційних товариств.

Завдання охорони довкілля під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту виникло ще наприкінці 50-х років минулого століття та було відображено в Міжнародній конвенції 1954 р. з попередження забруднення моря нафтою (Oil Pollution – OILPOL), яка почала діяти з 1958 р. З часом виникли нові виклики, які зумовили розробку та прийняття в 1973 р. Міжнародної конвенції із запобігання забрудненню з суден та Протоколу до неї в 1978 р. (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78). Вимоги щодо запобігання забрудненню моря з суден відображено у шести Додатках, що викладають Правила відносно забруднення моря конкретними речовинами: нафтою; шкідливими хімічними речовинами, що перевозяться наливом; речовинами, що перевозяться в упакованій формі; стічними водами; сміттям та забруднення повітряного середовища з суден.

Одним із критеріїв використання нафтових палив у суднових енергетичних установках є вміст сірки [13, 14]. Відповідно до вимог Annex VI MARPOL вміст сірки в паливі в разі експлуатації дизелів у спеціальних екологічних районах Sulphur emission control areas (SECAs) не повинен перевищувати 0,1 % за масою; у разі експлуатації поза районами SECAs – вміст сірки у паливі не повинен перевищувати 0,5 % за масою. Використання палива із вмістом сірки понад 0,5 % за масою можливе лише у разі додаткового очищення випускних газів у спеціальних системах очищення (як правило – у скруберах) [15, 16].

До одного з компонентів випускних газів суднових дизелів, значення якого регламентується Annex VI MARPOL, відносяться оксиди азоту NO_x. Відповідно до вимог Annex VI MARPOL встановлено три рівні викидів оксидів азоту – Tier I, Tier II, Tier III, які встановлюють максимальний рівень емісії оксидів азоту залежно від року побудови судна та частоти обертання дизеля [17, 18]. Джерелами утворення NO_x є азот, що знаходиться в повітрі, та азот, що знаходиться в паливі. Під час згоряння паливоповітряної суміші, з азоту, що знаходиться в повітрі, утворюються термічні NO_x та швидкі NO_x; з азоту, що входить до складу палива, – паливні NO_x. За температур вище ніж 1500 °C відбувається ланцюгова реакція утворення оксидів азоту. Тому всі методи та технології, які забезпечують зменшення емісії NO_x, спрямовані на зниження максимальної температури в циліндрі дизеля [19, 20].

Вказане підкреслює актуальність проведення досліджень, спрямованих на забезпечення екологічних показників роботи суднових дизелів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним джерелом забруднення повітряного середовища є випускні гази теплових двигунів суднових енергетичних установок, насамперед дизелів – найбільш розповсюдженого та встановленого на всіх без винятку сучасних суднах двигуна. Зменшенню негативного впливу суднових дизелів (зокрема стосовно шкідливих викидів з випускними газами) присвячена велика кількість наукових робіт та технічних рішень. В більшості випадків вони спрямовані на зниження в випускних газах концентрації оксидів сірки SO_x та азоту NO_x. Як основні розв'язання цього завдання запропоновані десульфурізація палива [21, 22], скрубберне очищення випускних газів [23, 24], зволоження та охолодження повітря шляхом додавання прісної води в продувальний ресивер та циліндр дизеля [25, 26], використання водопаливних емульсій [27, 28], рециркуляція випускних газів (Exhaust Gas Recirculation, EGR), встановлення системи вибіркового каталітичного відновлення (SCR – Selective Catalytic Reduction) [29, 30].

Одним із варіантів зниження емісії SO_x та NO_x з випускними газами суднових дизелів є використання альтернативних палив, основними видами якого є скраплений природний газ, скраплений нафтовий газ, водень, аміак, рослинні олії, біопаливо – біодизель [31, 32]. При цьому, через меншу кількість або відсутність сірки в складі біодизеля, забезпечуються вимоги щодо вмісту сірки в паливі, через меншу температуру згоряння біодизеля – виконуються вимоги щодо викидів оксидів азоту.

Основними компонентами, які використовують під час виробництва біодизеля, є рослинні та тваринні жири, хімічний склад яких незначно відрізняється один від одного [33, 34]. В результаті етерифікації у присутності метанолу або етанолу, а також каталізатора ці речовини реагують з утворенням моноалкілових ефірів, саме цей продукт називають біодизель. Далі біодизельна фаза додатково очищається за допомогою дистиляції та мембранного поділу [35, 36]. Таким чином, біодизельне паливо (або FAME – Fatty Acid Methyl Ester, метилові ефіри жирних кислот) на відміну від дизельного палива на нафтовій основі, виробляється з відновлюваних органічних джерел. Основні експлуатаційні характеристики FAME (густина, в'язкість, температура спалаху, теплотворна здатність) збігаються з аналогічними показниками дизельного палива – це дозволяє використовувати його у більшості сучасних дизельних двигунів [37, 38]. Як правило, у чистому вигляді біодизельне паливо FAME не використовується. Найбільш доцільний варіант його використання – паливні суміші із паливом нафтового походження. У таких сумішах нафтове паливо є основним компонентом та його кількість становить 70 ... 95 % за масою. Біодизельне паливо використовується як добавка, його кількість становить 5 ... 30 % за масою. Такі палива класифікуються як B5, B10...B25, B30. Незважаючи на застосування різних видів біодизельного палива, загальні рекомендації щодо визначення його оптимальної концентрації у дизельному паливі не розроблено. Також не існує рекомендацій щодо досягнення економічної та екологічної ефективності використання суміші дизельного та біодизельного палива на різних режимах роботи дизеля [39-41].

Формулювання цілей статті. Біодизельне паливо використовується як у головних, також і у допоміжних двигунах різної потужності. Однак більшість наукових досліджень, спрямованих на вивчення можливості використання біодизельного палива, переважно присвячені автомобільному та залізничному транспорту. Крім того, не розроблено критеріїв, за якими можна провести оцінку ефективності використання біодизельного палива в дизелях морських суден. У зв'язку з цим метою дослідження було визначення впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження щодо вивчення впливу біодизельного на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 58640 тонн. Як головний двигун на судні використовувався судновий дизель 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group, як допоміжні – три судові дизелі 6DL-16 Daihatsu Diesel. Основні характеристики суднових дизелів наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики суднових дизелів

Характеристика	5S60ME-C8	6DL-16
Діаметр циліндра, м	0,6	0,165
Хід поршня, м	2,4	0,21
Тип	двотактний	чотиритактний
Кількість	1	3
Потужність, кВт	8200	530
Частота обертання, хв^{-1}	92	1200
Питома витрата палива, $\text{кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$	0,176	0,191

Дизелі 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group та 6DL-16 Daihatsu Diesel мали загальну паливну систему, схема якої показана на рис. 1.

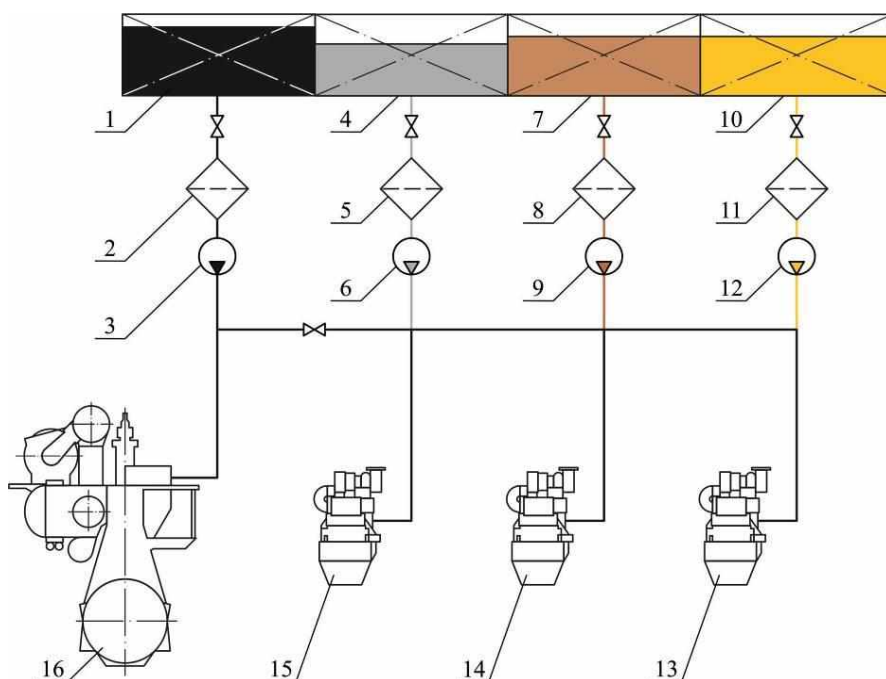


Рисунок 1 – Принципова паливна схема суднових дизелів 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group та 6DL-16 Daihatsu Diesel:

1 – важке паливо ($0,1 < S < 0,5 \%$); 2, 5, 8, 11 – паливний фільтр; 3, 6, 9, 12 – паливний насос; 4 – легке паливо ($S < 0,1 \%$); 7 – біодизельне паливо B10; 10 – біодизельне паливо B30; 13, 14, 15 – допоміжний двигун 6DL-16; 16 – головний двигун 5S60ME-C8

Подача палива до головного двигуна 16 та допоміжних двигунів 13, 14, 15 здійснювалася з паливних танків 1, 4, 7, 10 з використанням паливних фільтрів 2, 5, 8, 11 та паливних насосів 3, 6, 9, 12. Основні параметри роботи паливної системи (тиск, витрата, температура, в'язкість палива) контролювалися та підтримувалися автоматично. Також автоматично підтримувалася частота обертання та навантаження головного двигуна та допоміжних двигунів. Крім того, автоматично підтримувався розподіл навантаження між кількома допоміжними двигунами (двома або трьома) у разі їхньої паралельної роботи. Дизелі були обладнані системою діагностики ProPower, яка забезпечувала контроль основних показників робочого процесу – тиску згоряння p_z , ефективної потужності N_e , питомої ефективної витрати палива b_e , температури випускних газів t_f . Система ProPower також здійснювала контроль та аналіз випускних газів дизелів, у тому числі визначення концентрації оксидів азоту NO_x . Система ProPower відноситься до сучасних систем діагностики робочого процесу суднових дизелів та використовується на великій кількості морських суден. Експлуатація дизелів здійснювалася з використанням палив нафтового походження DMA та RMG380, а також біодизельних палив B10 та B30. Палива B10 та B30 включають до свого складу дизельне паливо – 90 % або 70 %, а також паливо FAME – 10 % або 30 %. Основні характеристики палив наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Основні характеристики палив

Характеристика	Вид палива			
	DMA	RMG380	B10	B30
Густина за 20°C , кг/м^3	894	942	891	889
В'язкість за 40°C , $\text{мм}^2/\text{с}$	6,4	376	6,26	6,12
Вміст сірки, %	0,072	0,43	0,065	0,058
Теплотворна здатність, кДж/кг	43680	40020	43686	43032

У разі знаходження судна у спеціальних екологічних районах SECAs експлуатація дизелів виконувалася на паливі DMA, під час знаходження судна поза SECAs – на паливі RMG380. Крім того, під час проведення експериментів дизелі використовували паливо B10 та B30. Під час проведення експерименту густина та в'язкість палива постійно контролювалися за допомогою суднової лабораторії фірми Unitor. Це забезпечувало однорідність палива та гарантувало коректність проведення експериментів.

Головний двигун 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group передавав свою потужність на гвинт фіксованого кроку за допомогою прямої передачі. Залежно від навігаційних умов та комерційного завдання на рейс, експлуатаційні режими роботи дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group становили 65...95 % від номінального навантаження. Під час пускових та маневрових режимів роботи дизель експлуатувався на навантаженнях 10...50 % від номінального. Допоміжні двигуни 6DL-16 Daihatsu Diesel були приводом електричних генераторів та входили до складу суднової електростанції. Їхньої потужності вистачало для забезпечення всіх операцій на судні на всіх експлуатаційних режимах (аварійному, швартовому, вантажному, нормальному). При цьому в експлуатації знаходився або один із трьох двигунів, або два двигуни – в цьому випадку вони працювали в паралельному режимі. Залежно від потреб в електричній енергії, експлуатаційні режими роботи дизелів 6DL-16 Daihatsu Diesel становили 50...80 % від номінального навантаження.

Під час проведення експериментальних досліджень головний двигун 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group експлуатувався рівні проміжки часу на важкому паливі RMG380, а також на паливі B10 та B30 на навантаженнях 65 %, 75 %, 85 %, 95 % від номінальної потужності. Тривалість проведення експерименту на кожному з навантажень становила 1...3 години і залежала від умов плавання судна. Допоміжні дизелі 6DL-16 Daihatsu Diesel експлуатувалися рівні проміжки часу на важкому паливі RMG380, а також на паливі B10 та B30 на навантаженнях 50 %, 60 %, 70 %, 80 % від номінальної потужності. Тривалість проведення експерименту на кожному з навантажень становила 2...4 години та залежала від енергетичних потреб судна.

Ефективність використання біопалив B10 та B30 оцінювалася за екологічним та економічним критеріями. Як екологічний критерій приймалася концентрація оксидів азоту у випускних газах дизелів – NO_x , г/(кВт·год). Саме цей показник в більшості наукових досліджень визначається як основний під час оцінки екологічності роботи морських суден. Як економічний критерій приймалась питома ефективна витрата палива – b_e , г/(кВт·год), яка впливає на загальну витрату палива (добову або відносно пройденого шляху). Отримані результати наведені у таблицях 3-6.

Таблиця 3 – Концентрація оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), в випускних газах суднового дизеля 5S60ME-C8 за різних умов проведення експерименту

Навантаження, %	Вид палива		
	B10	B30	RMG380
50	5,74	5,23	6,73
60	5,92	5,42	7,11
70	6,02	5,64	7,48
80	6,16	5,87	7,84

Таблиця 4 – Питома ефективна витрата палива b_e , г/(кВт·год), суднового дизеля 5S60ME-C8 за різних умов проведення експерименту

Навантаження, %	Вид палива		
	B10	B30	RMG380
65	191	194	183
75	186	190	180
85	182	185	177
95	179	181	176

Таблиця 5 – Концентрація оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), в випускних газах суднового дизеля 6DL-16 за різних умов проведення експерименту

Навантаження, %	Вид палива		
	B10	B30	RMG380
65	9,21	8,81	10,58
75	9,92	9,32	11,64
85	10,32	9,88	12,65
95	10,75	10,25	13,42

Таблиця 6 – Питома ефективна витрата палива b_e , г/(кВт·год), суднового дизеля 6DL-16 за різних умов проведення експерименту

Навантаження, %	Вид палива		
	B10	B30	RMG380
50	204	209	199
60	199	202	195
70	196	198	193
80	194	197	191

Для кращої візуалізації, залежності концентрації оксидів азоту у випускних газах NO_x , а також питомої ефективної витрати палива b_e для різних навантажень судових дизелів під час використання важкого палива RMG380, а також біопалив B10 та B30 показані на рис. 2, 3.

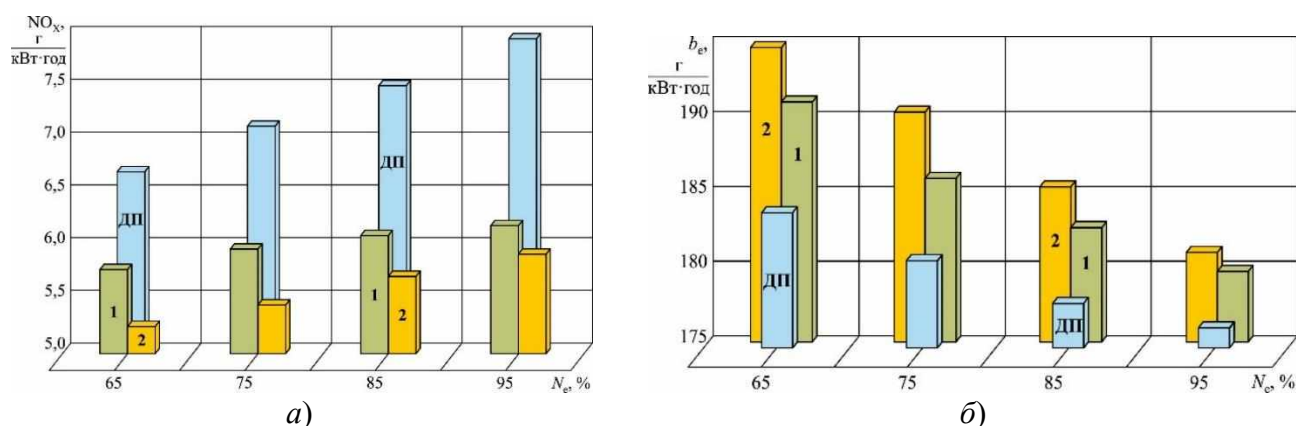


Рисунок 2 – Залежність концентрації оксидів азоту в випускних газах (а), та питомої ефективної витрати палива (б) суднового дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group за різних умов проведення експерименту: ДП – дизельне паливо; 1 – біопаливо B10; 2 – біопаливо B30

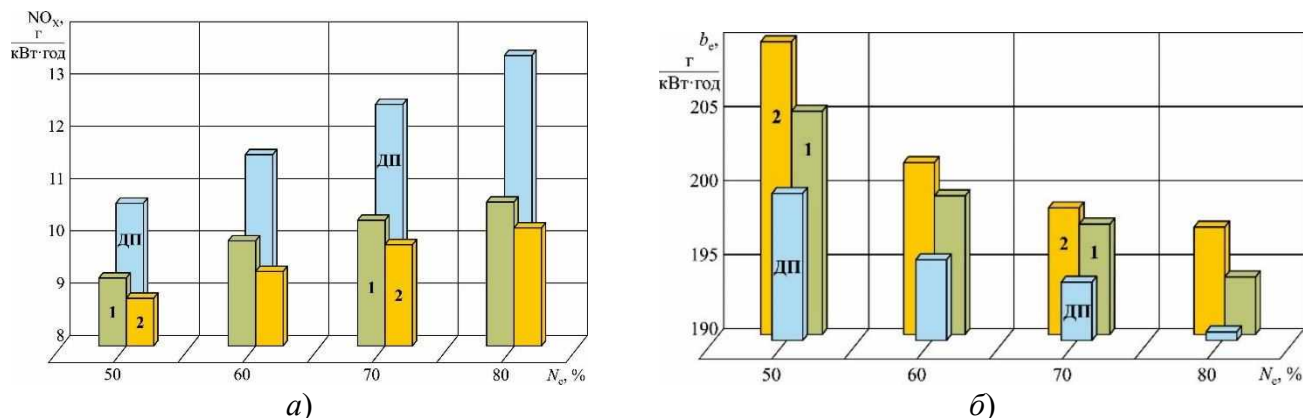


Рисунок 3 – Залежність концентрації оксидів азоту в випускних газах (а), та питомої ефективної витрати палива (б) суднового дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel за різних умов проведення експерименту: ДП – дизельне паливо; 1 – біопаливо B10; 2 – біопаливо B30

Використання біопалива сприяє зниженню концентрації оксидів азоту у випускних газах як для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group, також і для дизелів 6DL-16 Daihatsu Diesel. Однак, при цьому збільшується питома ефективна витрата палива. Відносна зміна цих параметрів оцінювалася за виразами:

відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^{ДП} - NO_x^{Біо}}{NO_x^{ДП}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

відносне збільшення питомої ефективної витрати палива

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{Біо} - b_e^{ДП}}{b_e^{ДП}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

де $NO_x^{ДП}$, $NO_x^{Біо}$ – концентрація оксидів азоту у випускних газах під час використання дизельного та біодизельного палива (B10 або B30);

$b_e^{ДП}$, $b_e^{Біо}$ – питома ефективна витрата палива під час використання дизельного палива та біопалива (B10 або B30).

Отримані в такий спосіб значення наведено у таблицях 7-10.

Таблиця 7 – Відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах суднового дизеля 5S60ME-C8 за різних умов проведення експерименту

Навантаження, %	Вид палива	
	B10	B30
65	12,95	16,73
75	14,78	19,93
85	18,42	21,90
95	19,90	23,62

Таблиця 8 – Відносне збільшення питомої ефективної витрати палива суднового дизеля 5S60ME-C8 за різних навантажень

Навантаження, %	Вид палива	
	B10	B30
65	4,37	6,01
75	3,33	5,56
85	2,82	4,52
95	1,70	2,84

Таблиця 9 – Відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах суднового дизеля 6DL-16 за різних навантажень

Навантаження, %	Вид палива	
	B10	B30
50	14,71	22,29
60	16,74	23,77
70	19,52	24,60
80	21,43	25,13

Таблиця 10 – Відносне збільшення питомої ефективної витрати палива суднового дизеля 6DL-16 за різних навантажень

Навантаження, %	Вид палива	
	B10	B30
50	2,51	5,03
60	2,05	3,59
70	1,55	2,59
80	1,57	3,14

Для кращої візуалізації розрахункові значення відносного зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах та відносного збільшення питомої витрати палива, які наведені в табл. 7-10, представлені у вигляді діаграм (рис. 4, 5).

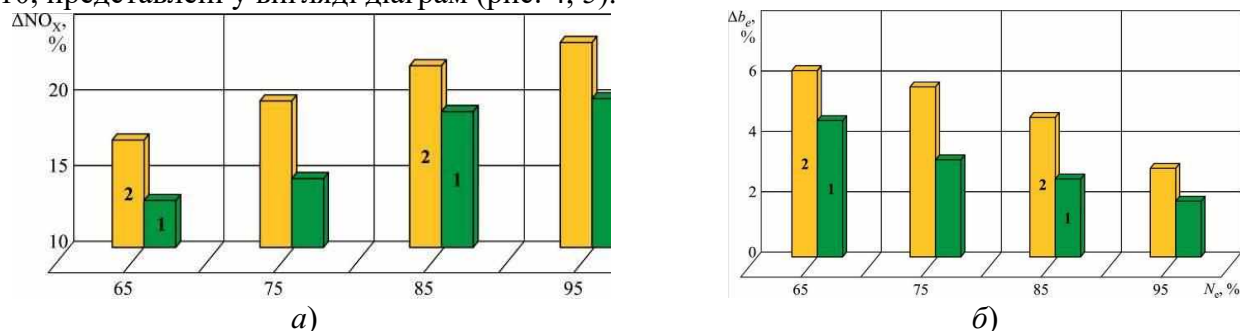


Рисунок 4 – Відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах (а), відносне збільшення питомої ефективної витрати палива (б) дизеля

5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group за різних умов проведення експерименту:

1 – біопаливо B10; 2 – біопаливо B30

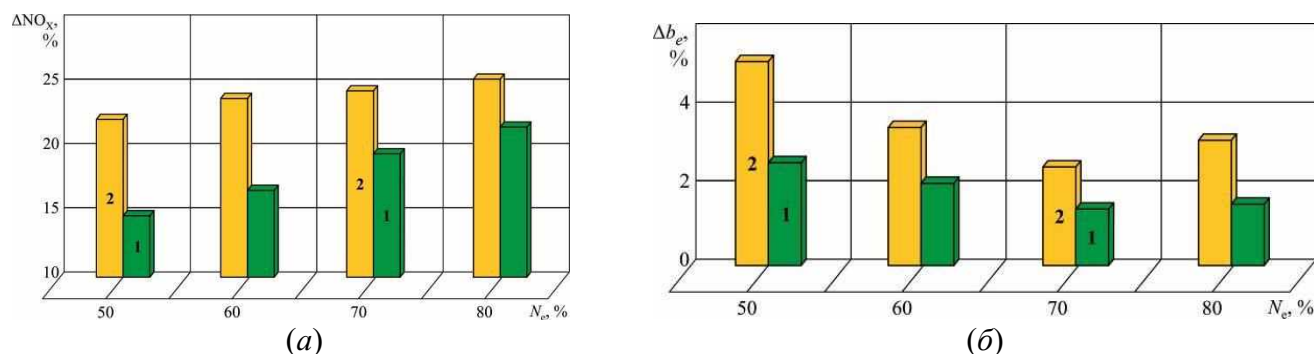


Рисунок 5 – Відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах (а) та відносне збільшення питомої ефективної витрати палива дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel за різних умов проведення експерименту: 1 – біопаливо B10; 2 – біопаливо B30

Наведені результати свідчать, що біопаливо B10 так і біопаливо B30 сприяють поліпшенню екологічності роботи дизеля (а саме забезпечують зниження емісії оксидів азоту NO_x). Водночас при цьому погіршується економічність роботи дизель (збільшується питома ефективна витрата палива).

Під час проведення досліджень контролювались та підтримувались у необхідному діапазоні всі основні параметри роботи головного та допоміжних дизелів, а також параметри у системах, що забезпечують їхнє функціонування. До них були віднесені: тиск у циліндрі наприкінці стиснення, тиск в циліндрі наприкінці згоряння, температура випускних газів на виході з циліндрів, середній індикаторний тиск в циліндрі, а також відхилення цих показників від середнього значення по всіх циліндрах; частота обертання валу дизеля; фази газорозподілу (кути відкриття та закриття продувних вікон, а також продувних та випускних клапанів); тиск і температура охолоджувальної

води та циркуляційного мастила на вході та виході з дизелів; температура та в'язкість палива, а також технічний стан паливної апаратури високого тиску.

Висновки. Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки.

Одним із способів забезпечення екологічної ефективності та розширення діапазону екологічної стійкості дизелів морських суден є використання біопалива. До одного з найпоширеніших типів біопалива належить біодизельне паливо FAME – Fatty Acid Methyl Ester. У судових дизелях використовуються паливні суміші, основну частину яких (70...90 %) становлять дистилятні сорти палива, як добавка (10...30 %) використовуються палива класу FAME. Як подібні суміші під час проведення досліджень використовувалися біопалива B10 і B30.

Експерименти, які були виконані на судових дизелях 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6DL-16 Daihatsu Diesel визначили таке:

1) біопалива B10 (яке містить 90 % дистилятного палива та 10 % біодизельного палива FAME) та B30 (яке містить 70 % дистилятного палива та 30 % біодизельного палива FAME) у порівнянні з важким паливом RMG380 забезпечують зниження концентрації оксидів азоту в діапазоні:

для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo на 12,95...19,90 % (біопаливо B10) та на 16,73...23,62 % (біопаливо B30);

для дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel на 14,71...21,43 % (біопаливо B10) та на 22,29...25,13 % (біопаливо B30);

2) одночасно з цим під час використання біопалива збільшується питома ефективна витрата палива:

для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo на 1,70...4,37 % (біопаливо B10) та на 2,84...6,01 % (біопаливо B30);

для дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel на 1,55...2,51 % (біопаливо B10) та на 2,59...5,03 % (біопаливо B30);

3) підвищення питомої ефективної витрати на окремих режимах роботи дизелів є негативним фактором і може бути причиною обмеження використання біопалива;

4) підвищення екологічності роботи судових дизелів у разі використання біопалива є найбільш позитивним критерієм та сприяє інтенсивності використання біопалива в енергетичних установках морських суден. Це підвищує екологічну безпеку роботи дизелів у разі виникнення аварійних ситуацій, а також випадкових та короточасних викидів в атмосферу випускних газів із підвищеним вмістом оксидів азоту – явищах, які можливі на пускових режимах роботи дизеля, а також на режимах стрибкоподібної зміни навантаження.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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
2. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності судових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
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. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.

5. 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>.
6. Тимошук О.М., Даки О.А., Бойко О.А., Карадобрий Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.
7. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
8. 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.
9. 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.
10. Сагін 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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>.
14. Сагін 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.
15. Поповский А.Ю., Сагін С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник*. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.
16. 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>.
17. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
18. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // *Проблемы техники : науч.-виробн. журнал*. – 2012. – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.
19. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // *Проблемы техники: науч.-виробн. журнал*. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.
20. 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.
21. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

22. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник, 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
23. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
24. 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.
25. Зверьков Д.О., Сагин С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
26. Мадей В.В., Сагин 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.
27. Сагин А.С., Сагин 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.
28. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
29. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
30. Сагин 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. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
31. 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>.
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 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
33. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689
34. 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
35. Zablotsky Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
36. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259.

37. 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*, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42
38. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // *Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал*. – 2011. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 78-88.
39. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
40. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”*. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
41. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.

REFERENCES

1. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Automation of ship technical facilities*. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
2. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – № 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
3. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // *Water Transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
4. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport*. – 2022. – № 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
5. 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.
6. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // *Water Transport*. – 2020. – № 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
7. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
8. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // *Water transport*. – 2023. – № 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
9. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
10. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship facilities*. – 2019. – № 25. – P. 79-89.
11. Poberezhnyi R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.

12. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
13. 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>.
14. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // *Ship power plants*. – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.
15. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Evaluation of operational properties of lubricating and cooling liquids of marine technical equipment // *Automation of ship technical facilities*. – 2016. – Vol. 22. – P. 66-74.
16. 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>.
17. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
18. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.
19. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
20. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
21. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotsky Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol. 69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
22. Kuropyatnyk O.O., Sagin S.V. Controlling the exhaust gases of marine diesel engines to ensure environmental performance // *Automation of ship technical facilities*. – 2018. – № 24. – P. 72-80.
23. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
24. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
25. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
26. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Ensuring operational performance of diesel engines of marine vessels when using fuel of biological origin // *Water transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.
27. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.
28. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
29. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
30. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // *Automation of ship facilities*. – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

31. 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>.
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 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
33. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF.2020.24.53689
34. 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
35. Zablotsky Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
36. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259.
37. 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, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42
38. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // Problems of technical. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.
39. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
40. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
41. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel DSS. // Water transport. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.

Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF BIODIESEL FUEL ON THE ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC PERFORMANCE OF MARINE DIESEL ENGINES

The results of research on determining the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines are provided. The experiments were carried out on a Bulk Carrier class ship with a deadweight of 58,640 tons during the operation of a MAN-B&W Diesel Group 5S60ME-C8 marine diesel engine (which served as the main engine) and three 6DL-16 Daihatsu Diesel marine diesel engines (which were used as auxiliary engines). Diesels were operated on distillate fuels DMA (with a sulfur content of 0.072 % by mass) and RMG380 (with a sulfur content of 0.043 % by mass). When the vessel was located in special ecological areas, diesel engines were operated on DMA fuel, while the vessel was outside these areas – on RMG380 fuel. During the experiments, diesel engines used RMG380 distillate fuel, as well as B10 and B30 fuels, which include diesel fuel – 90 % or 70 %, as well as FAME biodiesel fuel – 10 % or 30 %. During experimental studies, the main engine 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group was operated at equal intervals on heavy fuel RMG380, as well as on B10 and B30 fuel at loads of 65 %, 100 % and 75 %.

75 %, 85 %, 95 % of the rated power. The duration of the experiment on each of the loads was 1 to 3 hours and depended on the vessel's sailing conditions. Auxiliary diesels 6DL-16 Daihatsu Diesel were operated at equal intervals on heavy fuel RMG380, as well as on B10 and B30 fuel at loads of 50 %, 60 %, 70 %, 80 % of the rated power. The duration of the experiment on each of the loads was 2 to 4 hours and depended on the energy needs of the ship. The efficiency of using B10 and B30 fuels was evaluated according to ecological and economic criteria. The concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases of diesel engines was taken as an environmental criterion. The specific effective fuel consumption was taken as an economic criterion. It has been experimentally confirmed that when using biodiesel B10 and B30, compared to petroleum-derived fuel RMG380, a 24...25 % decrease in the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases is achieved, while there is a 1.7...6.0 % increase in specific fuel consumption.

Keywords: *biodiesel fuel, concentration of nitrogen oxides, distillate fuel, economic indicators, environmental indicators, exhaust gases, marine diesel, sea transport specific fuel consumption.*

Захарченко Л.Л., Остапчук Т.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ СУДОВИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Актуальність теми дослідження. Комплексні процеси збору, обробки, збереження і передачі інформації (інформатизація) в останні десятиліття в усім світі усе активніше впроваджуються в практичну діяльність організацій, що функціонують у різних галузях техніки, у тому числі в сфері суднобудування.

Суднобудування відноситься до традиційно консервативних галузей техніки, але і тут у зв'язку з високими темпами розвитку електронних систем контролю і моніторингу суднові двигуни та інші об'єкти судових енергетичних установок (СЕУ) світових виробників дійсний час оснащуються такими приладами та системами контролю й моніторингу (датчиками, сенсорами, інтелектуальними контролерами і т.п.), про які ще вчора можна було тільки мріяти.

Природно, що наступним кроком технічного прогресу в суднобудуванні буде створення інтелектуальних інформаційних систем, що дозволило знизити експлуатаційні витрати та компенсувати вплив людського фактору на експлуатацію складного судового обладнання. За допомогою інтелектуальних інформаційних систем будуть вирішені питання контролю технічного стану елементів СЕУ, вибір режимів оптимального управління, попередження та усунення аварійних ситуацій.

Отже, можна констатувати той факт, що дослідження у сфері інтелектуалізації управління СЕУ є перспективними та **актуальними**.

Метою роботи є підвищення економічності та екологічності судової енергетичної установки за рахунок впровадження методів інтелектуального управління нею.

У розробку окремих питань та завдань, які розглядаються у дослідженні значний внесок зробили наступні вчені: Сагін С.В., Занько О.Н., Солодовников В. Г., Кочанов Э. С. Липантьев Р. Е. Соловьёв А. В. [1-6].

Виклад основного матеріалу. Сучасні системи керування суднами, що ґрунтуються на кібернетиці, інформатиці та штучному інтелекті, відкривають нові можливості для створення як схемних, так і алгоритмічних рішень в управлінні групами об'єктів.

Дослідження в області інтелектуальних систем управління можливі лише завдяки поєднанню сучасної теорії управління та штучного інтелекту. Інформаційна система – це сукупність взаємопов'язаних елементів, що включають комп'ютери, програмне забезпечення, операторів, фізичні процеси, засоби зв'язку тощо, утворюючи єдину систему, здатну обробляти та передавати дані. Тоді інформаційна технологія це процес виконання чітко визначених операцій різної складності з даними, що зберігаються в комп'ютерах. У свою чергу, автоматизована інформаційна технологія тісно зв'язана з інформаційною системою, що є для неї основним середовищем.

Донедавна постановка і рішення задач управління спиралися на більш-менш традиційні математичні моделі, як правило, у формі диференціальних рівнянь щодо координат стану керованого процесу. Прикладом може послужити система диференціальних рівнянь, запропонована для моделювання процесів пуску і гальмування судового дизеля стисненим повітрям (головний двигун (ГД) з прямою передачею ОМ на гвинт):

$$\begin{aligned}
 I \frac{d\omega_m}{dt} &= M_d - M_B - M_T; \\
 \frac{d\varphi}{dt} &= \omega_m; \\
 G_{c_v} \frac{dT}{dt} &= \alpha_T F_S (T_\omega - T) + (i_n - u_n) \frac{dG_n}{dt} - \frac{\pi \omega_m S D^2}{8} p \bar{\omega}; \\
 \frac{dG_n}{dt} &= \mu_n f_n \frac{p_1}{\sqrt{R_B \sqrt{T_1}}} \sqrt{r-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{r}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{r+1}{r}} \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

де: M_D – рушійний момент двигуна (він же гальмовий);

M_B – момент опору гвинта; M_T – момент від сил тертя в механізмі двигуна, опорах валопроводу і механічних гальмах;

I - приведений до осі валу момент інерції обертових мас з урахуванням приєднаної маси води;

ω_m - кутова швидкість колінчатого валу двигуна;

φ - кут повороту колінчатого валу двигуна;

T - поточне значення температури повітря;

G_p - поточне значення кількості повітря, що перетікає через пусковий клапан;

S, D, p, φ - параметри рівнянь, що характеризують хід поршня, діаметр циліндра, що тече значення тиску повітря в циліндрі, безрозмірну швидкість поршня тощо.

Використання цієї моделі (і подібних їй) дає результати, які не можна вважати достовірними з ряду причин. Наприклад, у правій частині рівнянь динаміки не враховані постійно діючі збурення; вірогідність чисельних значень коефіцієнтів моделі досить низька. Підвищити надійність моделі можна після набору статистичної інформації про розбіжність даних реального процесу ω_r і результатів моделювання ω_m . Необхідність використання високоточної моделі може відпасти, якщо проєктувати алгоритми управління, які використовують не математичну модель для вироблення керуючого сигналу, а інформацію про «історії» протікання процесу, тобто, якщо в алгоритмі закладаються деякі елементи інтелекту. Розробка таких алгоритмів стала можлива завдяки впровадженню обчислювальної техніки в системи управління. Для налагодження алгоритмів зі складною логікою можна використовувати і «загрублену» модель.

Алгоритми управління з використанням деяких елементів інтелекту становлять інтерес для управління всім автоматизованим судновим комплексом.

У магістерському дослідженні пропонується розробляти управління елементами СЕУ на основі концепції єдиного цифрового рішення, що є невід'ємною частиною або навіть основою єдиної системи управління СЕУ (рис. 1). Представлена система управління є модульною. При модульній побудові весь комплекс підрозділяється на ряд самостійних підсистем, що вирішують визначені підзадачі з вхідних у головну задачу системи, наприклад, цілеорієнтоване управління СЕУ. Таким чином, модульні системи складаються з блоків - модулів (рис. 2), кожен з яких може функціонувати як самостійно, так і в рамках усієї системи, отримуючи команди з підсистем більш високого рівня.

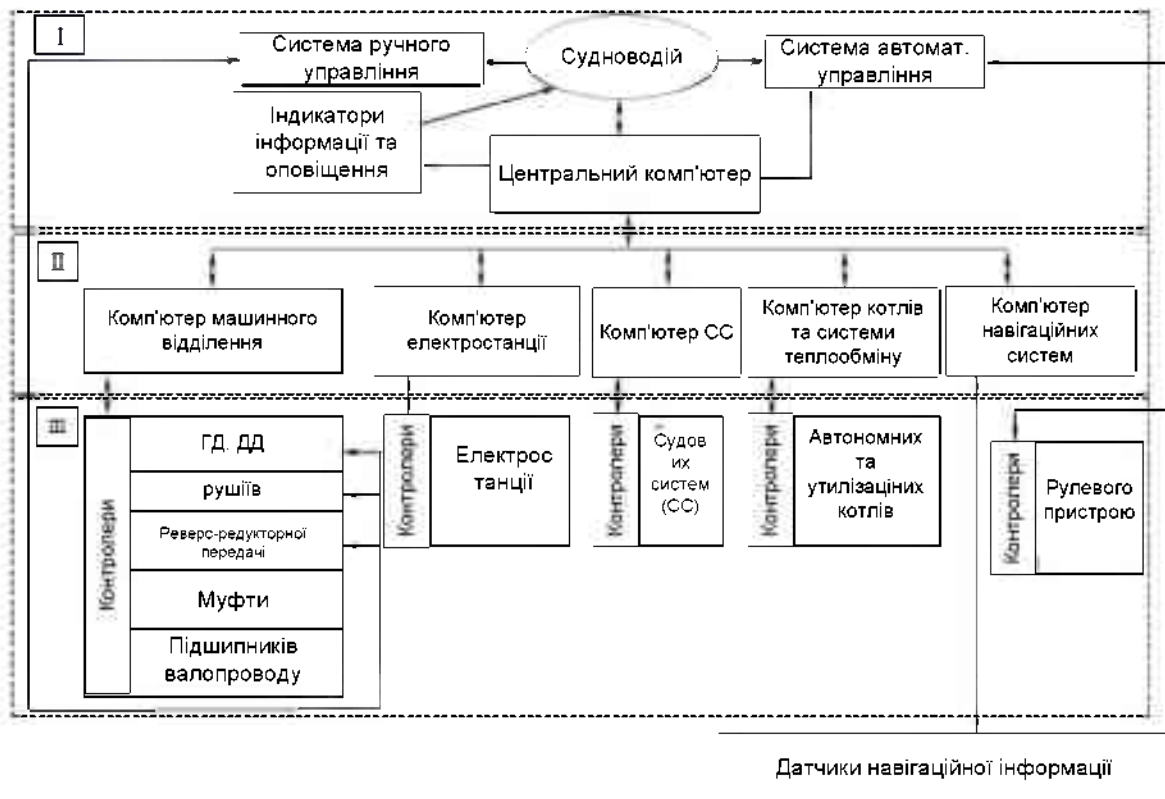


Рисунок 1 - Блок-схема концепції єдиного цифрового рішення системи управління

У представленій на рис. 2 блок-схемі система управління розділена на три різних ієрархічних рівня.



Рисунок 2 – Блок-схема модуля III рівня

Центральний комп'ютер управління (ЦКУ) I-го (вищого) рівня пов'язаний з комп'ютерами II-го рівня. Періодично ЦКУ здійснює зв'язок з комп'ютерами II-го рівня: здійснює збір, обробку інформації про об'єкти управління, передачу команд управління, збереження та відображення інформації про задані змінні, відображає на екрані монітора хід процесу управління у зручному для судноводія вигляді.

Комп'ютери II-рівня формують запити до контролерів III-го рівня, отримують від них оперативну інформацію про хід управління конкретним об'єктом, здійснюють збереження інформації, роблять корекцію необхідних параметрів алгоритмів управління та уставок регуляторів у контролерах III-го рівня, здійснюють передачу і прийом інформації від комп'ютера I-рівня.

Контролери III-го рівня виконують:

- збір сигналів від датчиків, установлених на об'єктах управління;
- попередню обробку сигналів (фільтрацію і масштабування);
- реалізацію алгоритмів управління і формування керуючих сигналів на виконавчі механізми об'єктів управління;
- передачу і прийом інформації від комп'ютерів II-рівня.

Зв'язок між комп'ютерами різного рівня здійснюється звичайно по однопроводній (іноді двохпроводній - у випадку реалізації інтерфейсу токової петлі) лінії дискретним послідовним кодом. Для здійснення цього зв'язку комп'ютери повинні мати послідовні порти типу СОМ-порт або USB-порт.

Контролери III-го рівня здійснюють зв'язок із зовнішнім середовищем: з датчиками об'єкта, виконавчими пристроями, сигналізацією. Зв'язок здійснюється через порти: дискретні (послідовний, рівнобіжний) або аналогові. У представленій концепції єдиного цифрового рішення системи управління всі обміни інформацією між комп'ютерами, між контролерами та датчиками або виконавчими пристроями здійснюється за командами програми. Програмне забезпечення роботи всього автоматизованого комплексу досить складне і є основним для надійного функціонування системи.

Програми III-го рівня керують безпосередньо конкретним об'єктом і задовольняють виставленим жорстким вимогам. Програми II-рівня повинні передавати накази на об'єкти управління, зберігати інформацію і передавати її на верхній рівень за вимогою. Програма I-рівня видає накази і може вимагати інформацію за конкретний момент часу.

Далі розглянемо сценарії інтелектуального управління судовою енергетичною установкою. Реалізація сценаріїв управління можлива при використанні концепції єдиного цифрового рішення системи управління. Для виконання одного з восьми представлених далі сценаріїв ЄЦСУ СЕУ комп'ютер I-го рівня при відповідному намірі судноводія видає команди на комп'ютери II-го рівня про переклад об'єктів СЕУ у відповідному сценарію режиму роботи відповідно до прийнятого протоколу управління. Комп'ютери II-го рівня передають необхідні настройки управління на контролери об'єктів СЕУ.

Сценарій 1. Об'єкти СЕУ з моменту проходження сигналу про відповідну дію (намірі) судноводія переключаються на забезпечення максимальної потужності головних двигунів. Необхідність такого режиму роботи СЕУ виникає вкрай рідко і може знадобитися при виведенні судна на безпечне плесо під погрозою зіткнення з іншими судами або плавучими об'єктами, навмисному викиданні судна на міліну, знятті з мілини і т.п. ГД при цьому виходять на режим 100 % або 110 % номінальної потужності, запускається резервний дизель-генератор для забезпечення роботи пристроїв, які підрулюють, лопаті рушіїв повертаються в положення максимального упора, утилізатори теплоти ВГ відключаються, насоси систем охолодження і змазування переводяться в режим максимальної подачі. Загальносуднові системи функціонують у режимі ручного управління. Система аварійно-попереджувальної сигналізації (АПС) функціонує в штатному режимі.

Система визначення технічного стану об'єктів СЕУ функціонує в режимі генерування попереджувальних світлових і звукових сигналів про неприпустиме перевантаження відповідальних об'єктів СЕУ.

Сценарій 2. Об'єкти СЕУ з моменту проходження сигналу про відповідну дію (намірі) судноводія переключаються на режим забезпечення номінальної потужності СЕУ. Необхідність такого режиму роботи СЕУ виникає при невідповідності графіка руху судна часовим орієнтирам, що задається розкладом. Головні двигуни (двигун) при цьому виходять на режим 100 % номінальної потужності, резервний дизель-генератор для забезпечення роботи пристроїв, які підрулюють, не

запускається, оскільки робота даних пристроїв не потрібна; рушії, насоси систем охолодження і змащування працюють у штатному режимі; електроенергетична установка, комплексна система утилізації теплоти працюють відповідно до алгоритму управління, що забезпечує поточні потреби судна в електроенергії і теплових потоках відповідно. Загальносуднові системи функціонують у режимі ручного управління. Система АПС функціонує в штатному режимі. Система визначення технічного стану об'єктів СЕУ відповідно до протоколу (прийнятою схемою опитування датчиків і збереження даних) заносить у базу діагностичних параметрів значення параметрів, на основі використання яких (шкалування, угруповання, зіставлення з нормами) комп'ютерна модель діагностування робить висновок про придатний або непридатний стан об'єктів СЕУ.

Сценарій 3. Об'єкти СЕУ з моменту проходження сигналу про відповідну дію (намірі) судноводія переключаються на режим забезпечення максимальної економічності СЕУ. Такий режим може бути призначений судноводієм, якщо мається запас ходового часу в порівнянні з графіком руху, який задається розкладом. Система управління функціонує в режимі забезпечення максимально можливого ступеня енергозбереження, у залежності від шляхових, гідрометеорологічних умов, потреби судна в електричній енергії, гарячому водопостачанні, опаленні, кондиціонуванні повітря. Режим роботи головних двигунів, електроенергетичної установки, комплексної системи утилізації теплоти, автономного котла встановлюється системою управління за результатами аналізу складового критерію енергозбереження. Загальносуднові системи функціонують у режимі ручного управління. Система визначення технічного стану об'єктів СЕУ функціонує в "сплячому" режимі. Система АПС функціонує в штатному режимі.

Сценарій 4. Об'єкти СЕУ з моменту проходження сигналу про відповідну дію (намірі) судноводія переключаються на режим забезпечення мінімальної або регламентованої швидкості руху. Такий режим може бути призначений судноводієм при проходженні судном працюючих і непрацюючих судів технічного флоту, пришвартованих до берегових причальних споруджень судів у вузькостях, при русі судна в каналах і т.д. Системи двигунів, загальносуднові системи, система АПС працюють у штатному режимі, електроенергетична установка, комплексна система утилізації теплоти працюють відповідно до алгоритму управління, що забезпечує поточні потреби судна в електроенергії і теплових потоках відповідно. Система визначення технічного стану об'єктів СЕУ функціонує в "сплячому" режимі.

Сценарій 5. Об'єкти СЕУ з моменту проходження сигналу про відповідну дію (намірі) судноводія переключаються на режим забезпечення максимальної екологічної безпеки СЕУ. Такий режим може бути призначений судноводієм при проходженні судном природоохоронних зон, гідровузлів, міст і великих сільських поселень. Система управління функціонує в режимі забезпечення максимально можливого ступеня природозбереження в залежності від шляхових, гідрометеорологічних умов і обмежень, що накладаються місцевими правилами плавання. Режим роботи об'єктів СЕУ і природоохоронного устаткування встановлюється системою управління за результатами аналізу складового критерію екологічної безпеки, при цьому накладаються обмеження, наприклад, на роботу інсинератора, на частоту зміни режимів роботи двигунів, що характеризуються підвищеною димністю. Загальносуднові системи функціонують у режимі ручного управління. Система визначення технічного стану об'єктів СЕУ відключається. Система АПС функціонує в штатному режимі.

Сценарій 6. Об'єкти СЕУ з моменту проходження сигналу про відповідну дію (намірі) судноводія переключаються на режим забезпечення максимальної довговічності елементів СЕУ. Цей режим багато в чому близький до режиму, що відповідає сценарію 3, але відрізняється від нього переходом на зазначені в технічній документації "роботи головних двигунів, які заощаджують" режими, дизель-генераторів, насосів, сепараторів, компресорів та інших об'єктів СЕУ, максимальна довговічність яких відіграє важливу роль у забезпеченні економічних показників експлуатації судна. Такий режим може бути призначений судноводієм, якщо мається запас ходового часу в порівнянні з графіком руху, що задається розкладом. При цьому з обліком шляхових і гідрометеорологічних умов і найбільш сприятливої з позицій довговічності навантаження двигунів вибирається число працюючих головних двигунів і дизель-генераторів, встановлюється режим їх терморегулювання і змащування. Електроенергетична установка, комплексна система утилізації

теплоти працюють відповідно до алгоритму управління, що забезпечує поточні потреби судна в електроенергії і теплових потоках відповідно. Загальносуднові системи функціонують у режимі ручного управління. Система визначення технічного стану об'єктів СЕУ функціонує в "сплячому" режимі. Система АПС функціонує в штатному режимі.

Сценарій 7. Об'єкти СЕУ з моменту проходження сигналу про відповідну дію (намірі) судноводія переключаються на режим забезпечення максимальної технічної безпеки судна в рейсі, при навантаженні і (або) на стоянці. Такий режим може бути призначений судноводієм, якщо він одержить інформацію про можливу погрозу безпеки судна.

Джерелом небезпеки можуть бути штормові умови плавання, погроза транспортної події, водотечія, пожежезагрозлива ситуація в окремих приміщеннях судна, вимоги Інформації про остійність і непотоплюваності, Інформації про завантаження судна і т.п.. У повну готовність приводяться системи осушення, баластова, протипожежні системи. Система АПС функціонує в штатному режимі. ПК, електроенергетична установка переводяться в режим ручного управління, утилізатори теплоти випускних газів відключаються. Система визначення технічного стану об'єктів СЕУ відключається.

Сценарій 8. Об'єкти СЕУ з моменту проходження сигналу про відповідну дію (намірі) судноводія переключаються на маневровий режим (режим ручного управління головними двигунами, підрулюючими пристроями, рушіями). Запускається резервний дизель-генератор. У повну готовність приводяться пристрої, що підрулюють, палубні механізми. При цьому електроенергетична установка, комплексна система утилізації теплоти працюють відповідно до алгоритмів їх управління, що забезпечують поточні потреби судна в електроенергії і теплових потоках відповідно. Система АПС, загальносуднові системи функціонують у штатному режимі. Система визначення технічного стану об'єктів СЕУ відключається.

Режими роботи об'єктів СЕУ при реалізації усіх восьми інтелектуальних сценаріїв управління представлені в зведеній табл. 1.

Таблиця 1 - Зведена таблиця режимів роботи об'єктів СЕУ при реалізації інтелектуальних сценаріїв управління

Об'єкт СЕУ		Режим роботи СЕУ							
		Сценарій №1	Сценарій №2	Сценарій №3	Сценарій №4	Сценарій №5	Сценарій №6	Сценарій №7	Сценарій №8
ГД		Максимальна потужність	Номинальна потужність	Максимальна економічність	Штатний режим	Максимальна ЕБ	Максимальна довговічність	Штатний режим	Штатний режим
РРП		Режим судноводія (передній задній хід)	Режим судноводія (передній задній хід)	Режим судноводія (передній задній хід)	Режим судноводія (передній задній хід)	Режим судноводія (передній задній хід)	Режим судноводія (передній задній хід)	Режим судноводія (передній задній хід)	Режим судноводія (передній задній хід)
Допоміжні двигуни		Штатний режим	Штатний режим	Максимальна економічність	Штатний режим	Максимальна ЕБ	Максимальна довговічність	Штатний режим	Штатний режим
Електростанція		З забезпеченням резерву потужності	Штатний режим	Максимальна економічність	Штатний режим	Максимальна ЕБ	Штатний режим	З забезпеченням резерву потужності	З забезпеченням резерву потужності
СС	Осушувальна	Готовність до пуску	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Готовність до пуску	Штатний режим
	Баластна	Готовність до пуску	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Готовність до пуску	Штатний режим
	Газопивускна	Максимальна потужність	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим

Вентиляційна	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим
Паливна	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим
Змащування	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим
Стиснутого повітря	Готовність до пуску	Готовність до пуску	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Готовність до пуску	Готовність до пуску
Водогасіння	Готовність до пуску	Готовність до пуску	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Готовність до пуску	Штатний режим
Газового пожежогасіння	Готовність до пуску	Готовність до пуску	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Готовність до пуску	Штатний режим
Аерозольного пожежогасіння	Готовність до пуску	Готовність до пуску	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Готовність до пуску	Штатний режим
Піноспензійна система пожежогасіння	Готовність до пуску	Готовність до пуску	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Готовність до пуску	Штатний режим
Інша система пожежогасіння	Готовність до пуску	Готовність до пуску	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Готовність до пуску	Штатний режим
Система кондиціонування повітря та опалення	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим
Автономні котли	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим
Утилізатори ВГ	Відключені	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим	Штатний режим
Підрулюючий пристрій	Готовність до пуску	Відключено	Відключено	Включено	Штатний режим	Відключено	Готовність до пуску	Включено

Аналіз можливих дій системи з тим або іншим інтелектуальним сценарієм управління показує, що для сценаріїв 1, 2, 4, 6, 7 та 8 додаткові розробки критеріїв результативності, на які повинна бути орієнтована система управління, не потрібні - такими критеріями є:

для сценарію 1 - максимальна потужність головних двигунів;

для сценарію 2 - номінальна потужність головних двигунів;

для сценарію 4 - швидкість руху судна;

для сценарію 6 - режими роботи об'єктів СЕУ, що забезпечують їх найбільшу довговічність;

для сценарію 7 - попередження погроз безпеки судна або ліквідація таких погроз;

для сценарію 8 - автоматичне управління; критерій результативності такого управління не потрібен.

Однак для сценаріїв 3 і 5 критерії результативності автоматичного управління потрібен і такими, на думку автора, можуть бути: для сценарію 3 - енергетична ефективність, а для сценарію 5 - екологічна ефективність судна.

Висновки. В результаті комплексного дослідження в даному розділі розроблені моделі та сценарії управління судовою енергетичною установкою. Таких моделей всього вісім, кожна з яких характеризується станом внутрішнього та зовнішнього середовища. Обґрунтовані блок-схеми єдиної комплексної цілеспрямованої системи управління СЕУ, доведено, що при даному рівні розвитку мікропроцесорної техніки та інформаційних технологій можлива реалізація її у складі конкретного судна як на етапі проектування, так і на етапі модернізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sagin S. V. The investigations of the influence of ultrasonic fuel processing on sulfur wear of details in cylinder group of marine diesel engines / S. V. Sagin, Solodovnikov V. G. // European Science and Technology : material of the XVI international research and practice conference, Munich, March 14th – 15th, 2017 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany 2017. – P. 61-74.

2. Занько О. Н. Технология использования рабочих веществ в судовых энергетических установках / О. Н. Занько, В. Н. Калугин, И. В. Логишев. – Одесса : Фенікс, 2005. – 508 с.
3. Солодовников В. Г. Использование в судовых дизелях топлив различного фракционного и структурного состава / В. Г. Солодовников // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2014. – № 33. – Одесса : ОНМА. – С. 110-117.
4. Кочанов Э. С. Электрические методы очистки и контроля судовых топлив / Э. С. Кочанов. – Л. : Судостроение, 1990. – 216 с.
5. Липантьев Р. Е. Улучшение эксплуатационных свойств дизельных топлив электродуговым способом / Р. Е. Липантьев, В. П. Тутубалина // Проблемы энергетики. – 2011. – № 1-2. – С. 127-131.
6. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів / С. В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 139-149.
7. Соловьёв А. В. Повышение эффективности судовых энергетических установок / А. В. Соловьёв, М. М. Чиркова, Н. Ф. Попов // Вестник АГТУ. Сер. : Морская техника и технология. – 2018. – № 4. – С. 101-106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-101-106

Кучерук Г.Ю., Горбань А.В.

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛОГІСТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У статті розглянуто сучасний стан розвитку мультимодальних перевезень, які є основою міжнародної торгівлі та важливим інструментом для забезпечення ефективності, стійкості й екологічності логістики. Описано стратегічне значення мультимодальних перевезень для України, враховуючи її географічне положення та потенціал стати ключовим транзитним вузлом між Китаєм і ЄС.

Автори акцентують увагу на необхідності підвищення логістичної стійкості мультимодальних перевезень шляхом диверсифікації маршрутів, розвитку інфраструктури, впровадження цифрових технологій, екологічних підходів та адаптації до глобальних викликів, таких як пандемія COVID-19, війна та посилення екологічних вимог.

У статті також запропоновано комплексний підхід до забезпечення логістичної стійкості, що включає розвиток сучасної інфраструктури, інтеграцію цифрових рішень (IoT, блокчейн, автоматизація) і дотримання екологічних стандартів. Наголошено на важливості міжнародної співпраці, інвестицій у транспортні хаби та інтеграції України до міжнародних транспортних коридорів. Запропоновані рекомендації спрямовані на створення інноваційної, ефективної та екологічно відповідальної транспортної системи, що відповідає викликам сучасного світу та сприяє економічному розвитку країни.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, логістична стійкість, інфраструктура, цифровізація, екологічність, транспортні хаби, диверсифікація маршрутів, міжнародна співпраця, оптимізація логістики, транспортні коридори

Постановка проблеми. Мультимодальні перевезення сьогодні стають основою міжнародної торгівлі, оскільки поєднують різні види транспорту і дозволяють оптимізувати маршрути та прискорити доставку вантажів, особливо для міжнародних поставок. Мультимодальні перевезення є не лише відповіддю на сучасні логістичні виклики, а й інструментом підвищення ефективності, стійкості та екологічності глобальної та регіональної транспортної системи. Для України ця тема має стратегічне значення, враховуючи її географічне положення та потенціал стати ключовим транзитним вузлом у Європі.

В Україні розвиток мультимодальних перевезень залишається на початковому етапі. Частка контейнерних перевезень у країні є вкрай низькою: у загальному залізничному потоці вона становить лише близько 2%, тоді як у розвинених країнах цей показник перевищує 45% [1]. Водночас на українському ринку вже працюють великі міжнародні мультимодальні перевізники, такі як Maersk Line, DHL Global Forwarding, DB Schenker, Rail Cargo Logistics (ÖBB). Зручне географічне розташування України на шляху між Китаєм і ЄС надає значний логістичний потенціал, адже обсяги перевалки вантажів між цими регіонами щороку зростають. Однак, Україна на зараз використовує лише 25–30% свого транзитного потенціалу. Логістична стійкість мультимодальних перевезень є важливим фактором для підтримки економічної стабільності, зменшення екологічного впливу та забезпечення ефективності ланцюгів постачання. В умовах глобальних викликів і регіональних особливостей ця тема має ключове значення для сталого розвитку транспортної галузі та економіки загалом.

Питанням підвищення стійкості та ефективності мультимодальних перевезень в Україні присвячені праці вітчизняних та іноземних авторів: : О. О. Карпенко, О. Є. Бабина, Р. В. Вернигора, А. М. Окорочков, П. С. Цупров, Я. Панг, Ш. Пан, Е. Балло, М. Уддін, Н Хюїн Чжао, Донг, Адріана-Сімона Міхайта, Юмін Оу. Хатценбюлер, Йонас, Ерік Єнеліус, Дьозьо Гідофалві, Одет Кац [2-7].

Вони вивчали окремі напрямки розвитку мультимодальних перевезень, проте потрібен комплексний підхід, який дозволяє врахувати всі фактори, забезпечення логістичної стійкості, знижуючи ризики та підвищуючи ефективність мультимодальних перевезень на всіх етапах.

Виклад основного матеріалу. Рівень розвитку мультимодальних перевезень впливає на глобальну і національну економіку країни, безпеку та сталий розвиток. Завдяки координації перевезень між різними видами транспорту можна скоротити витрати на зберігання, обробку вантажів і зменшити холостий пробіг транспортних засобів. Країни з розвиненими мультимодальними перевезеннями мають конкурентні переваги в залученні іноземних інвесторів та забезпеченні ефективної логістики для бізнесу. Тому, для стабільного функціонування транспортної системи, бізнесу та економіки в цілому потрібно використовувати інструменти логістичної стійкості мультимодальних перевезень.

Логістична стійкість мультимодальних перевезень — це здатність транспортних систем забезпечувати стабільність і ефективність перевезень у разі зовнішніх і внутрішніх викликів. Вона охоплює стратегії збереження функціональності транспортних ланцюгів у несприятливих умовах, таких як природні катаклізми, техногенні аварії, військові дії чи економічні кризи.

Необхідність комплексного підходу забезпечення логістичної стійкості у мультимодальних перевезеннях посилюється впливом глобальних криз, підвищенням екологічних вимог та зростанням ролі диджиталізації. Пандемія COVID-19 порушила глобальні ланцюги постачання, показавши важливість гнучких і стійких мультимодальних систем. Військові дії в Україні порушили транспортні коридори, змусивши шукати альтернативи, наприклад, розвивати експорт зерна через порти сусідніх країн. Європейський Зелений курс (*Green Deal*) стимулює країни скорочувати викиди CO₂ у транспортному секторі. Інтеграція сучасних технологій, таких як IoT, блокчейн і автоматизація, дозволяє підвищити прозорість і ефективність мультимодальних перевезень. Сучасні напрями та інструменти комплексного забезпечення логістичної стійкості мультимодальних перевезень наведені у табл. 1

Таблиця 1. Основні напрями комплексного підходу забезпечення логістичної стійкості мультимодальних перевезень

Напрямок	Інструменти забезпечення
Диверсифікація маршрутів і видів транспорту	✓ Використання альтернативних транспортних коридорів. ✓ Поєднання залізничного, автомобільного, водного та повітряного транспорту.
Розвиток інфраструктури	✓ Модернізація мультимодальних хабів, терміналів і складських площ. ✓ Забезпечення стійкості інфраструктури до екстремальних погодних умов і техногенних ризиків.
Впровадження цифрових технологій	✓ Використання систем управління перевезеннями для оперативного моніторингу вантажів. ✓ Застосування блокчейн-технологій для прозорості та надійності логістичних ланцюгів.
Планування та управління ризиками	✓ Аналіз потенційних загроз і розробка планів реагування на кризи. ✓ Резервування ресурсів (суден, транспортних засобів, технічного обслуговування).
Екологічна стійкість	✓ Перевага екологічно чистих видів транспорту. ✓ Скорочення викидів шляхом оптимізації маршрутів і використання сучасного обладнання.
Міжнародна співпраця	✓ Інтеграція до Транс'європейської транспортної мережі (TEN-T). ✓ Участь у міжнародних ініціативах зі сталого розвитку транспорту.

Кожен з цих аспектів робить внесок у підвищення ефективності, стійкості та конкурентоспроможності мультимодальних перевезень. Однак особлива необхідна до диверсифікації, стану інфраструктури, диджиталізації та екологічності дозволяє адаптуватися до сучасних викликів і залучити міжнародних партнерів. Розглянемо їх докладніше.

Диверсифікація маршрутів. Залежність від одного маршруту чи виду транспорту робить логістичну систему вразливою до збоїв, таких як природні катаклізми, війна чи економічні кризи. Наприклад, блокада портів України під час війни змусила перевізників шукати альтернативи через залізницю та автомобільні коридори. Диверсифікація маршрутів - це адаптивність до непередбачуваних ситуацій, оскільки вона дає змогу оперативно перенаправляти вантажі, якщо виникають непередбачені обставини, наприклад, блокування портів, страйки або військові дії та забезпечує гнучкість, що особливо важливе в кризових умовах, коли швидкість ухвалення рішень критична. Досягнення диверсифікації маршрутів для забезпечення логістичної стійкості потребує системного підходу, що включає інфраструктурні, технологічні, економічні та політичні заходи. Основні кроки, які дозволяють цього досягти такі:

- ✓ Розвиток мультимодальних терміналів. Це дозволяє швидко перемикає вантажі між різними видами транспорту.
- ✓ Інтеграція транспортних платформ. Використання цифрових систем для координації перевезень між різними маршрутами.
- ✓ Використання цифрових карт і даних. Аналітика маршрутів допомагає знаходити ефективні альтернативи.
- ✓ Автоматизація процесів. Наприклад, впровадження трекінгу вантажів у реальному часі для оптимізації маршрутів.
- ✓ Прогнозування ризиків. Використання технологій штучного інтелекту для оцінки можливих проблем на маршрутах. □ Підписання транзитних договорів. Співпраця з сусідніми країнами для створення альтернативних маршрутів.
- ✓ Участь у міжнародних транспортних коридорах. Наприклад, інтеграція до мережі TEN-T або Шовкового шляху.
- ✓ Гармонізація стандартів. Забезпечення однакових правил для перевезень у різних країнах.

Інфраструктурна стійкість. Слабка або застаріла інфраструктура є «вузьким місцем» для ефективності мультимодальних перевезень. Інвестування в її оновлення збільшує пропускну здатність і зменшує витрати. Недостатній розвиток мультимодальних хабів в Україні зменшує її конкурентоспроможність на шляху між Китаєм та ЄС. Досягнення інфраструктурної стійкості в мультимодальних перевезеннях передбачає створення транспортної системи, здатної адаптуватися до змін, витримувати вплив кризових ситуацій і забезпечувати безперебійну роботу. Ключові поступи для досягнення цієї мети:

- Будівництво транспортних хабів. Інтеграція залізничних станцій, портів і аеропортів для зручності перевантаження.
- Модернізація існуючої інфраструктури Використання новітніх технологій і матеріалів для побудови довговічних об'єктів.
- Використання єдиної логістичної платформи. Інформаційні системи для координації різних видів транспорту в одному вузлі.
- Резервні маршрути. Планування запасних шляхів для перевезення вантажів у разі катастроф або блокування основних маршрутів.
- Інфраструктурні бункери. Створення зон зберігання вантажів у кризових умовах.
- Інвестиції у спільні проекти. Наприклад, будівництво транскордонних логістичних хабів.
- Гармонізація стандартів. Уніфікація інфраструктурних вимог для забезпечення сумісності між країнами.
- Пріоритетне фінансування. Виділення коштів на критичні об'єкти транспортної мережі.

- Аналіз інфраструктури на предмет ризиків (зношеність, аварійність, вразливість до кліматичних змін).
- Регулярні перевірки. Проведення аудиту об'єктів для виявлення слабких місць.

Цифровізація та інтеграція. Сучасна логістика потребує прозорості та координації між усіма учасниками процесу. Цифрові рішення спрощують ці завдання та знижують ризики людських помилок. Використання платформ для відстеження вантажів дозволяє клієнтам оперативно реагувати на затримки чи зміни в маршруті.

Забезпечення цифровізації та інтеграції в мультимодальних перевезеннях є важливим кроком для підвищення ефективності, прозорості та гнучкості логістичних систем. Це досягається за допомогою впровадження сучасних технологій, гармонізації даних і координації між учасниками логістичного ланцюга. Забезпечення цифровізації та інтеграції в мультимодальних перевезеннях вимагає комплексного підходу. У табл. 2 наведені ключові дії в цьому напрямку:

Таблиця 2 – Напрями забезпечення цифровізації та інтеграції в мультимодальних перевезеннях

Напрямок цифровізації	Інструменти забезпечення	Результат впровадження
1. Впровадження цифрових платформ для координації	Створення єдиної інформаційної системи.	Єдина платформа для управління перевезеннями дозволяє інтегрувати дані між різними видами транспорту (залізничним, автомобільним, морським і авіаційним).
	Хмарні рішення.	Використання хмарних технологій для зберігання та обміну даними в реальному часі.
	Інтеграція з існуючими системами.	Впровадження митної системи, ERP-системи компаній, трекінг-платформи.
2. Використання технологій Інтернету речей (IoT)	Моніторинг вантажів.	Встановлення сенсорів, які відстежують місцезнаходження, температуру, вологість або інші параметри під час перевезення.
	Оптимізація перевантаження.	Дані з IoT-пристроїв допомагають організувати більш ефективні процеси перевантаження у вузлах.
3. Автоматизація логістичних процесів	Використання штучного інтелекту (AI).	Аналіз великих обсягів даних для прогнозування оптимальних маршрутів, розрахунку часу доставки та оцінки ризиків.
	Роботизація складів.	Автоматизовані системи для обробки вантажів у логістичних хабах
	Автоматичне сортування вантажів.	Прискорення перевантажувальних операцій на терміналах.
4. Використання блокчейн-технологій	Прозорість і безпека даних.	Блокчейн забезпечує безпеку даних і дозволяє верифікувати інформацію про вантажі.
	Контроль транспортування.	Створення "цифрового ланцюга" поставок, де кожен етап перевезення підтверджується в системі
5. Розробка інтегрованих трекінг-систем	Відстеження в реальному часі.	Використання GPS і RFID для точного моніторингу місцезнаходження вантажу на кожному етапі перевезення.
	Інтеграція з мобільними додатками.	Зручний доступ до інформації для клієнтів і партнерів через смартфони.
6. Гармонізація даних і стандартів	Єдині формати обміну даними.	Впровадження міжнародних стандартів (наприклад, EDIFACT) для полегшення передачі інформації між системами.
	Взаємодія між різними платформами.	Забезпечення сумісності локальних систем і міжнародних логістичних платформ.

7. Інтеграція з митними та регуляторними органами	Електронні митні декларації.	Автоматизація подачі документів і скорочення часу на оформлення.
	Обмін даними з державними системами.	Впровадження систем Single Window для спрощення регуляторних процедур.
8. Використання великих даних (Big Data)	Аналіз попиту та пропозиції.	Збір даних для прогнозування обсягів перевезень.
	Оцінка ефективності маршрутів.	Використання даних для визначення найоптимальніших транспортних коридорів.
	Моніторинг продуктивності.	Аналіз ключових показників ефективності (KPI) для покращення логістичних процесів
9. Підготовка кадрів до роботи з цифровими технологіями	Навчання персоналу.	Проведення тренінгів для ознайомлення з новими системами.
	Створення спеціалізованих відділів.	Підготовка команд з аналітики даних і цифрового управління логістикою.
10. Розвиток партнерських відносин	Спільне використання платформ.	Кооперація між логістичними операторами для доступу до єдиних систем.
	Участь у міжнародних цифрових проєктах.	Інтеграція в глобальні транспортні платформи, такі як TradeLens або DP World.

Ці напрями є ключовими для ефективної інтеграції мультимодальних перевезень у глобальну цифрову екосистему та підвищення конкурентоспроможності транспортного сектору. Комплексний підхід у забезпеченні цифровізації та інтеграції в мультимодальних перевезеннях означає, що всі аспекти цього процесу розглядаються взаємопов'язано, а дії спрямовуються одночасно на кілька напрямів, які впливають на ефективність перевезень. Комплексний підхід забезпечує, що жоден із аспектів цифровізації не залишається поза увагою. Це дозволяє уникнути «вузьких місць», коли, наприклад, технології впроваджені, але відсутня відповідна інфраструктура чи законодавство. Усі елементи повинні працювати синхронно, як частини єдиної системи.

Екологічна відповідальність. Екологічні стандарти стають обов'язковими в багатьох країнах, що стимулює компанії переходити на більш екологічні рішення. Наприклад, залізничні перевезення є екологічно чистішими, ніж автомобільні, що робить їх привабливішими для міжнародних клієнтів. Досягнення екологічності в логістиці мультимодальних перевезень вимагає впровадження рішень, які знижують викиди парникових газів, підвищують енергоефективність та мінімізують вплив на довкілля. Це можна реалізувати через наступні заходи (табл. 3). Вони забезпечують надійність, гнучкість і ефективність мультимодальних перевезень у динамічних умовах сучасного світу.

Таблиця 3 – Екологічні підходи забезпечення логістичної стійкості мультимодальних перевезень

Екологічний підхід	Напрями забезпечення логістичної стійкості
Використання екологічних видів транспорту	• Пріоритет залізничного та водного транспорту. Ці види транспорту мають значно менший рівень викидів CO₂ на одиницю перевезеного вантажу, ніж автомобільний транспорт. • Перехід на електричний транспорт. Впровадження електромобілів, електровозів і суден із використанням відновлюваних джерел енергії. • Судна на скрапленому природному газі (LNG). Зменшення викидів SO₂ і NO_x у морських перевезеннях.
Модернізація транспортних засобів	• Підвищення енергоефективності. Встановлення сучасних двигунів, які споживають менше палива. • Аеродинамічні вдосконалення. Використання конструктивних рішень для зменшення опору повітря. • Використання біопалива. Альтернативні джерела енергії, такі як біодизель чи етанол.

Розвиток інфраструктури	• Зелені логістичні хаби. Використання відновлюваних джерел енергії для обслуговування складів і терміналів. • Електрифікація залізничних ліній. Підвищення частки електрифікованих маршрутів у залізничному транспорті. • Будівництво зарядних станцій. Розширення мережі для електротранспорту.
Упровадження концепції "зеленого ланцюга постачання"	• Мінімізація відходів. Використання багаторазової упаковки та зменшення кількості непотрібних матеріалів. • Перехід на локальні постачання. Зменшення транспортних відстаней через підтримку місцевих виробників. • Облік вуглецевого сліду. Розрахунок і управління обсягами викидів CO₂ на всіх етапах перевезень.
Підвищення обізнаності та навчання персоналу	• Навчання екологічним стандартам. Інформування працівників про принципи екологічного транспортування. • Створення культури відповідального ставлення. Мотивування компаній і працівників до використання екологічних рішень.
Підтримка міжнародних ініціатив	• Дотримання екологічних стандартів. Виконання вимог міжнародних конвенцій, таких як MARPOL, IMO 2020. • Участь у зелених проєктах. Наприклад, інтеграція до програм "зелених коридорів" у Європі.
Впровадження системи компенсації викидів	• Інвестування у відновлювані джерела енергії. Побудова вітрових, сонячних чи біоенергетичних станцій. • Підтримка проєктів з висадження дерев. Компенсація викидів через збільшення зелених насаджень.
Стимулювання з боку держави	• Субсидії для екологічного транспорту. Зниження вартості інноваційних транспортних засобів. • Податкові пільги. Зменшення податків для компаній, які дотримуються екологічних стандартів. • Фінансування досліджень. Розвиток інновацій у сфері екологічної логістики.

Отже, екологічність мультимодальних перевезень досягається завдяки поєднанню технологічних інновацій, оптимізації маршрутів, модернізації інфраструктури та активній співпраці між державою, бізнесом і суспільством. Це дозволить не лише знизити негативний вплив на довкілля, але й підвищити ефективність логістичних процесів.

Висновок. Логістична стійкість мультимодальних перевезень є ключовим фактором забезпечення економічної безпеки країни та конкурентоспроможності на міжнародному ринку. Стійкість логістики дозволяє забезпечити безперервність економічних процесів під час кризових ситуацій (війни, природних катаклізмів тощо). Мультимодальні перевезення виступають ключовим елементом сучасної логістики, що забезпечує інтеграцію різних видів транспорту для підвищення ефективності, гнучкості та надійності доставки вантажів. Для досягнення логістичної стійкості та сталого розвитку перевезень необхідно зосередитися на логістичній стійкості, інфраструктурній стабільності, цифровізації та екологічності в мультимодальних перевезеннях.

Забезпечення комплексного підходу логістичної стійкості мультимодальних перевезень сприяє створенню інноваційної, ефективної та сталої транспортної системи, що відповідає викликам сучасного світу підвищує привабливість України для інвесторів і партнерів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мельник М.І., Лещух І.В. Розвиток інфраструктури мультимодальних перевезень в Україні у контексті зміни транспортно-логістичних маршрутів в умовах війни: наукова доповідь / ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М.І. Долишнього НАН України». Львів, 2023. 51 с. (Серія «Проблеми регіонального розвитку»).

2. Карпенко О. О., Бабина О. Є.. Інтенсифікація розвитку змішаних перевезень вантажів в Україні шляхом формування мережі транспортно-логістичних центрів і транспортно-логістичних кластерів *Бізнес Інформ*, 2013, №11, с. 180–185.
3. Вернигора, Р. В., Огороков, А. М., Цупров, П. С., & Павленко, О. І. (2017). Мультиmodalьні перевезення як базовий сегмент транзитного потенціалу України. *Транспортні системи та технології перевезень*, (14), 20–29. <https://doi.org/10.15802/tstt2017/123148>
4. Yaxin Pang, Shenle, Pan Eric Ballot Resilience. (2024) Analysis of Multi-modal Logistics Service Network Through Robust Optimization with Budget-of-Uncertainty, arXiv, https://arxiv.org/abs/2405.12565?utm_source
5. Zhao, D., Mihaita, A.-S., & Ou, Y. (2022). Traffic disruption modelling with mode shift in multi-modal networks. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2210.06115>
6. Hatzenbühler, J., Jenelius, E., Gidófalvi, G., & Cats, O. (2022). Modular Vehicle Routing for Combined Passenger and Freight Transport. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2209.01461>
7. Uddin, M., & Huynh, N. (2024). Routing Model for Multicommodity Freight in an Intermodal Network under Disruptions. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2402.00992>

Науменко А.В., Капочкіна М.Б.

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЄКТУВАННЯ МОРСЬКИХ ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ

Протягом останніх десятиліть спостерігається стрімкий розвиток ендегенної теорії рельєфоутворення у мілководних районах з акумулятивним типом рельєфу морського дна. Це створило умови для практичної реалізації отриманих наукових результатів, одним з напрямків яких є днопоглиблювальні роботи. Головною метою днопоглиблювальних робіт на морі є забезпечення безпеки мореплавства у мілководних районах на підходах до портів та вздовж судноплавних шляхів. Якщо у минулі роки проєктування днопоглиблювальних робіт (підхідних каналів, проток тощо) виконувалося за концептуальними принципами мінімізації їх довжини, то в останній час з'явилися технічні рішення щодо забезпечення сталих умов навігаційної безпеки за принципом мінімального замулення об'єктів днопоглиблення. Як приклад, можна навести патент на корисну модель України № 158155 під назвою "Спосіб визначення місця прокладання траси підхідного каналу".

Таким чином, є підстава для констатації зміни парадигми у базових принципах днопоглиблювальних робіт. Наше дослідження присвячене вирішенню проблеми оптимізації проєктування морських днопоглиблювальних робіт за рахунок впровадження наукових результатів, отриманих в рамках ендегенної теорії рельєфоутворення. Розглянуто теоретичне обґрунтування ендегенної теорії рельєфоутворення в Азовському морі, Керченській протоці і південно-західній частині Чорного моря, як підґрунтя для розробки методики врахування впливу ендегенних процесів та флюїдодинамічних структур на замулення об'єктів днопоглиблювальних робіт.

Ключові слова: морська навігація, судноводіння, гідрографія, геоморфологія, підвищення ефективності днопоглиблювальних робіт, акумулятивний рельєф, судноплавні канали, підхідні канали.

Вступ. Морські днопоглиблювальні роботи пов'язані з протидією замулюванню фарватерів, у першу чергу підхідних каналів, а також з побудовою нових підхідних каналів. Інструкція щодо вимог та методів зйомки рельєфу дна для навігаційних цілей містить окремий розділ: "Визначення замулювання акваторій", який вимагає приведення змісту інструкції у відповідність до сучасного наукового рівня. В останні роки в Україні у галузі геоморфології опубліковані нові наукові результати пріоритетного характеру, які можуть бути реалізованими на практиці шляхом формування нового підходу до виконання днопоглиблювальних робіт. Сучасний науковий підхід до виконання днопоглиблювальних робіт повинен не тільки враховувати, але й використовувати на практиці, раніше невідомі особливості природних процесів акумулятивного рельєфоутворення у мілководних районах океанів та морів. Це стосується причин формування піднятів у формі кіс, пересипів, барів і, в першу чергу, процесів формування природним шляхом депресій на морському дні у вигляді прямолінійних жолобів.

Базові положення ендегенної теорії рельєфоутворення мілководних районів океанів та морів викладені у перших двох томах монографії "Нова парадигма акумулятивного рельєфоутворення у мілководних районах океанів та морів", авторами якої є д.т.н., проф. І.І. Гладких, к.т.н., М.Б. Капочкіна, к.г.н, доц. Н.В. Кучеренко, к.г.-м.н. Б.Б. Капочкін [1]. В монографії були узагальнені результати наукових досліджень, опублікованих і представлених у хронологічному порядку [2-16].

Наведемо яскравий приклад прояву природних процесів акумулятивного рельєфоутворення у мілководних районах океанів та морів, вперше наведений 10.12.2013 р у роботі [14], який стосується процесів трансформації дельти Дунаю за останні 2 000 років.

У роботі [14] було доведено, що акумулятивний рельєф дна є стабільним у часі протягом сторічч, а змінюється раптово під дією виключно ендегенних (геодинамічних) факторів впливу. Обґрунтування цієї тези було виконано на прикладі аналізу процесу зміни форми дельти Дунаю. Відповідно до історичних даних, раптова швидкоплинна трансформація дельти Дунаю з античної у сучасну сталася у 1700 році, тобто, протягом 1-2 років [17]. На рисунку 1 показані дві карти дельти Дунаю у різні історичні часи: зараз і приблизно 1500-2000 років тому.

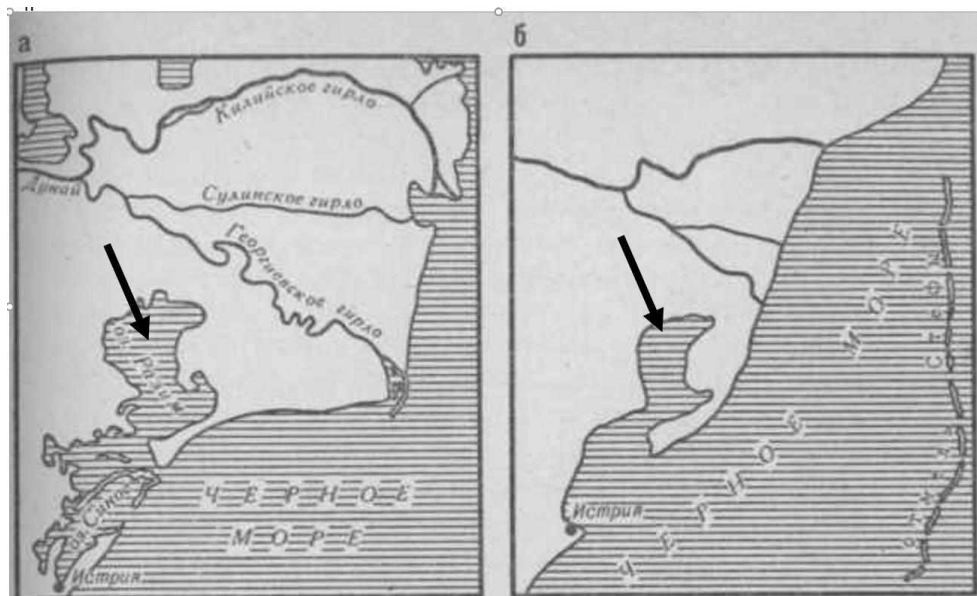


Рисунок 1 - Схеми дельти Дунаю: а) - сучасний стан (1985 р.); б) - античний період [17].

Тобто, близько двох тисяч років тому основна частина сучасної території дельти Дунаю була під водою і представляла собою затоку, відгороджену від моря меридіонально зорієнтованою косою Стефа. Зазначена коса зараз є східним кордоном сучасної дельти Дунаю, що не може бути випадковим співпадінням. Слід звернути увагу на те, що деякі елементи дельти Дунаю у античний період так і залишилися практично незмінними, наприклад, озеро Разім, яке на наведених картах показано стрілками. Відповідно до нових даних стосовно процесів трансформації блокової структури планети [5], у сучасну епоху йде перебудова структур виключно з діагональних - на меридіональну, що і відбулося у 1700 році. Коса Стефа мала протяжність приблизно 70 км, що відповідає довжині сучасного східного кордону дельти Дунаю, і до того ж співпадає з типовим просторовим масштабом блокової подільності твердої оболонки Землі (140x140; 70x70; 35x35 км ...). Такий характер змін також не можна вважати випадковим. На рис. 2 показано супутниковий знімок сучасної дельти Дунаю, що відображає характер її трансформації у XVII столітті з древньої, діагонально орієнтованої (історичні кордон та межа берегової смуги показана білими стрілками) - на сучасну (межа берегової смуги показана червоними стрілками).

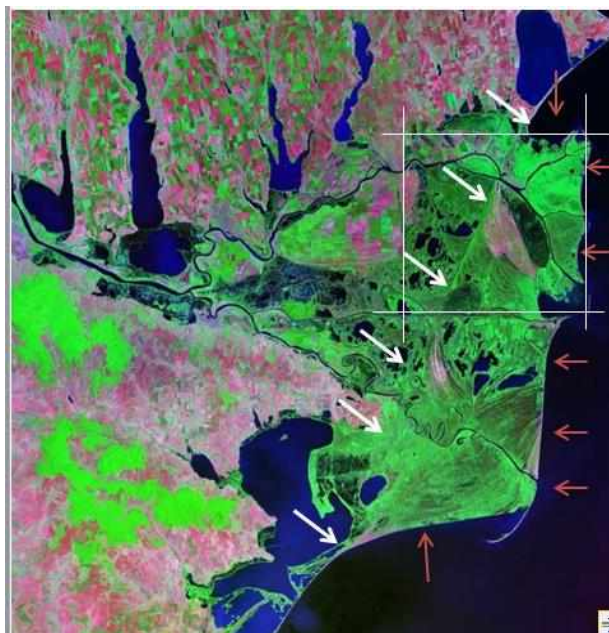


Рисунок 2 – Карта-схема процесу трансформації (у 1700 році) діагонально зорієнтованої дельти Дунаю на - меридіонально зорієнтовану [14].

Висунута у море прямокутна частина представляє собою блокову структуру, яка є складовою частиною блокової структури розміром 140x140 км, що ділиться на відповідні структури 70x70 км, одна з яких (північно-східна) раптово проявилась в рельєфі суходолу у 1700 році та існує досі. Блокова подільність з просторовим масштабом 35x35 км, виділена прямокутником на рис. 2, є і на схемі (рис. 3) у вигляді прямокутника на північному-сході.



Рисунок 3 - Схема [18] блокової подільності регіону Придунав'я з просторовими масштабами 140x140; 70x70; 35x35 км.

Аналіз наведеного прикладу дозволяє прийти до висновку про те, що у будь-якому районі узбережжя раптово можуть відбутися направлені, тобто безповоротні, трансформації значних ділянок морського берега. Це треба враховувати при розробці стратегії будівельного освоєння

узбережжя. Відповідно до ендегенної теорії акумулятивного рельєфотворення, ми вперше отримали можливість теоретично обґрунтовано передбачити напрямки змін поточного акумулятивного рельєфу. Тобто, немає інших варіантів перебудови, ніж у широтному та меридіональному напрямках. Також вперше ми отримали можливість теоретично обґрунтовано передбачити просторовий масштаб змін поточного акумулятивного рельєфу. Це виключно масштаб дольний до базового за теорію К.Ф. Тяпкіна: 140x140 (базовий) та дольні - 70x70; 35x35; 17x17; 8x8; 4x4 км.

Однак важливо констатувати, що в районі Кілійської дельти, кордони якої більше 300 років мають меридіональну орієнтацію, досі збереглися прояви діагональної блокової подільності (проявлені напрямками прямолінійних фрагментів рукавів) з просторовим масштабом 35x35 км і орієнтацією 62° (рисунок 4).

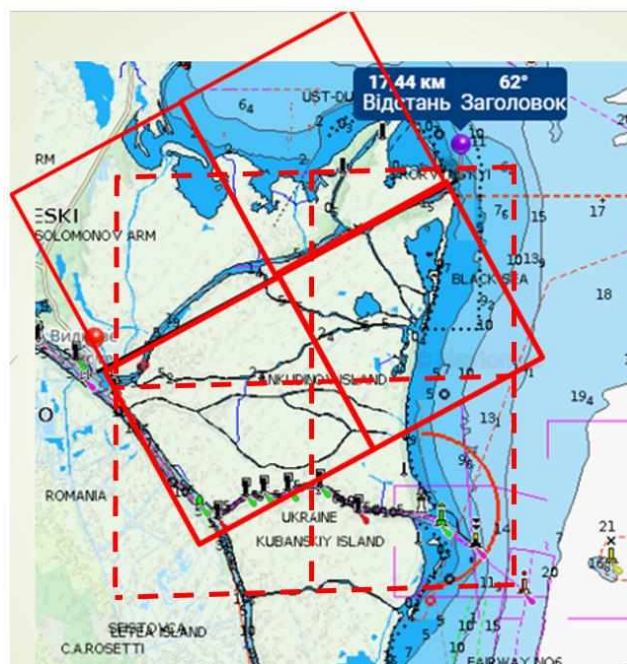


Рисунок 4 - Карта [18] з доданими авторами проявами діагональної (62°) блокової подільності у Кілійській дельті Дунаю з просторовим масштабом 35x35 км (червоні лінії) і перспективні для судноплавства (у майбутньому) рукава сучасної дельти (пунктирна лінія) з аналогічним просторовим масштабом, як це показано на рис. 3.

Ендегенна теорія, посилена кількісними показниками К.Ф. Тяпкіна, дозволяють теоретично обґрунтовано визначити майбутні зміни річкової мережі в кордонах Кілійської дельти. На рисунку 4 пунктиром показані перспективні для судноплавства (у майбутньому) рукава сучасної Кілійської дельти Дунаю.

З метою наукового обґрунтування перспектив застосування результатів теоретичної науки, отриманих в Україні, у практиці днопоглиблювальних робіт, оптимально розглянути вплив геодинаміки на морську геоморфологію, на прикладі якогось конкретного природного морського об'єкту. Об'єктом досліджень наступного розділу публікації обрана найбільш вивчена морська акваторія України – Азовське море.

Стан вивченості процесів формування пересипів, кіс та банок. Рельєф дна мілководного Азовського моря складений мулами, алевритами та пісками, що надходять з твердим стоком Дону та Кубані (близько 37,1 км³ на рік). Скелясті форми рельєфу морського дна не є характерними для Азовського моря. Стік наносів у глибоководну частину Чорного моря незначний.

У холодний період, 2 - 8 разів на рік у Азовському морі виникають шторми зі швидкістю вітру більше 20 м/с, завдяки чому сформовані хвилі та течії повинні знижувати підняття та депресії на морському дні. Тобто, за умов мілководності моря, штормові хвилі та течії повинні руйнувати коси та бари і замулювати депресії, а рельєф дна після штормів повинен знаходитися у стадії постійної трансформації.

Враховуючи зазначене, інформація, що наведена на карті зон розмиву, транзиту та акумуляції донних відкладень Азовського моря, де показано географічне положення зон розмиву, транзиту та акумуляції донних відкладень, потребує детального аналізу.

Наведену карту доцільно аналізувати у комплексі з інформацією, що наведена на карті гранулометричного складу донних відкладень Азовського моря (рис. 5).

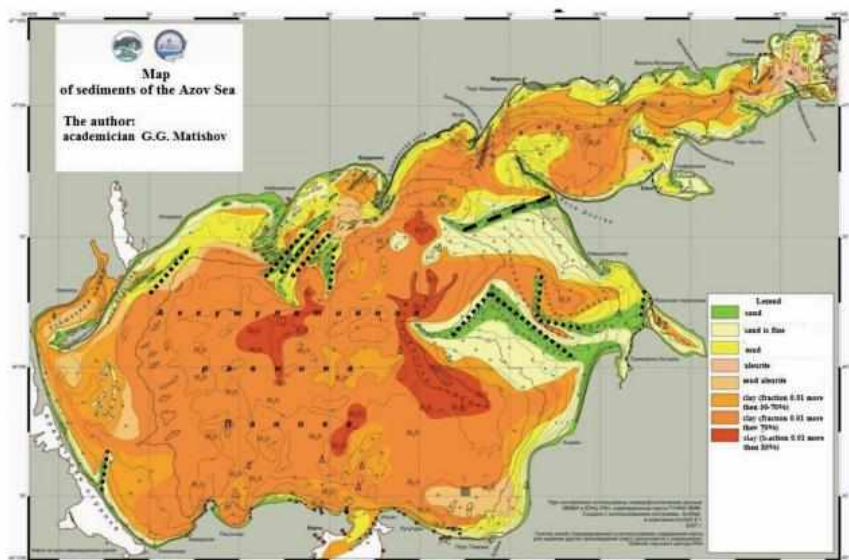
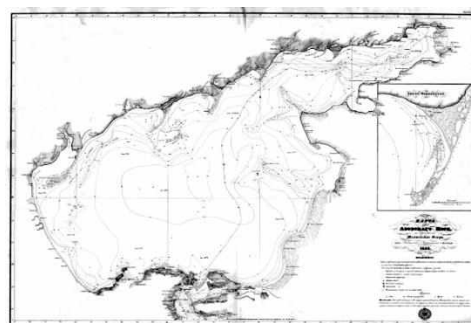


Рисунок 5. - Карта гранулометричного складу донних відкладень Азовського моря [19] з авторськими доробками.

Загальновідомо, що зони розмиву морського дна проявляються крупнозернистою фракцією донних відкладень. Тобто, відкладення піщаної фракції локалізовані у тих зонах, де не відбувається акумуляція завислої речовини. На карті - це всі без виключення коси і банки Азовського моря. Тобто, на карті (рис. 5) показано, що всі коси Азовського моря складені з крупнозернистої фракції донних відкладень, яка характеризує наявність процесів розмиву морського дна і тому не мають відношення до районів акваторії, в межах яких після шторму слід очікувати акумуляцію. Незважаючи на процеси домінування розмиву кіс Азовського моря, вони є стабільними у часі. Це підтверджується інформацією, що наведена на рис. 6, де наведені дві батиметричні карти Азовського моря, одна – сучасна, друга карта - станом на 1833 р.



а



б

Рисунок 6 - Батиметричні карти Азовського моря: а) сучасна карта [19], б) карта 1833 року [20].

Результати порівняльного аналізу двох карт, що побудовані з часовим проміжком приблизно 200 років, свідчать про те, що всі без виключення надводні та підводні акумулятивні форми рельєфу дна Азовського моря, що існували у 1833 році, досі залишаються незмінними, тобто, не були трансформовані потужними штормами, що відбулися в регіоні протягом усіх 200-т років.

У монографії [1], де розглянуто процеси трансформації акумулятивних форм рельєфу морського дна, процеси замулювання природно створених жолобів і штучно створених підхідних каналів, на підставі виконаних наукових досліджень констатовано, що геоморфологічні об'єкти на морському дні природного походження у вигляді піднять та депресій існують без змін на протязі віків, а якщо трансформуються, то раптово і швидкоплинно, тобто не під впливом шторму, а виключно у відповідності до геодинамічного часового масштабу [15]. В незмінних геодинамічних умовах (термін яких вимірюється століттями) коси, пересипи, банки, як навігаційні перешкоди природного походження, є стабільними протягом тривалого часу. Виключенням є акумулятивні форми рельєфу морського дна, що знаходяться під дією антропогенного впливу. Наприклад, геоморфологічні зміни, що пов'язані з будівництвом у Керченській протоці та видобутком піску з акумулятивного тіла Бакальської банки у Каркініцькій затоці [1].

В останні роки створилися теоретичні підстави для корінного перегляду екзогенної гіпотези формування морських берегів та акумулятивного рельєфу дна мілководь на користь ендегенної теорії. Через чверть віку після публікації наукових результатів, які демонструють очевидність ендегенної теорії рельєфоутворення мілководних районів океанів та морів [8], можливо, незалежно від них, були отримані нові підтвердження ендегенної природи формування акумулятивного рельєфу, у тому числі в Азовському морі. Дослідження, виконані інститутом геологічних проблем НАН України [6,7], обґрунтовують припущення про те, що геофлюїдодинамічні структури, як канали вертикальної міграції пластових та глибинних флюїдів, відіграють активну роль у формуванні сучасних ландшафтів. На думку зазначених фахівців, контролюючий вплив процесів, що розвиваються в межах геофлюїдодинамічних структур, на ландшафти морського дна та прибережних зон виражається у формуванні піщаних банок, кіс. Матеріали супутникових знімків Азовського моря і шельфу Чорного моря показують, що практично всі піщані банки і коси знаходяться у зоні геофлюїдодинамічних структур, рідше - в зонах окремих розривних порушень або лінійних зон горизонтальних напружень [6,7]. Приуроченість кіс до вказаних структур літосфери обумовлює їх прямолінійність (або прямолінійність їх окремих фрагментів), схожість геометрії їх контурів та періодичну повторюваність, характерну для розривних порушень та лінійних зон горизонтальних напружень.

В результаті аналізу публікацій про узгодженість у просторі морських акумулятивних форм з розривними порушеннями [6,7], чіткі причини формування особливих умов седиментації уздовж згаданих розломів, авторами зазначених публікацій не наводяться. Вказується лише на те, що усі коси, як Азовського так і Чорного морів, розташовуються у межах геодинамічних вузлів і розломів. Наочно ця ситуація, зокрема, проглядається і в межах коси Обіточної, яка вивчалася з використанням методу виділення лінійних зон хмарності на супутникових зображеннях. На рис. 7 показано, що лінеamenti хмарності проявляються системно (на рисунку нами нанесено дві пунктирні лінії, які явно проявлені лінеаментами хмарності, до яких ми ще повернемося).

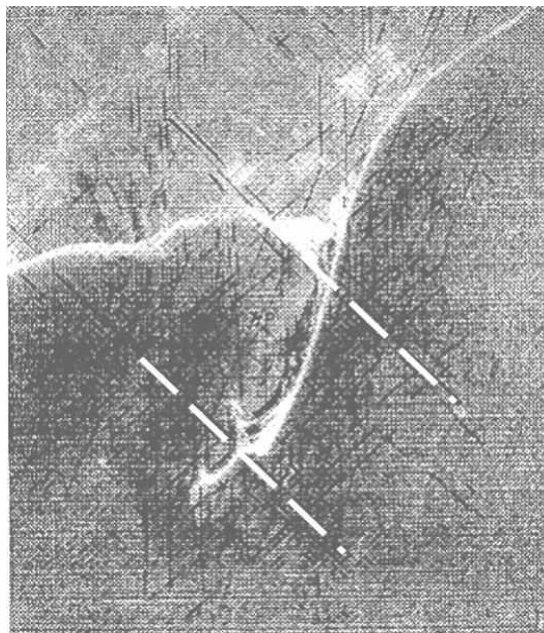


Рисунок 7 - Схема лінементів хмарності над косою Обіточна [7] з доробками авторів.

Важливо пам'ятати, що дані про ендегенну природу формування акумулятивних форм берегового рельєфу мілководного Азовського моря були узагальнені ще 55 років тому у роботі Ключової В.О. [3]. На рис. 8 показано, що три найдовші коси північного берега Азовського моря сформувалися на продовженні тектонічних порушень, що були виявлені та детально вивчені на суші. Слід зазначити, що у цитованому виданні на стор. 24-33 Г.Г.Ткаченко зазначені тектонічні порушення, визначені в межах акваторії Азовського моря були вперше підтверджені геофізичними методами[2].

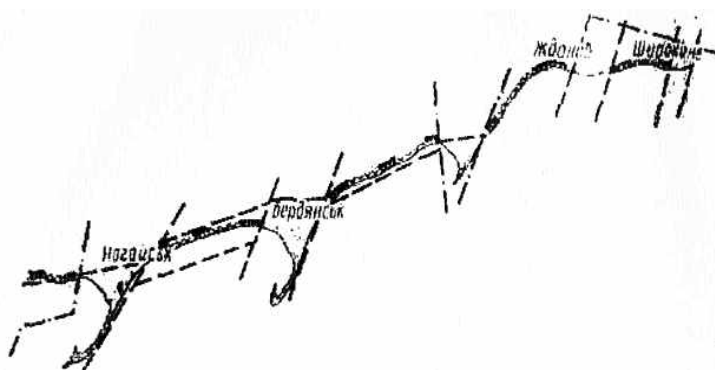


Рисунок 8. - Північне узбережжя Азовського моря - тектонічна схема [3].

В роботі Ключової В.О. [3] чітко показано системне чергування грабенів діагональної спрямованості на суші північного Приазов'я, уздовж яких проявлено, так само системно, формування прямолінійних надводних акумулятивних форм у вигляді кіс та їх підводних продовжень - банок.

В роботі [21] наводяться дані про геологічну будову кіс Азовського моря. За даними, отриманими зі свердловин, що були пробурені на косах північного Приазов'я, було виявлено значні тектонічні порушення у їх межах, тобто підтверджено тектонічну проникність кіс Приазов'я.

Ми вважаємо важливим відзначити, що не всі, а тільки активні тектонічні порушення, продовжуються у морі у вигляді надводних та підводних акумулятивних форм рельєфу. Авторами роботи [3] показано, що на північно-західному березі Азовського моря Обіточному горсту

ізобатою. Слід зазначити, що жолоб просторово узгоджується з Одесько-Сивашською ослабленою неотектонічною зоною [2]. Ендогенна теорія акумулятивного рельєфоутворення у мілководних районах дає підстави констатувати про те, що прямолінійні широтно зорієнтовані жолоби є незмінними у часі, бо відповідають сучасному стану розвитку нашої планети в рамках ротаційної теорії К.Ф. Тяпкіна.

Жолоб простягається від Великого Аджаликського лиману на заході, де сформована депресія, глибина якої перевищує 20 м, до Березанського лиману на сході, де глибина жолобу 12 м.

Слід враховувати, що зазначений жолоб з південного напрямку межує з Одеською банкою, складеною піщаною фракцією, тобто, під час штормів південного напрямку жолоб повинен замулюватися, але цього не відбувається. Цікавою, тобто незрозумілою, особливістю цього жолобу є те, що на сході жолоб ділиться на дві гілки: північно-східну (виділяється ізобатою 5 м і має азимут 62°) та південно-східну (виділяється ізобатою 10 м і має азимут 17°). Ширина гілок з незрозумілих причин - однакова. Північно-східна гілка жолобу впирається в оголовок Кінбурнської коси, огинаючи її з півночі, і є судноплавною. Всупереч законів гідродинаміки, Кінбурнська коса, висунута від берега поперек течії Дніпровських вод, при цьому втричі скорочує ширину лиману (від 8-10 км до 3,5 км). Підводна частина коси висувається поперек течії ще на 2 км. В безпосередній близькості від тіла коси природним шляхом сформований сам жолоб, шириною до 500 м, з азимутом простягання 45° (рис. 11).



Рисунок 11. - Батиметрична карта судноплавного жолобу на вході в Дніпро-Бугський лиман [18].

У жолобі перепад глибини досягає 16 м глибини на 180 метрів дистанції. Тобто, води Дніпра та Бугу «вимушені» рухатися вузьким струменем, а значить з аномально високою швидкістю, причому цей процес відбувається без розмиву піщаного тіла Кінбурнської коси.

У Дніпро-Бугському лимані на узмор'ї дельти Дніпра природним шляхом сформована вузькість (рис. 12).



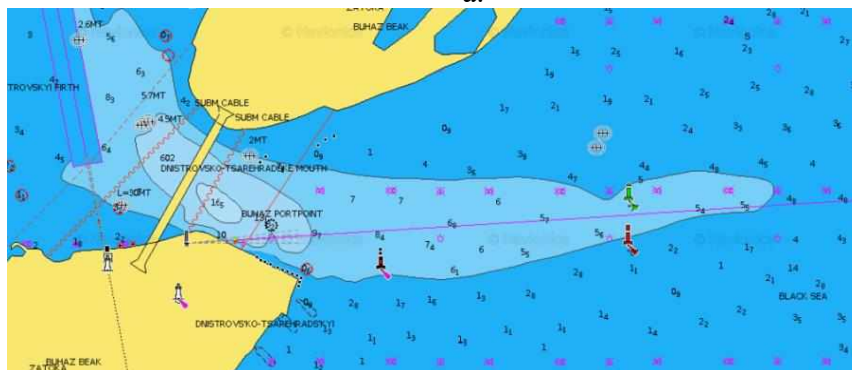
Рисунок 12. - Схема жолобу на захід від Дельти Дніпра (батиметрична карта з [18]).

У цьому місті природним шляхом ширина лиману звужується у три рази підводними акумулятивними формами, які повинні розмиватися потужними потоками води з Дніпра. З цієї причини води Дніпра у зазначеній вузькості формують жолоб, глибина якого більше 10 м, зі значними ухилами дна.

Іншим прикладом жолобу природного походження є жолоб в гирловій частині Дністровського лиману (рис. 13). Дністровський лиман відокремлений від моря пересипом (азимут 35°), який сформувався відповідно до блокової подільності земної кори з просторовим масштабом 7.5×7.5 км.



а.



б.

Рисунок 13. - Батиметричні карти: а) - гирло Дністровського лиману; б) - жолоб природного походження у гирловій частині Дністровського лиману [18].

Фактично, на відстані 7,5 км від північно-східного краю пересипу він має промоїну, і саме тому має ознаки коси. На відміну від пересипу озера Сасик та інших пересипів, просторове

положення промоїни (гирла Дністровського лиману) є стабільним у часі. Це підтверджується тим, що через неї ще у минулому віці побудовано міст. Фактично Цареградське гирло - це місце витoku у море води річки Дністер, яка під час попусків з водосховищ має значну витрату. Напрямок струменя течії, з урахуванням дії сили Кореолісу, мав бути південним і мав сформувати жолоб відповідного напрямку, як це відбувається на узмор'ї рукава Бистрий у Кілійській дельті Дунаю. Фактично ж вимитий течією жолоб є прямолінійним і має широтний напрямок. Повторимо, що у сучасних геодинамічних умовах активною є широтно-меридіональна сітка розломів. Важливо відзначити, що місце промоїни у пересипу та напрямок природного жолобу відповідає широтному розлому, який є паралельним до Одесько-Сивашської неотектонічно ослабленої зони. Тобто, жолоб на узмор'ї Дністровського лиману та жолоб в районі Одеської банки сформовані відповідно блокової подільності 140x140 км. Таким чином, ендегенна теорія акумулятивного рельєфоутворення у мілководних районах вже вдруге дає підстави констатувати, що прямолінійні широтно зорієнтовані жолоби є незмінними у часі, бо відповідають сучасному стану розвитку нашої планети в рамках ротаційної теорії К.Ф. Тяпкіна.

Зараз виникли підстави повернутися до аналізу карти (на рис. 7), де була наведена схема лінементів хмарності над косою Обіточна [7], на якій нами було додано дві паралельні лінії, що проявлені лінеаментами хмарності.

Вкрай важливою є проблема перетину судноплавними каналами акумулятивних форм типу кіс, пересипів та банок. Ми вважаємо зазначену проблему найскладнішу з тих, які потрібно вирішувати при плануванні днопоглиблювальних робіт. Досвід, отриманий нами при аналізі місця формування промоїни пересипу, що відділяє Дністровський лиман від Чорного моря, дозволяє сформулювати припущення, що побудова каналів через коси та банки може бути успішно реалізована в місцях, де коса або банка перетинається флюїдодинамічною структурою іншого напрямку, як це було показано нами на рис. 7.

Розглянемо район Таганрозької затоки (естуарію Дону), що характеризується потужними літодинамічними процесами, адже Дон є джерелом наносів. Коси Білосарайська та Довга перекривають Таганрозьку затоку, завдяки чому води Дону формують на південь від оголовку коси Білосарайський вузький жолоб (рис. 14).

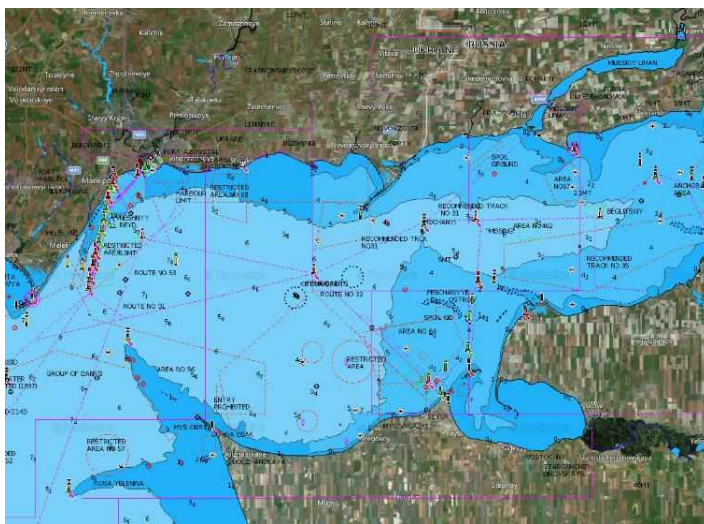


Рисунок 14. - Схема коси Довга, (батиметрична карта [18]).

Коса Довга, що перетинає Таганрозьку затоку, за просторовою орієнтацією відповідає напрямку блокової подільності літосфери 35° і 305° . [5]. Коса Довга відповідає просторовому масштабу 8x8 км та, відповідно контуру ізобати 5 м, має складно побудовану підводну частину, яка роздвоюється. Обидві підводні банки, що мають різну просторову орієнтацію, відповідають

просторовому масштабу 17,5х17,5 км (рис. 14). Відповідно до простягання островів у зоні її підводної частини північно-західна банка відповідає напрямку коси 305°.

На виході з затоки підводна частина коси звужує затоку з 50 км до 18 км (відповідно до положення ізобати 5 м).

Підводна частина коси Довга з північного сходу прямолінійна і протягом 25 км зорієнтована під кутом 305° .

Під таким самим кутом зорієнтована центральна частина коси, проявлена надводними акумулятивними формами - системою островів, які сформувалися вздовж прямої лінії. Західний борт зазначеного підводного продовження коси Довга прямолінійний протягом приблизно 17, 5 км і сформований під кутом 332° . Тобто, борти підводної частини коси Довга сформовані різними напрямками блокової подільності (305° і 332°). Напрямок 305° відповідає блоковій подільності, проявлений на півночі горстами і грабенами. Азимут 332° є перпендикулярним північному берегу моря.

У повній суперечності до екзогенної теорії рельєфоутворення є роздвоєність підводної частини коси Довга. Східне роздвоєння - коса Єленіна (фактично банка). Ця банка у рельєфі проявлена у вигляді прямолінійної форми, протяжністю 17,5 км, і не має продовження в надводному акумулятивному рельєфі.

Зазначена банка до глибини 10 м класично проявлена вузькою прямолінійною смугою пісків, що показано на літологічній карті Азовського моря (рис. 6).

Коса Довга знаходиться на північно-східній межі зануреного блоку, географічно проявленого Азовським морем. Зазначена коса та її підводні продовження одночасно відповідають блоковій подільності літосфери під кутами 35° ; 62° і 77° . Акумулятивна форма з напрямком 77° підтверджена не тільки морфологічно, але і літологічно.

Далі на схід у Таганрозькій затоці сформовано жолоб у місці перекриття лиману косою Беглицька на півночі та косою Чумбурська - на півдні.

Розглянемо систему жолобів Керченської протоки. Водобімін між Азовським та Чорним морями через мілководну протоку, з характерними глибинами 2-4 м, відбувається вузьким жолобом, який є судноплавним: у Керченській протоці жолоб природного походження проявлений контуром ізобати 5 м (рис. 15).

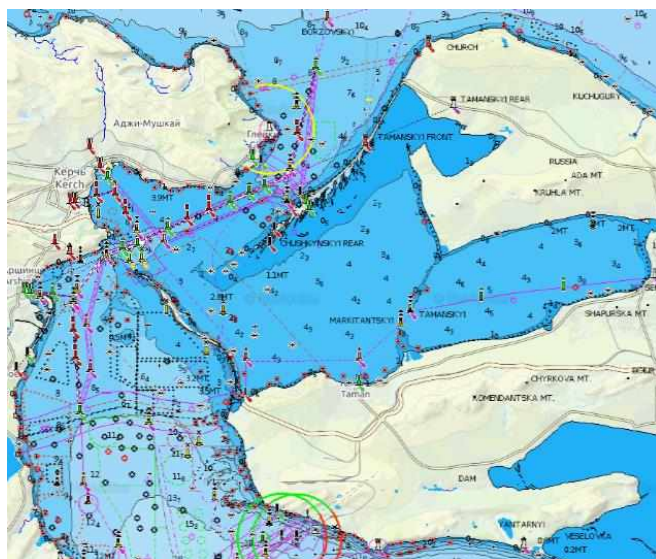


Рисунок 15. - Батиметрична карта Керченської протоки[18].

На південному-заході від оголовку коси Чушка паралельно їй у рельєфі дна починає проявлятися жолоб, довжиною близько 7 км. Тобто, просторова орієнтація жолобу збігається з просторовою орієнтацією надводної та підводної частини коси Чушка. Ширина жолоба збільшується в південно-західному напрямку, тобто в напрямку Павловського звуження, сформованого островом Тузла. На траверзі острова Тузла ширина жолоба звужується вдвічі і,

відповідно, максимальна глибина жолоба збільшується приблизно на третину: у місці звуження протоки жолоб поглиблюється до 12 м (рис. 16).

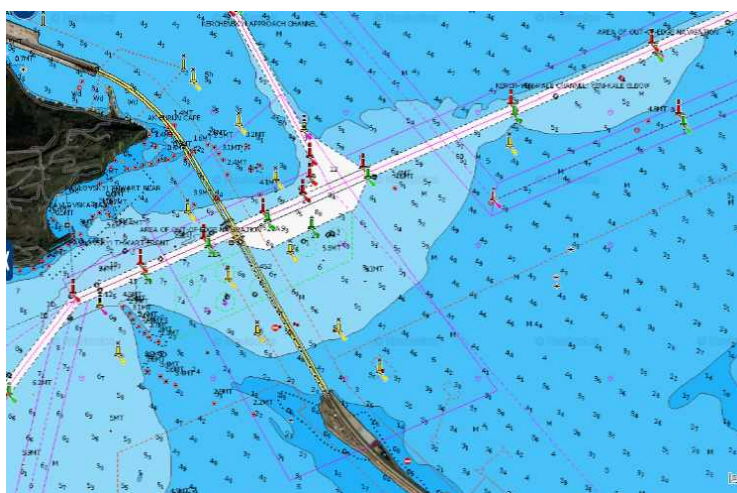


Рисунок 16. - Карта жолобу у Павлівській вузькості Керченської протоки [18].

Походження жолобу в районі Павловського звуження Керченської протоки пов'язане з розмивом дна протоки течією. Потужна течія, що формується у протоці у місці її звуження, не розмиває піщану підводну частину острова Тузла а, як і у гирлах Дніпро-Бузького лиману та Таганрогської затоки, замість цього вимиває жолоб (поглиблюється). Геометрія жолобу (у найвузчій частині) характеризується нахилами дна до 8 м глибини на 30 м дистанції.

Абразійні спроможності потоку води, всупереч законам гідродинаміки, спрямовані не на розширення протоки, а на поглиблення жолобу, що є енергетично більш витратним, адже доводиться виконувати механічну роботу не тільки проти сил тертя, а й проти гравітаційних сил, бо розмив відбувається не у площині, а у вертикальному напрямку.

Практика оптимізації проєктування морських днопоглиблювальних робіт. Важливо констатувати, що не всі штучно створені підхідні канали до портів сильно замулюються після шторму ефективного напрямку. Існує виняток - підхідний канал до порту Південний (рис. 17).



Рисунок 17 - Батиметрична карта підхідного каналу до порту Південний [18].

Цей канал створено вздовж природної прямолінійної депресії у рельєфі морського дна - геофлюїдинамічної структури, і тому лише умовно може вважатися штучно створеним, бо канал

побудований вздовж природної депресії, яка простежується в районі Дністровської банки, тобто є науково обґрунтованим ендемічною теорією формування акумулятивного рельєфу мілководних районів океанів та морів.

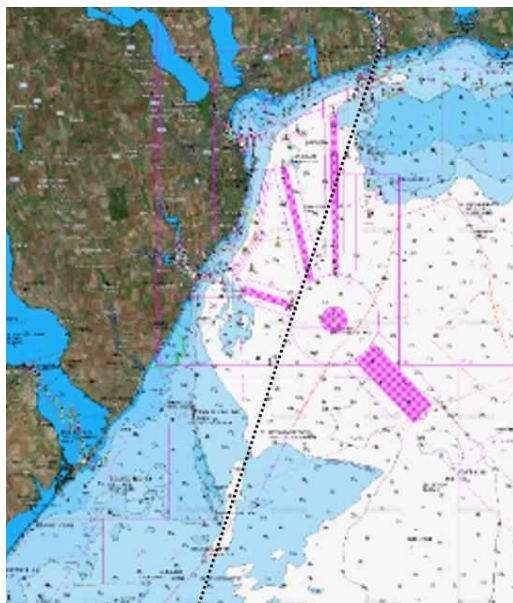


Рисунок 18. - Батиметрична карта північно-західної частини Чорного моря (пунктиром помічено зони, вздовж якої створені прямолінійні депресії в районах п. Південний та на південний-схід від Дністровської банки) [18].

Висновки та рекомендації. Прибережні мілководні райони океанів та морів з акумулятивним рельєфом морського дна у перманентному режимі потребують відновлення глибин вздовж судноплавних шляхів та підхідних каналів. Найяскравішим прикладом є акваторія Азовського моря, в кордонах якого підходи до всіх без виключення портів потребують безперервного «обслуговування» підхідних каналів, довжина яких вимірюється кілометрами. В кордонах Українського сектору Азовського моря судноплавству перешкоджають п'ять кіс. Найяскравішим прикладом перешкоджання судноплавству акумулятивними формами є Керченська протока, у якій судноплавству заважають коси Тузла та Чушка.

Досліджена проблема перетину судноплавними каналами акумулятивних форм типу кіс, пересипів та банок. Ми вважаємо зазначену проблему найскладнішою з тих, які потрібно вирішувати при плануванні днопоглиблювальних робіт. В результаті виконаного нами дослідження, на базі відомих закономірностей формування акумулятивного рельєфу мілководних районів океанів та морів, сформульовано методичну рекомендацію стратегічного рівня - уникати здійснення проєктів перетинання кіс, банок, пересипів, томболо штучно створеними каналами. Водночас досвід, отриманий нами в процесі аналізу місця формування проміїни пересипу, що відділяє Дністровський лиман від Чорного моря, дозволяє сформулювати припущення, що за необхідності проведення каналів через коси та банки, це може бути успішно реалізовано в місцях, де коса або банка перетинається флюїдодинамічною структурою іншого напрямку.

Також результатом виконаного дослідження є констатація того, що жолоби природного походження є стабільними протягом тривалого часу і тому після шторму практично не потребують днопоглиблювальних робіт. Найяскравішим прикладом жолобу природного походження є судноплавна прямолінійна депресія вздовж Одесько-Сивашської флюїдодинамічної структури довжиною 35 км, що з'єднує порти на річці Дніпро, порти Дніпробузького лиману з Одеською затокою.

Слід зазначити, що жолоби природного походження успішно використовуються у судноплавстві. Важливо додати, що при проєктуванні морських судноплавних каналів доцільно використання перспективних азимутів, вздовж яких вже утворилися жолоби природного походження, як це було враховано при обранні будівництва підхідного каналу до порту Південний

вздовж напрямку жолобу, який утворився в районі Дністровської банки. Такий принцип проектування днопоглиблювальних робіт можна вважати науково обґрунтованою та інвестиційно привабливою методичною рекомендацією тактичного рівня.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гладких І.І., Капочкіна, Кучеренко Н.В., Капочкін Б.Б. Нова парадигма акумулятивного рельєфоутворення М.Б. у мілководних районах океанів та морів: монографія том 1, Одеса: НУ "ОМА 2021. 201 с."
2. Ткаченко Г.Г. та ін. Про роль діз'юнктивної тектоніки у формуванні берегової лінії і морфології основних ділянок акваторії Чорного та Азовського морів. *Геологія узбережжя і дна Чорного та Азовського морів у межах УРСР.*, вип.4., Київ. 1970. С. 24-33.
3. Ключова В.О., Фуртес В.В. Відображення неотектонічних і сучасних рухів земної кори в морфології північного берега Азовського моря. *Геологія узбережжя і дна Чорного і Азовського морів в межах УРСР.* вип. 4. Київ. 1970. С. 34-39.
4. Демидюк Ю. Н., Потапчук Н. С. Использование линейных элементов облачного покрова для выделения глубинных структур Азово-Черноморского региона. *Геологический журнал.* Киев.1985. С. 76-83.
5. Тяпкин К.Ф. Блоки земной коры с позиций новой гипотезы структурообразования.: *Геологический журнал.* вып. №4, Киев. 1993. С.10-20.
6. Перерва В.М., Лялько В.И., Шпак П.Ф. Новые данные о разломно-блоковой структуре северо-западного шельфа Чорного моря по данным аэрокосмических исследований (в связи с нефтегазоносностью). *Геологический журнал.* вып. №4, 1994. С. 78-84.
7. Перерва В.М., Лялько В.И. Об эндогенной составляющей в температурной дифференциации поверхности Чорного моря. *Геологический журнал.* 1996. вып. №3/4. С. 123-128.
8. Kapochkin B.B., Kucherenko N.V., Isakova J.V., Nagrebetsky V.S. The geomorfollogy of shelf and the submarine fluids discharge. Littoral 98 Fourth International Conference, 14-17 september, 1998 Barcelona, Spain.P. 265-269.
9. Учитель И.Л. Ярошенко В.Н., Гладких И.И., Капочкин Б.Б. Основы неогеодинимики: монография. Одесса: Астропринт, 2000. 144 с.
10. Kapochkin B.B., Kucherenko N.V. The physical model formation accumulative form of the relief of the sea bottom. EGU – Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 2006. 05263.
11. Михайлов В.И., Капочкин Б.Б. Кучеренко Н.В., Капочкина А.Б. Эндогенные причины формирования берега и аккумулятивных форм морского дна. *Метеорологія, кліматологія та гідрологія.* Одеса: Екологія, Вип. 50. 2008. С. 246-251.
12. Михайлов В.И., Дорофеев В.С., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б., Кучеренко Н.В. Современные изменения уровня Чорного моря как основа стратегии строительного освоения прибрежий: монография, Астропринт. Одесса. 2010. 156 с.
13. Капочкин Б.Б., Кучеренко Н.В., Капочкина М.Б. Формирование аккумулятивных форм рельефа морского дна геодинамическими процессами. „*Екологічні проблеми Чорного моря*”. Міжнародна науково-практична конференція. Одеса, 2012 р. С. 58.
14. Капочкин Б. Б. Структурообразование твердой оболочки планеты / Современное понимание Солнечной системы и открытые вопросы. 10 декабря 2013. URL: <http://dna-genealogy.ru/topic/589> (дата звернення 10.11.2024).
15. Kapochkin B., Kucherenko N., Kapochkina M. Regularities in the transformation of coastal and accumulative forms of sea bottom relief, with application for water management *Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications.* | Vol. 2, Iss. 2. 2014. P. 43-48.

16. Капочкина А.Б., Капочкина М.Б. Оценка субмаринной розгрузки в районе Каркинитского залива. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. Київ. 2015. Т.2 (37), С.162-165.
17. Агбунов М.В. Загадки Понта Евксинського (Антична географія Північно-Західного Причорномор'я). М.: Думка, 1985. 160 с.
18. Boating navionics. URL: <https://webapp.navionics.com/#boating@6&key=kstzGwmqzD> (дата звернення 15.11.2024).
19. Глубина Азовского моря. URL: <https://anapacity.com/azovskoe-more-rossiya/glubina-azovskogo-morya.html> (дата звернення 15.11.2024).
20. Карта Азовского моря. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення 15.11.2024).
21. Шнюков Є.Ф., Григор'єв О.В., Юханов І.С., Науменко П.І. Деякі питання геології Акваторії Азовського моря. *Геологія узбережжя і дна Чорного і Азовського морів в межах УРСР*. 1972. Вип. 5. Київ. С.10-14
22. Fault-Horst-Graben. URL: <https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Fault-Horst-Graben.svg> (дата звернення 20.11.2024).

REFERENCES

1. Gladkikh I.I., Kapochkina, Kucherenko N.V., Kapochkin B.B. A new paradigm of accumulative relief formation of M.B. in shallow water areas of oceans and seas: monograph volume 1, Odesa: National University "OMA 2021. 201 p."
2. Tkachenko G.G. et al. On the role of disjunctive tectonics in the formation of the coastline and morphology of the main sections of the Black and Azov Seas. *Geology of the coast and bottom of the Black and Azov Seas within the borders of the Ukrainian SSR*, vol. 4, Kyiv. 1970. pp. 24-33.
3. Klyueva V.O., Furtes V.V. Reflection of neotectonic and modern movements of the earth's crust in the morphology of the northern coast of the Sea of Azov. *Geology of the coast and bottom of the Black and Azov Seas within the borders of the Ukrainian SSR*. Vol. 4. Kyiv. 1970. P. 34-39.
4. Demidyuk Yu. N., Potapchuk N. S. Using linear elements of cloud cover to identify deep structures of the Azov-Black Sea region. *Geological journal*. Kiev. 1985. P. 76-83.
5. Tyapkin K.F. Blocks of the Earth's Crust from the Position of the New Hypothesis of Structure Formation: *Geological Journal*. Issue No. 4, Kyiv. 1993. P. 10-20.
6. Pererva V.M., Lyalko V.I., Shpak P.F. New data on the fault-block structure of the northwestern shelf of the Black Sea based on aerospace research (in connection with oil and gas potential). *Geological journal*. issue No. 4, 1994. pp. 78-84.
7. Pererva V.M., Lyalko V.I. On the endogenous component in the temperature differentiation of the Black Sea surface. *Geological journal*. 1996. issue №3/4. P. 123-128.
8. Kapochkin B.B., Kucherenko N.V., Isakova J.V., Nagrebetsky V.S. The geomorphology of shelf and the submarine fluids discharge. *Littoral 98 Fourth International Conference*, 14-17 september, 1998 Barcelona, Spain. P. 265-269.
9. Teacher I.L. Yaroshenko V.N., Gladkikh I.I., Kapochkin B.B. *Fundamentals of neogeodynamics: monograph*. Odesa: Astroprint, 2000. 144 p.
10. Kapochkin B.B., Kucherenko N.V. The physical model formation accumulative form of the relief of the sea bottom. *EGU – Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 2006. 05263.
11. Mikhailov V.I., Kapochkin B.B. Kucherenko N.V., Kapochkina A.B. Endogenous causes of the formation of the coast and accumulative forms of the seabed. *Meteorology, climatology and hydrology*. Odesa: Ecology, Vol. 50. 2008. pp. 246-251.
12. Mikhailov V.I., Dorofeev V.S., Yaroshenko V.N., Kapochkin B.B., Kucherenko N.V. Modern changes in the Black Sea level as a basis for the strategy of coastal construction development: monograph, Astroprint. Odesa. 2010. 156 p.

13. Kapochkin B.B., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B. Formation of accumulative forms of seabed relief by geodynamic processes. "Ecological problems of the Black Sea". International scientific and practical conference. Odesa, 2012 P. 58.
14. Kapochkin B. B. Structure formation of the solid shell of the planet. *Modern understanding of the Solar system and open questions*. December 10, 2013. URL: <http://dna-genealogy.ru/topic/589> (дата звернення 10.11.2024).
15. Kapochkin B., Kucherenko N., Kapochkina M. Regularities in the transformation of coastal and accumulative forms of sea bottom relief, with application for water management_Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications. | Vol. 2, Iss. 2. 2014. P. 43-48.
16. Kapochkina A.B., Kapochkina M.B. Assessment of groundwater discharge in the Karkinitsky Bay area. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*. Kyiv. 2015. T.2 (37), pp. 162-165.
17. 17. Agbunov M.V. Mysteries of Pontus Euxinsky (Ancient geography of the Pivnichno-Zakhidny Black Sea region). M.: Dumka, 1985. 160 p.
18. Boating navionics. URL: <https://webapp.navionics.com/#boating@6&key=kstzGwmqzD> (date of application 15.11.2024).
19. The depth of the Sea of Azov. URL: <https://anapacity.com/azovskoe-more-rossiya/glubina-azovskogo-morya.html> (date of application 15.11.2024).
20. Map of the Sea of Azov. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (date of application 15.11.2024).
21. Shnyukov E.F., Grigoriev O.V., Yukhanov I.S., Naumenko P.I. Some questions of geology of the Azov Sea area. *Geology of the coast and bottom of the Black and Azov Seas within the Ukrainian SSR*. 1972. Issue 5. Kyiv. P.10-14
22. Fault-Horst-Graben. URL: <https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Fault-Horst-Graben.svg> (date of application 20.11.2024).

Naumenko A.V., Kapochkina M.B.

THEORY AND PRACTICE OF OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF MARINE WORKS ON DREDGING THE BOTTOM.

In recent decades, there has been a rapid development of the endogenous theory of relief formation in shallow-water areas with an accumulative type of seabed relief. This has created conditions for the practical implementation of the obtained scientific results, one of the directions of which is dredging. The main goal of dredging at sea is to ensure the safety of navigation in shallow-water areas on the approaches to ports and along shipping lanes. If in past years the design of dredging works (approach channels, channels, etc.) was carried out according to the conceptual principles of minimizing their length, then recently technical solutions have appeared to ensure stable conditions of navigational safety based on the principle of minimal silting of dredging objects. As an example, it is possible to cite a patent for a utility model of Ukraine No. 158155 entitled "Method of determining the location of the route of the approach channel".

Thus, there is a basis for stating a paradigm shift in the basic principles of dredging works. Our research is devoted to solving the problem of optimizing the design of marine dredging works by implementing scientific results obtained within the framework of the endogenous theory of relief formation. The theoretical justification of the endogenous theory of relief formation in the Sea of Azov, the Kerch Strait and the southwestern part of the Black Sea is considered as a basis for developing a methodology for taking into account the influence of endogenous processes and fluid-dynamic structures on the silting of dredging objects.

Keywords: marine navigation, navigation, hydrography, geomorphology, increasing the efficiency of dredging works, accumulative relief, navigable channels, approach channels.

Руснак Д.Ю.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ЩОДО ЕМІСІЇ В АТМОСФЕРУ СІРЧИСТИХ СПОЛУК З ВИПУСКНИМИ ГАЗАМИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Виконано аналіз методів, що забезпечують виконання вимог щодо емісії в атмосферу сірчистих сполук з випускними газами суднових дизелів. Визначено, що під час забезпечення суднового пропульсивного комплексу та суднового допоміжного обладнання необхідною енергією, дизелі викидають в атмосферу велику кількість випускних газів, які разом з небезпечними складовими містять токсичні домішки. До них відносяться оксиди азоту, оксиди сірки, монооксид вуглецю, а також незгорілі вуглеводні. Мінімізація викидів оксидів сірки, які потрапляють в атмосферу з випускними газами суднових дизелів, є актуальним завданням, на її розв'язання спрямовані численні дослідження та розробки. Зазначено, що у Європейському Союзі з метою зниження рівня токсичності випускних газів дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту використовують три напрямку: оптимізація та вдосконалення конструктивних особливостей дизелів; покращення експлуатаційних характеристик та якості палива; встановлення на дизелях нейтралізаторів випускних газів, що забезпечують видалення з них шкідливих компонентів. Саме цим напрямкам присвячено аналіз виконаних способів, що сприяють зниженню оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів. Як такі способи проаналізовані використання морського газойлю чи дистилатів; створення сумісних низьосірчистих палив; використання важких високосірчистих палив зі скруббером очищення випускних газів від оксидів сірки; використання альтернативних видів палива. Для кожного з нагаданих способів визначені переваги та недоліки, а також виконана оцінка доцільності їх використання на сучасному етапі розвитку енергетичних установок суден морського та внутрішнього водного транспорту. Зазначено, що скорочення викидів оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів досягається завдяки: використанню морського газойлю чи дистилатів, а також низьосірчистих сумішей палив (вміст сірки в яких не перевищує 0,1 % за масою); використанню природного газу; використанню палива не нафтового походження; а також використанню важких палив (вміст сірки в яких може досягати 3,5 % за масою) з обов'язковим одночасним та безперервним очищенням випускних газів зі скруббером, що забезпечує видалення оксидів сірки з випускних газів.

Ключові слова: важке паливо, випускні гази, вміст сірки в паліві, дистилатне паливо, екологічні показники, емісія оксидів сірки, концентрація оксидів азоту, морський транспорт, паливо з низьким вмістом сірки, скрубберне очищення випускних газів, судновий дизель.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Екологічна безпека судна є комплексними показниками та включає: безпечне управління баластними операціями, підтримання безпечного технічного стану корпусу судна, забезпечення вимог міжнародних конвенцій щодо захисту довкілля від забруднень [1-4]. Особливо актуальним є управління екологічною безпекою під час знаходження суден морського транспорту в 12-ти мильній прибережній зоні, у спеціальних екологічних районах та акваторіях внутрішніх морів [5-7]. Під час забезпечення суднового пропульсивного комплексу та суднового допоміжного обладнання необхідною енергією, дизелі викидають в атмосферу велику кількість випускних газів, які разом з небезпечними складовими містять токсичні домішки. До них відносяться оксиди азоту NO_x , оксиди сірки SO_x , монооксид вуглецю CO , а також незгорілі вуглеводні C_nH_m . Мінімізація викидів NO_x , SO_x , CO , які потрапляють в атмосферу з випускними газами суднових дизелів, є актуальним завданням, на її розв'язання спрямовані численні дослідження та розробки.

Основним методом зниження емісії оксидів сірки із випускними газами є використання палива із вмістом сірки до 0,1 % за масою. Відповідно до міжнародного стандарту ISO8217 "Fuel Standard

for marine distillate fuels” ці сорти суднових палив відносяться до класу Marine Gas Oil та характеризуються найбільшою вартістю порівняно з паливами інших класів. Використання таких палив знижує економічну ефективність суден морського транспорту. Це є однією з причин використання скрубберного очищення випускних газів, при якому можливе використання палива із вмістом сірки до 3,5 % [8-11].

Додаткове очищення випускних газів суднових дизелів в скруберах суттєво поширює можливість використання морських сортів палива з підвищеним вмістом сірки, сприяє тим самим зменшенню експлуатаційних витрат на придбання палива. Одночасно з цим системи скрубберного очищення вимагають додаткових витрат енергії на обслуговування обладнання, що входить до їх складу, а також є підставою збільшення опору в газопускній магістралі дизелів та пов'язаного з цим зменшення ефективної потужності дизелів [12-15].

Наведене підтверджує актуальність досліджень, спрямованих на зниження концентрації шкідливих компонентів (насамперед оксидів азоту та сірки) в випускних газах суднових дизелів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із пріоритетних напрямів діяльності Європейського Союзу (ЄС) є створення «зеленої», екологічно безпечної Зони для країн, що входять до його складу.

У ЄС з метою зниження рівня токсичності випускних газів дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту використовують три напрямку:

- 1) оптимізація та вдосконалення конструктивних особливостей дизелів [16-18];
- 2) покращення експлуатаційних характеристик та якості палива, а саме, розробка та використання високоцетанових палив, синтетичних присадок до палив нафтового походження, використання нафтових палив з мінімальним вмістом сірки, що дозволяє знизити викиди токсичних речовин та сполук [19-21];
- 3) встановлення на дизелях нейтралізаторів випускних газів, що забезпечують видалення з них шкідливих компонентів [22-24].

У Північній частині ЄС для зниження рівня токсичності випускних газів суднових енергетичних установок (а саме, під час знаходження суден в акваторіях Балтійського та Північного морів, а також у протоці Ла-Манш) використовують лише один напрямок – поліпшення якості судового дизельного палива. Це відображається у використанні в цих районах (зонах особливого контролю викидів сірчистих сполук Sulphur Emission Control Areas – SECA) виключно палива з низьким вмістом сірки (менш за 0,1 %) [23-26].

Даній проблемі присвячено увагу міжнародних організацій: Міжнародної морської організації – International Maritime Organization (IMO), Міжнародної палати судноплавства – International Chamber of Shipping (ICS), Міжнародної організації зі стандартизації – International Standard Organization (ISO), класифікаційного товариства Det Norske Veritas та Germanischer Lloyd (DNV GL). При цьому враховуються останні нормативні зміни та заходи щодо забезпечення дотримання вимог до викидів сполук сірки, а також технологічні розробки для альтернативних рішень щодо розв'язання проблеми скорочення викидів SO_x [27-29].

З 1 січня 2020 року набрала чинності глава IV, правило 22 до Додатка VI Міжнародної конвенції по запобіганню забрудненню з суден (МАРПОЛ) щодо обмеження викидів сірчистих сполук, що містяться у випускних газах суднових енергетичних установок. Це досягається за рахунок використання низькосірчистого судового палива (не більше 0,1 % за масою – Low sulphur fuel oil, LSFO) у зонах особливого контролю. Перераховані морські басейни та райони SO_x Emission Control Areas – SECA та ECA – зони контролю за викидами сполук сірки, де в першу чергу, контролюються вибори оксидів сірки та де встановлені обмеження на вміст сіркосполучень у судовому паливі. До зони SECA входять:

- акваторії Північного та Балтійського морів, протоки Ла-Манш (рис. 1) [31-33];
- до зони ECA входять морські акваторії, прилеглі до Західного та Східного узбережжя Північної Америки, Канади, і навіть Карибські острова (рис. 2) [34-36].



Рисунок 1 – Європейська зона особливого контролю SECA для міжнародного судноплавства



Рисунок 2 – Світові зони особливого контролю SECA для міжнародного судноплавства

Після огляду допустимості застосування сумісного малосірчистого палива, ІМО було прийнято рішення про глобальне обмеження вмісту сірки в паливі до 0,5 % для всіх районів плавання, яке набуло чинності з 2020 р. Ця вимога вводиться на додаток до обмежень у 0,1 % сірки у Північноамериканських та Американських районах Карибського басейну, Північного та Балтійського морів. При цьому суднам, на енергетичних установках яких встановлені спеціальні системи очищення випускних газів від сполук сірки, дозволено не припиняти використання палива з підвищеним вмістом сірки (Heavy sulphur fuel oil – HSFO), таблиця 1 [37, 38].

Таблиця 1 – Регіональні та глобальні вимоги щодо вмісту сірки в морському паливі

Регіон	Межа за вмістом сірки у паливі	Можливість використання скрубєрів
Всі райони плавання в міжнародних водах	0,5 %	Так
Зони контролю (SECA)	0,1 %	Так
ЄС	0,1 % у всіх портових акваторіях	У деяких країнах обмежене використання відкритого циклу
Китай	0,5 % в національних водах в 12-мильної зоні	Так
США, Каліфорнія	0,1 %, в 24-мильної зоні узбережжя	Ні, тільки як виняток у разі окремої заявки та додаткових досліджень

Суттєвою поправкою до регулювання є «Угода про заборону перевезення HSFO у паливній системі», за винятком суден, обладнаних скрубєрами. Як і раніше, дозволено перевозити HSFO як вантаж, проте забороняється мати HSFO в резервуарах паливних систем у разі, якщо не використовуються скрубєри. Ця поправка дозволяє затримувати судна, які використовують невідповідне паливо, при проведенні державного контролю порту – Port State Control (PSC), без необхідності перевірки незалежно від того, було воно використане чи ні. Очікується, що такі виправлення дозволять значно знизити ймовірність порушення вимог екологічного законодавства у міжнародних водах.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження був аналіз методів забезпечення вимог щодо емісії в атмосферу сірчистих сполук з випускними газами суднових дизелів та оцінка можливості їх використання в енергетичних установках суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи нові екологічні вимоги до емісії оксидів сірки, кожен судновласник вибирає свою стратегію відповідності СЕУ нормативним положенням щодо викидів. Універсальних рішень проблеми не існує, і найкращий варіант значною мірою залежить від типу судна, його розміру, експлуатаційних характеристик і того, які види палива доступні в короткі та тривалі терміни. Для варіантів, що вимагають модифікації, важливо враховувати складність установки, інтенсивність та ефективність експлуатації, а також термін експлуатації судна, що залишився. Ускладнюючим фактором при розгляді варіантів відповідності є регіональні та місцеві правила, які в деяких випадках передбачають суворіші вимоги, а в інших – заборону деяких варіантів відповідності. Наведемо аналіз доступних варіантів досягнення відповідності вимогам Додатку VI Міжнародної конвенції МАРПОЛ щодо вмісту в паливі, яке використовується в енергетичних установках суден морського та внутрішнього водного транспорту, сірки, а також щодо контролю та обмеження викидів сірковмісних продуктів з випускними газами [39].

Використання морського газойлю чи дистилатів

Перехід на дистилатне або Marine Gas Oil (MGO) паливо, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %, означатиме значне збільшення витрат за статтею паливно-мастильних матеріалів, а також може вимагати модернізацію енергетичної установки в частині паливопідготовки через значно нижчу в'язкість палива. Паливні танки, які раніше використовуються для HSFO, повинні бути ретельно очищені до бункерування MGO, щоб уникнути проблем забруднення і, як наслідок, порушення вимог МАРПОЛ. Основна проблема використання MGO або дистилатів пов'язана з їхньою обмеженою доступністю та вартістю на ринку палива. На теперішній час ще існують морські порти, бункерування в яких паливом з низьким вмістом сірки обмежено або вимагає попереднього замовлення. Багато аналітиків вважають, що різниця цін між HSFO та дистилатами залишатиметься

дуже високою на продовженні тривалого періоду (до 5...7 років), що значно збільшить вартість палива та зробить альтернативні варіанти фінансово привабливими. Основною перевагою палива з низьким вмістом сірки є можливість його використання для судових дизелів будь-якого класу – двох- та чотиритактних, мало-, середньо- та високообертових. Також не викликає труднощів під час використання палива MGO в судових парових котлах [40].

Створення сумісних низькосірчистих палив

Паливні суміші з низьким вмістом сірки доступні на ринку у вигляді різних продуктів. При цьому до складу подібних сумішей включені як палива з низьким (до 0,1 % вмістом сірки) та наднизьким (до 0,01...0,03 % вмістом сірки – Very low sulphur fuel oil, VLSFO), а також палива HSFO з вмістом сірки більш за 0,5 %, які пройшли додаткову десульфурізацію. Однак установки для десульфурзації дуже дорогі, а їхній монтаж, впровадження та налагодження можуть зайняти певний проміжок часу до того, як вони почнуть функціонувати з повною продуктивністю. З подібними проблемами стикається судовий екіпаж в разі встановлення мобільних установок з десульфурізації палива безпосередньо на борту судна. Таким чином, більшість нафтопереробних заводів вважають за краще переробляти високосортні види палива, а не інвестувати в системи десульфурзації. Можна вважати, що для задоволення попиту виготовлять нові паливні суміші, які відповідатимуть необхідній межі вмісту сірки менше 0,5 %, при зниженні вартості на 10...15 % порівняно з прямими видами палива. Цілком ймовірно, що при використанні нових паливних сумішей виникнуть проблеми сумісності і це зробить технологічну підготовку палива дуже важливим процесом для безпечної експлуатації теплових двигунів енергетичної установки. Інші проблеми, пов'язані з видом палива, що розглядається, включають довготривалу стабільність подібних сумішей, їх підвищену схильність до окислення, а також відносно низьку температуру спалаху. Велике значення набуває контроль якості під час бункерування, необхідний для того, щоб забезпечити отримання палива відповідно до специфікації. Аналогічно MGO, паливні суміші VLSFO та HSFO, вміст сірки в яких не перевищує 0,1 % можуть використовуватися для більшості конфігурацій дизелів, що є перевагою. Одночасно з цим, їх виготовлення вимагає додаткової попередньої десульфурізації HSFO складових (що сприяє невизначеності їхньої кінцевої вартості); їх отримання обмежується здатність бункерованих баз до їх постачання; їх використання може створювати операційні проблеми під змішування через відмінність фізико-хімічних характеристик чи несумісності [41].

Використання важких палив HSFO зі скруббером SO_x очищення випускних газів

Використання HSFO, як і раніше, можливе і в теперішній час – після набуття чинності вимог щодо обмеження вмісту сірки в паливі після 01.01.2020 р. Однак, для відповідності нормам в цьому випадку необхідно встановлення в конструкцію газопускних трактів енергетичної установки пристроїв з технологією очищення випускних газів, широко відомих як скрубери SO_x. Використання системи скрубберного очищення є одним з найпоширеніших способів зниження емісії SO_x в випускних газах судових дизелів. З метою зниження викидів SO_x можливо використання системи очищення випускних газів дизеля за рахунок їх промивання прісною водою, в яку додається каустична сода NaOH. Схема системи надана на рис. 3. До системи входить очищувач газів, якій встановлено на випускній трубі після утилізаційного котла та допоміжне обладнання, яке його обслуговує.

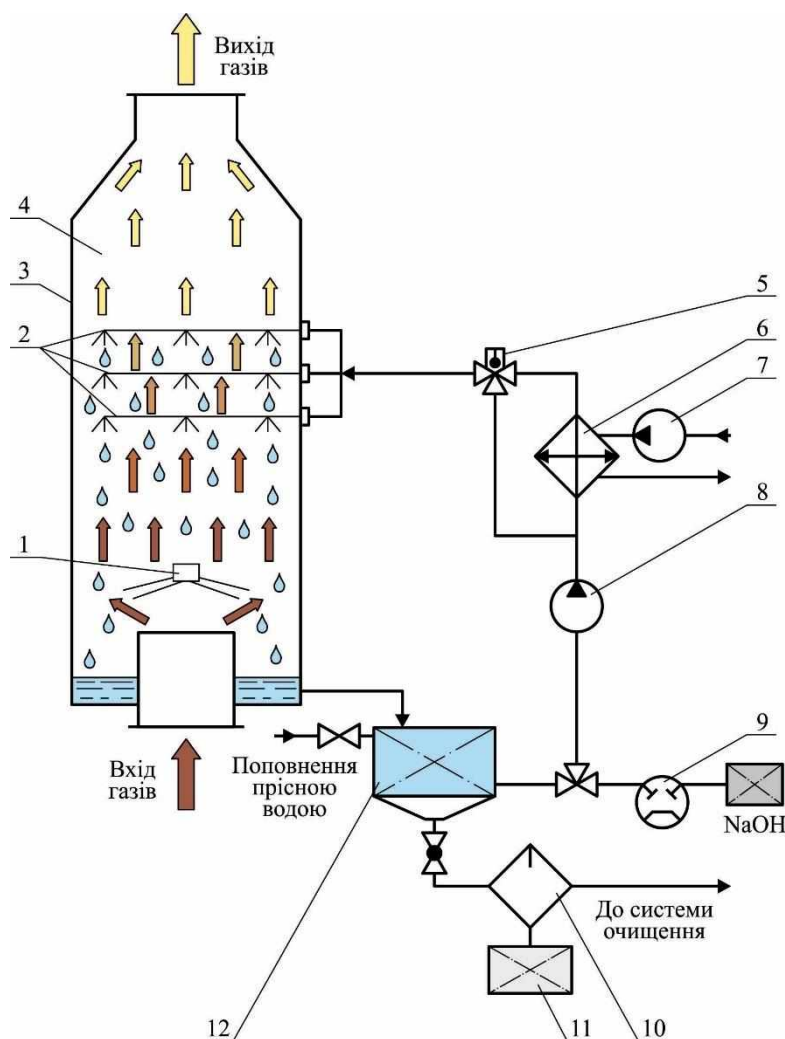


Рисунок 3 – Система очищення випускних газів дизеля:

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

Система працює в такій спосіб. В середній частині очищувача розміщені три ярусу зрошення прісною водою, яка розпилюється всередині корпусу 3 за допомогою форсунок 2. Вода до очисника потрапляє з циркуляційної цистерни 12 за допомогою насоса 8 через охолоджувач 6. Температура води контролюється терморегулюючим клапаном 5. Каустична сода NaOH для нейтралізації SO_x потрапляє в систему за допомогою насоса-дозатора 9. Газ з випускної труби потрапляють до нижньої частини очищувача газів, рівномірно розподіляються за допомогою розпилювача 1 та рухаються вгору по корпусу 3. Краплі водяного розчину, що утворюються, падають під дією сили тяжіння назустріч забрудненим газам, змочують тверді домішки та таким чином відокремлюють їх від потоку газів. Через контакт NaOH з SO_x здійснюється хімічна реакція, як результат якої утворюються сульфати натрію Na_2SO_4 . Очищені газы відділяються від крапель води в секції 4 та відводяться через газохід, що розміщено в верхній частині очищувача. Відпрацьована вода рухається самопливом назад в циркуляційну цистерну.

Поповнення цистерни прісної води необхідно в такій кількості, щоб компенсувати випарену та викинути вологу. Шлам, що збирається в кінчій частині цистерни 12, періодично відділяється від води в сепараторі 10, збирається в шламовій цистерні та здається на утилізаційні берегові станції

або судна-збиральники. Вода з сепаратора 10 спрямовується до суднової системи очищення. Нейтралізація та очищення газів виконуються під час роботи дизеля безперервно.

Установка скрубєрів не вимагає жодних змін у конструкції двигунів енергетичної установки або систем паливopідготовки та паливopодачі. Однак загалом така модернізація суднової енергетичної установки може виявитися досить складною та дорогою, оскільки існує значна інвестиційна вартість установки обладнання, яка підсумовується з експлуатаційними витратами, пов'язаними зі збільшенням споживання енергії, можливою потребою у хімічних витратних матеріалах, а також із витратами на обробку та видалення осаду.

До основні переваг системи з скрубєром SO_x очищення випускних газів відносяться: можливість використання палива HSFO з підвищеним (до 3,5 %) вмістом сірки; можливість переобладнання з умовою вдосконалення технології та характеристик реагентів, що використовуються для нейтралізації сірчистих сполук; додаткове очищення випускних газів від твердих частинок та незгорілих вуглеводнів.

Основні недоліки системи: значні початкові інвестиції (2...10 млн. \$USA відносно від продуктивності та потужності енергетичної установки для якої вона використовується); обов'язкове очищення всіх випускних газів всіх теплових двигунів (головних, допоміжних та котлів) в яких використовуються HSFO; необхідність наявності додаткового міста для встановлення; додаткові витрати на хімікати; забезпечення інтеграція у систему управління; необхідність проведення безперервного моніторингу складу випускних газів [42].

Використання зрідженого природний як основного палива

Цілком очевидним є той факт, що використання зрідженого природного газу (Liquefied Natural Gas – LNG) як основного палива з часом отримає нові переваги у світлі нових обмежень ІМО щодо викидів сірки. LNG як суднове паливо є технічно обґрунтованим рішенням, а бункеровочна інфраструктура швидко розвивається по всьому світу. Традиційні нафтові палива залишатимуться основним видом палива для більшості існуючих суден у найближчому майбутньому, проте комерційні можливості LNG перспективні головним чином нових проектів судів, але у деяких випадках також цікаві й у проектів конверсії і модернізації. При цьому переведення теплових двигунів енергетичної установки на LNG слід проводити лише на основі ретельного аналізу різнобічної інформації. Крім комерційних аспектів, основним аргументом на користь вибору LNG як заміну звичайних нафтових палив є суттєве скорочення загального забруднення повітря від викидів як SO_x та NO_x, і навіть викидів твердих частинок (Particulate Matter – PM). Повне усунення викидів SO_x і PM – потенційна можливість скорочення викидів NO_x до 85% – сприяє використанню LNG особливо у зонах контролю. Крім того, LNG може знизити викиди парникових газів на 10...20 % залежно від технології двигуна. Таким чином, використання LNG виявляє безліч переваг як для здоров'я людини, так і для збереження довкілля. Крім того, воно також позитивно впливає на коефіцієнт енергоефективності судна (Energy Efficiency Design Index – EEDI). Сьогодні двигуни, які здатні використовувати газоподібне паливо, охоплюють широкий діапазон потужності. Таким чином, газові двигуни, а також двопаливні чотиритактні та двотактні двигуни (газодизелі) підходять практично для всіх типів суден.

Переваги використання LNG полягають у високих екологічних показниках дизелів (а саме емісії оксидів сірки та азоту); можливість забезпечення вимог Tier III МАРПОЛ щодо викидів NO_x (найбільш суворого рівня, що відноситься до суден, збудованих після 2016 р); позитивний вплив на EEDI.

Недоліками використання LNG як основного палива є: високі інвестиційні витрати 3...30 млн дол. \$USA на встановлення нового обладнання; обмежена бункеровочна інфраструктура; можливість появи у випускних газах метану (якій сприяє глобальному потепленню); необхідність додаткових суднових об'ємів для зберігання через менший питомий об'єм LNG; необхідність підтримання вибухонебезпечних умов зберігання та використання [43].

Інші альтернативні види палива

Існує безліч нових видів палива, які також можуть розглядатися як варіанти відповідності вимогам щодо глобального обмеження викидів сірки. Найбільш поширеними є метанол, різні види біопалива та зріджений газ – пропан-бутанові суміші – Liquefied Petroleum Gas (LPG). Вважається,

що зазначені види палив дуже мало впливають на світовий ринок, але вони можуть розглядатися як альтернативні варіанти у випадках, коли їх постачання легко можна здійснити.

В даний час існує кілька суден, що працюють на метанолі та зрідженому газу (LNG та LPG) як основному паливі. Проте для переходу на ці види палива (крім деяких видів біопалива) знадобиться адаптація двигунів, а також створення специфічних паливних систем та систем управління.

Для невеликих суден з малою дальністю плавання технічно здійсненним рішенням є двигуни або паливні елементи, що працюють на водні, і можна розглядати електроаккумуляторні системи. Такі енергетичні установки вже перебувають у експлуатації і забезпечують переваги операцій із нульовим рівнем викидів [44].

Висновки. Як результат виконаних досліджень визначимо наступне.

1. Європейські та Світові природоохоронні організації, а також міжнародні організації, що виконують нагляд та класифікацію морських та річкових засобів транспорту, а також їх енергетичних установок висувають суворі вимоги щодо екологічних показників роботи суднових дизелів, насамперед до емісії з випускними газами оксидів азоту та сірки. Саме оксиди азоту та сірки є не лише джерелом постійного забруднення атмосфери, але також відносяться до токсичних компонентів, та найбільш негативно впливають на довкілля та людину.

3. Скорочення викидів оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів досягається завдяки: використанню морського газойлю чи дистилатів, а також низькосірчистих сумішей палив (вміст сірки в яких не перевищує 0,1 % за масою); використанню природного газу; використанню альтернативних видів палива (не нафтового походження); а також використанню важких палив (вміст сірки в яких може досягати 3,5 % за масою) з обов'язковим одночасним та безперервним очищенням випускних газів зі скруббером, що забезпечує видалення оксидів сірки з випускних газів.

4. Використання скрубберного очищення випускних газів від домішок сірки є одним з надєфективних методів попередження забруднення довкілля, тому наукові розробки, що стосуються цього методу, відрізняються актуальністю та доцільністю виконання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
2. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
3. 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.
4. 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.
5. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
6. 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.
7. 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.

8. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal.* – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
9. 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. Тимошук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.
11. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology.* – 2022. – Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
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. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
13. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
14. 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.
15. Сагін С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // *Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сб.* – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ«ОМА». – С. 79-89.
16. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2023. – Вип. 28. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
17. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник.* – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.
18. Zablotsky Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1.* August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
19. 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.
20. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // *Проблемы техники : науч.-виробн. журнал.* – 2012. – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.
21. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // *Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник.* – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
22. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1.* August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
23. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4).* – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.

24. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
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. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
27. 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.
28. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.
29. 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.
30. 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>.
31. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259.
32. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78-88.
33. 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.
34. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник, 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
35. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
36. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
37. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pířtěk V., Kuřcera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
38. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
39. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.

40. 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: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.

41. 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/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.

42. 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.

43. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689

44. 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.

REFERENCES

1. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // Water transport. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.

2. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // Water transport. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.

3. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // Water transport. – 2023. – № 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.

4. 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.

5. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // Water transport. – 2022. – № 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.

6. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.

7. 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.

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

9. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Ensuring operational performance of diesel engines of marine vessels when using fuel of biological origin // Water transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

10. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // Water Transport. – 2020. – № 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.

11. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol. 69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
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. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
13. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport*. – 2022. – № 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
14. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
15. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship facilities*. – 2019. – № 25. – P. 79-89.
16. Levynskiy M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Automation of ship technical facilities*. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
17. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Evaluation of operational properties of lubricating and cooling liquids of marine technical equipment // *Automation of ship technical facilities*. – 2016. – Vol. 22. – P. 66-74.
18. Zablotsky Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”*. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
19. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // *Ship power plants*. – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.
20. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.
21. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
22. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”*. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
23. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
24. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants*. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
25. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // *Water Transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
26. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Direction of the injection process during the use of fuel mixture that include fuel of biological origin in marine diesel engines *Water transport*. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
27. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
28. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.

29. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
30. 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>.
31. Kuropyatnyk O.A. Ensuring environmental performance indicators of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”*. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 146-153. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36259.
32. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // *Problems of technical*. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.
33. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.
34. Kuropyatnyk O.O., Sagin S.V. Controlling the exhaust gases of marine diesel engines to ensure environmental performance // *Automation of ship technical facilities*. – 2018. – № 24. – P. 72-80.
35. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // *Automation of ship facilities*. – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
36. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
37. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
38. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
39. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel DSS. // *Water transport*. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
40. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
41. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
42. 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
43. Kuropyatnyk O.A. Reducing the emission of nitrogen oxides from marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”* January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 154-160. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53689
44. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. [doi: 10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).

Rusnak D.Y.**ANALYSIS OF METHODS FOR ENSURING REQUIREMENTS FOR EMISSIONS OF SULFUR COMPOUNDS INTO THE ATMOSPHERE WITH EXHAUST GASES FROM MARINE DIESEL ENGINES**

An analysis of methods ensuring compliance with the requirements for emissions of sulfur compounds into the atmosphere with exhaust gases from ship diesel engines has been performed. It has been determined that when providing the ship's propulsion system and ship's auxiliary equipment with the necessary energy, diesel engines emit a large amount of exhaust gases into the atmosphere, which, together with hazardous components, contain toxic impurities. These include nitrogen oxides, sulfur oxides, carbon monoxide, and unburned hydrocarbons. Minimizing emissions of sulfur oxides that enter the atmosphere with exhaust gases from ship diesel engines is an urgent task, and numerous research and development projects are aimed at solving it. It is noted that in the European Union, in order to reduce the level of toxicity of exhaust gases from diesel engines of sea and inland waterway transport vessels, three directions are used: optimization and improvement of design features of diesel engines; improvement of operational characteristics and fuel quality; installation of exhaust gas neutralizers on diesel engines that ensure the removal of harmful components from them. It is to these areas that the analysis of implemented methods that contribute to the reduction of sulfur oxides in the exhaust gases of ship diesel engines is devoted. As such methods, the use of marine gas oil or distillates; the creation of compatible low-sulfur fuels; the use of heavy high-sulfur fuels with a scrubber for cleaning exhaust gases from sulfur oxides; the use of alternative fuels are analyzed. For each of the mentioned methods, advantages and disadvantages are determined, and the feasibility of their use at the current stage of development of power plants for ships of marine and inland water transport is also assessed. It is noted that the reduction of sulfur oxide emissions in the exhaust gases of ship diesel engines is achieved through: the use of marine gas oil or distillates, as well as low-sulfur fuel mixtures (the sulfur content in which does not exceed 0.1% by mass); the use of natural gas; the use of non-petroleum fuels; and the use of heavy fuels (the sulfur content of which can reach 3.5% by weight) with mandatory simultaneous and continuous exhaust gas cleaning with a scrubber, which ensures the removal of sulfur oxides from the exhaust gases.

Keywords: heavy fuel, exhaust gases, sulfur content in fuel, distillate fuel, environmental performance, sulfur oxide emissions, nitrogen oxide concentration, maritime transport, low-sulfur fuel, exhaust gas scrubber cleaning, marine diesel.

*Девіліт 3.П.***ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ**

У статті розглянуто основні аспекти застосування штучного інтелекту (ШІ) в освітньому процесі. Основна увага приділяється персоналізації навчання, автоматизації оцінювання та вдосконаленню викладацької діяльності через використання інтелектуальних систем. Проведено SWOT-аналіз впровадження ШІ для трьох ключових груп учасників освітнього процесу: студентів, викладачів і стейкхолдерів. У роботі акцентується на перевагах і викликах, пов'язаних із використанням ШІ, таких як персоналізація освітніх траєкторій, ефективність зворотного зв'язку, етичні аспекти та цифрова нерівність. Результати дослідження допомагають зрозуміти, як інтеграція ШІ сприяє підвищенню якості освіти, професійному розвитку викладачів і підготовці студентів до роботи в умовах цифрової трансформації.

Ключові слова: штучний інтелект, освітній процес, SWOT-аналіз, персоналізоване навчання, автоматизація

Постановка проблеми. Сучасний світ освіти перебуває у стані глибокої трансформації, спричиненої стрімким розвитком цифрових технологій та інтеграцією штучного інтелекту (ШІ) у різні аспекти навчального процесу. Традиційні методики навчання, що базуються на пасивному засвоєнні знань, поступаються місцем активним і адаптивним підходам, які орієнтовані на індивідуальні потреби учнів. У зв'язку з цим виникає необхідність осмислення нових можливостей і викликів, що супроводжують впровадження ШІ в освітню практику.

Застосування штучного інтелекту в освітньому процесі відкриває широкі перспективи для підвищення ефективності навчання, забезпечення персоналізованого підходу до кожного студента та автоматизації рутинних завдань викладачів. Зокрема, інтерактивні платформи, адаптивні навчальні системи та інтелектуальні асистенти надають можливість гнучко налаштовувати освітній контент відповідно до потреб студентів. Однак, ці інновації також викликають низку проблем, пов'язаних із етичними аспектами, цифровою нерівністю та захистом персональних даних.

У контексті викладання до прикладу для студентів-економістів та менеджерів питання впровадження ШІ набуває особливої актуальності, оскільки ці спеціалісти формують майбутнє бізнесу та управління. Вивчення та використання інструментів ШІ у навчанні можуть допомогти їм розвивати аналітичне мислення, приймати обґрунтовані рішення на основі даних і адаптуватися до швидкоплинних змін ринкових умов.

Проте, попри численні переваги, інтеграція ШІ у викладання має низку викликів, які потребують дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Програми штучного інтелекту (ШІ) відіграють важливу роль у трансформації освітніх систем, сприяючи вирішенню проблем доступу до освіти та покращенню якості навчання. ШІ активно впроваджується у соціальні роботи, розумне навчання та інтелектуальні системи репетиторства, створюючи можливості для доступного та ефективного навчання. Крім того, автори зазначають, що ШІ здатний покращити навчальний процес за рахунок автоматизації рутинних завдань, таких як оцінювання знань, віртуальне моделювання та навчальна аналітика [1].

Одні автори [2] акцентують увагу на тому, що ШІ не тільки підвищує ефективність навчання студентів, а й зменшує навантаження на викладачів і адміністративний персонал. Наприклад, автоматизовані системи можуть аналізувати дані про навчальний процес, оцінювати прогрес студентів та навіть передбачати потенційні проблеми у навчанні. Це дозволяє викладачам більше

зосереджуватися на педагогічній діяльності.

Інші [3] розглядають роль ІІІ у підтримці навчання впродовж життя. Адаптивні навчальні середовища, створені на основі ІІІ, забезпечують гнучкість та інклюзивність. Ці інструменти допомагають студентам із різними потребами отримувати доступ до освітніх ресурсів, розроблених спеціально для їхніх індивідуальних вимог.

Одним із найважливіших аспектів застосування ІІІ в освіті є персоналізація навчання. У роботі [4] зазначається, що ІІІ дозволяє створювати персоналізовані траєкторії навчання, адаптуючи навчальний контент до потреб студентів. Також автори підкреслюють значення зворотного зв'язку в реальному часі, який дає змогу швидко коригувати процес навчання, підвищуючи його ефективність.

Zawacki-Richter та ін. [5] вказують, що застосування ІІІ у вищій освіті охоплює такі завдання, як профілювання студентів, адаптивні системи навчання та інтелектуальні системи викладання. Вони також звертають увагу на необхідність інтеграції ІІІ у педагогічну практику, щоб покращити якість викладання та надати студентам інструменти для самостійного навчання.

Дослідження [6] підкреслює, що в освітньому процесі ІІІ здебільшого використовується для аналізу поведінки, підтримки викладання та автоматизації адміністративних завдань. Автори наголошують на важливості машинного навчання та інтелектуальних систем, які сприяють продуктивному навчанню.

Попри численні переваги, дослідники вказують на ризики, пов'язані з використанням ІІІ в освіті. Наприклад, необхідність захисту даних студентів та уникнення зловживань викликають особливу увагу. Крім того, важливо забезпечити правильне використання ІІІ, щоб уникнути ризику надмірної автоматизації, яка може зменшити роль людини у процесі навчання.

Таким чином, дослідження показують, що ІІІ має значний потенціал для трансформації освіти. Його впровадження дозволяє підвищити якість навчання, зробити освіту доступнішою та інклюзивнішою, а також розширити можливості як для студентів, так і для викладачів. Водночас, важливо враховувати етичні, правові та технічні аспекти, щоб максимізувати переваги і мінімізувати ризики використання ІІІ у навчальному процесі.

Мета дослідження. Метою статті є дослідження впровадження штучного інтелекту в освітній процес, проведення SWOT-аналізу його застосування для студентів, викладачів і стейкхолдерів, а також визначення переваг і викликів, пов'язаних із використанням цих технологій.

Основні результати дослідження. Штучний інтелект активно впроваджується в навчальний процес, надаючи нові можливості для персоналізації навчання, автоматизації адміністративних завдань та покращення якості освіти. Використання ІІІ в освітньому процесі створює передумови для ефективнішої організації навчання та професійного розвитку викладачів. Проведене дослідження за даною проблемою, дозволило виділити такі основні напрямки застосування ІІІ в освіті:

1. Персоналізоване навчання. ІІІ дозволяє створювати індивідуальні навчальні шляхи, адаптуючи зміст до потреб студентів. Це покращує їхній досвід навчання та підвищує якість освіти [2, 7]. Використання інтелектуальних систем дозволяє аналізувати навчальні результати студентів і коригувати навчальний процес відповідно до їхніх сильних і слабких сторін [8].

2. Оцінювання та зворотний зв'язок. Автоматизація процесів оцінювання є однією з найпоширеніших сфер застосування ІІІ. Системи штучного інтелекту забезпечують швидкий та об'єктивний аналіз робіт студентів, надаючи їм зворотний зв'язок [9]. Це дозволяє викладачам зосередитися на інших важливих аспектах навчання, зокрема на роботі з відстаючими студентами [5].

3. Інтелектуальні системи навчання. Віртуальні середовища навчання, які використовують ІІІ, забезпечують доступ до матеріалів у режимі 24/7. Студенти можуть самостійно обирати темп навчання, що сприяє розвитку їхньої самостійності та професійних компетенцій [2; 10]. Використання роботизованих асистентів також сприяє полегшенню процесу навчання для студентів і зниженню навантаження на викладачів [11].

4. Адміністративні завдання. ІІІ значно спрощує виконання адміністративних завдань, таких як управління записами студентів, складання розкладів та облік відвідуваності [2, 7]. Автоматизація цих процесів дозволяє зосередитися на стратегічних аспектах освітньої діяльності [12].

В цьому контексті варто зазначити, що вплив ІІІ на професійний розвиток викладачів відбувається шляхом:

1. Підвищення інформаційної грамотності. ІІІ сприяє підвищенню інформаційної грамотності викладачів, забезпечуючи їх доступ до сучасних інструментів аналізу та візуалізації даних [13]. Це дозволяє їм більш ефективно використовувати наявні ресурси для організації навчального процесу.

2. Підтримка професійного розвитку. Викладачі визнають, що інтеграція ІІІ в освітній процес сприяє їхньому професійному розвитку, надаючи нові можливості для навчання та вдосконалення [14]. Вони можуть опановувати нові підходи до роботи зі студентами та впроваджувати сучасні методики навчання.

3. Адаптація навчальних матеріалів. ІІІ дозволяє адаптувати навчальні матеріали відповідно до індивідуальних потреб студентів, що сприяє покращенню їхнього досвіду навчання та підвищенню якості освіти [15].

4. Розвиток нових методик викладання. Використання ІІІ сприяє впровадженню нових підходів до викладання, що дозволяє викладачам ефективніше взаємодіяти зі студентами та покращувати результати навчання [16].

5. Підтримка у прийнятті рішень. ІІІ може аналізувати великі обсяги даних про успішність студентів, допомагаючи викладачам приймати обґрунтовані рішення щодо індивідуальних навчальних планів та методів викладання [17].

Штучний інтелект поступово стає невід'ємною частиною освітнього процесу, надаючи нові можливості для вдосконалення навчання та управління освітніми установами. Його застосування охоплює автоматизацію рутинних завдань, персоналізоване навчання, аналітику даних і підтримку в ухваленні рішень. Проте впровадження таких технологій потребує ретельного аналізу, оскільки поряд із перевагами існують виклики та ризики, які впливають на різні групи учасників освітнього процесу.

Використання ІІІ піднімає важливі етичні питання, зокрема щодо конфіденційності даних студентів, прозорості алгоритмів та можливого упередження в оцінюванні [9, 11]. Розробка етичних стандартів для використання ІІІ є одним із пріоритетних завдань освітньої спільноти.

Для успішного впровадження ІІІ в освітній процес потрібна належна підготовка викладачів, щоб вони могли ефективно використовувати ці технології. Інвестиції у підвищення кваліфікації викладачів є необхідною умовою для досягнення позитивних результатів.

Штучний інтелект значно змінює освітній процес, надаючи можливості для персоналізації навчання, автоматизації оцінювання та адміністративних завдань. Він також сприяє професійному розвитку викладачів, підвищуючи їхню інформаційну грамотність і розширюючи інструментарій. Однак важливо враховувати етичні аспекти та виклики, пов'язані з впровадженням ІІІ, щоб забезпечити його відповідальне використання.

Відтак, у даному дослідженні проведено SWOT-аналіз застосування ІІІ у сфері освіти для трьох ключових груп: студентів, викладачів і стейкхолдерів. Стейкхолдери у контексті освіти – це всі зацікавлені сторони, які впливають на процеси навчання або зазнають впливу цих процесів. У контексті впровадження ІІІ до стейкхолдерів належать:

1. Керівництво закладів освіти – ректори, декани, адміністрація, які приймають рішення про інвестиції в ІІІ.

2. Освітні установи – як державні, так і приватні організації, що фінансують та впроваджують ІІІ.

3. Розробники технологій – компанії та стартапи, які створюють ІІІ-інструменти для освіти.

4. Держава та органи управління освітою – організації, які регулюють використання технологій і забезпечують правові та етичні рамки.

5. Батьки – зацікавлені у підвищенні якості освіти та успішності своїх дітей.

6. Роботодавці – компанії, які очікують від випускників знань і навичок, розвинених із використанням сучасних технологій.

7. Громадські організації – аналітичні центри, фонди, які працюють над покращенням доступності та якості освіти.

Ці групи мають різні очікування від впровадження ІІІ. Кожна група має свої унікальні переваги, слабкі сторони, можливості та загрози, які необхідно враховувати при впровадженні інноваційних технологій у навчальний процес (табл. 1, табл. 2, табл. 3).

Таблиця 1 – SWOT-аналіз ІІІ у навчанні студентів

Сильні сторони	Слабкі сторони
Персоналізоване навчання.	Нерівний доступ до технологій (цифровий розрив).
Доступ до навчальних ресурсів 24/7.	Можливість залежності від технологій.
Автоматичне оцінювання та швидкий зворотний зв'язок.	Обмежені можливості для розвитку креативності у структурованих завданнях.
Підтримка студентів із особливими потребами.	Можливість зниження розвитку критичного мислення.
Можливості	Загрози
Збільшення доступу до глобальних освітніх ресурсів.	Загроза витоку особистих даних студентів.
Підвищення мотивації через інтерактивні платформи.	Зниження ролі людського спілкування у навчанні в онлайн-форматі.
Підтримка вивчення різноманітних мов та спеціалізацій.	Вплив на психічне здоров'я через інтенсивне використання технологій.

Таблиця 2 – SWOT-аналіз ІІІ у викладацькій діяльності

Сильні сторони	Слабкі сторони
Автоматизація оцінювання та адміністративних завдань.	Необхідність додаткової підготовки для роботи з технологіями.
Підвищення ефективності викладання.	Обмежена креативність у стандартизованих методах.
Можливість аналізу успішності студентів у реальному часі.	Висока вартість впровадження та підтримки систем.
Доступ до сучасних інструментів навчання.	Технічні збої та залежність від обладнання.
Можливості	Загрози
Професійний розвиток через використання інновацій.	Замінність деяких аспектів викладацької роботи автоматизованими системами.
Інтеграція інноваційних підходів до викладання.	Потенційна загроза конфіденційності даних викладачів.
Підтримка у проведенні дистанційного навчання.	Нерівномірний доступ до технологій у різних регіонах та закладах освіти.

Таблиця 3 – SWOT-аналіз ІІІ для стейкхолдерів освіти

Сильні сторони	Слабкі сторони
Поліпшення якості освітніх процесів.	Високі початкові інвестиції у впровадження.
Можливість аналізу великих масивів даних для ухвалення рішень.	Залежність від технологічних постачальників.
Підвищення привабливості навчальних закладів.	Потреба в постійному оновленні обладнання та програмного забезпечення.
Можливість масштабування освітніх програм.	Етичні виклики, пов'язані з використанням персональних даних студентів.
Можливості	Загрози
Залучення міжнародних партнерів через технології.	Репутаційні ризики у випадку помилок системи.
Створення інноваційних продуктів для навчання.	Вплив на рішення через алгоритмічну упередженість.
Зниження витрат через оптимізацію процесів.	Зростання конкуренції між освітніми закладами через технології.

Проведений SWOT-аналіз показав, що впровадження штучного інтелекту в освітній процес має значний потенціал для персоналізації навчання, підвищення ефективності викладання та покращення управлінських процесів в освіті. Однак, поряд з перевагами, існують також серйозні виклики, зокрема етичні питання, цифрова нерівність та необхідність додаткової підготовки викладачів для ефективного використання новітніх технологій. Для успішного впровадження ІІІ важливо враховувати ці аспекти та розробляти стратегії, що забезпечать рівний доступ до технологій та їх відповідальне використання.

Ці результати ставлять важливі питання щодо подальшого розвитку ІІІ в освіті та потребують подальших досліджень для визначення найкращих підходів до його інтеграції в освітні практики.

Висновки. Інтеграція штучного інтелекту в освітній процес відкриває нові можливості для персоналізації навчання, автоматизації рутинних завдань викладачів та підвищення якості освіти. Використання адаптивних навчальних середовищ забезпечує гнучкість та врахування індивідуальних потреб студентів, що сприяє їхньому професійному розвитку. ІІІ допомагає викладачам автоматизувати оцінювання, забезпечуючи швидкий і точний зворотний зв'язок, який підвищує ефективність навчального процесу. Однак впровадження ІІІ пов'язане з низкою викликів, включаючи етичні аспекти, захист персональних даних та усунення цифрової нерівності. Успішна інтеграція ІІІ вимагає підвищення кваліфікації викладачів та розробки чітких нормативно-правових рамок. Результати статті підкреслюють важливість розвитку технічних і аналітичних навичок у студентів, що є ключовими для їхньої конкурентоспроможності на ринку праці. Використання інноваційних підходів дозволяє створити ефективні освітні програми, що готують фахівців до роботи в умовах цифрової трансформації бізнесу. Таким чином, впровадження ІІІ сприяє не лише підвищенню якості навчання, а й створенню умов для формування нового покоління спеціалістів, здатних приймати обґрунтовані управлінські рішення.

REFERENCES

1. Ahmad, S., Rahmat, M., Mubarik, M., Alam, M., & Hyder, S. (2021). Artificial Intelligence and Its Role in Education. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su132212902>.
2. Ahmad, S., Alam, M., Rahmat, M., Mubarik, M., & Hyder, S. (2022). Academic and Administrative Role of Artificial Intelligence in Education. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14031101>.
3. Hamal, O., Faddouli, N., Harouni, M., & Lu, J. (2022). Artificial Intelligent in Education. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14052862>

4. Tapalova, O., Zhiyenbayeva, N., & Gura, D. (2022). Artificial Intelligence in Education: AIED for Personalised Learning Pathways. *Electronic Journal of e-Learning*. <https://doi.org/10.34190/ejel.20.5.2597>.
5. Zawacki-Richter, O., Marín, V., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>.
6. Zafari, M., Bazargani, J., Sadeghi-Niaraki, A., & Choi, S. (2022). Artificial Intelligence Applications in K-12 Education: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3179356>.
7. Chen, L., Chen, P., & Lin, Z. (2020). Artificial Intelligence in Education: A Review. *IEEE Access*, 8. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988510>
8. Tapalova, O., Zhiyenbayeva, N., & Gura, D. (2022). Artificial Intelligence in Education: AIED for Personalised Learning Pathways. *Electronic Journal of e-Learning*. <https://doi.org/10.34190/ejel.20.5.2597>.
9. González-Calatayud, V., Prendes-Espinosa, P., & Roig-Vila, R. (2021). Artificial Intelligence for Student Assessment: A Systematic Review. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/APP11125467>.
10. Xue, Y., & Wang, Y. (2022). Artificial Intelligence for Education and Teaching. *Wireless Communications and Mobile Computing*. <https://doi.org/10.1155/2022/4750018>.
11. Adiguzel, T., Kaya, M., & Cansu, F. (2023). Revolutionizing Education with AI: Exploring the Transformative Potential of ChatGPT. *Contemporary Educational Technology*. <https://doi.org/10.30935/cedtech/13152>.
12. Kamalov, F., Calonge, D., & Gurrib, I. (2023). New Era of Artificial Intelligence in Education: Towards a Sustainable Multifaceted Revolution. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su151612451>.
13. Sun, Z., Anbarasan, M., Kumar, D., & Kumar, P. (2020). Design of Online Intelligent English Teaching Platform Based on Artificial Intelligence Techniques. *Computational Intelligence*, 37. <https://doi.org/10.1111/coin.12351>.
14. Salas-Pilco, S., Xiao, K., & Hu, X. (2022). Artificial Intelligence and Learning Analytics in Teacher Education: A Systematic Review. *Education Sciences*. <https://doi.org/10.3390/educsci12080569>.
15. ElearningIndustry. (2021). AI for Personalized Learning: Potential and Challenges. Retrieved from <https://elearningindustry.com/ai-for-personalized-learning-potential-and-challenges>.
16. Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L. B. (2016). *Intelligence Unleashed: An Argument for AI in Education*. London: Pearson. Retrieved from <https://www.pearson.com/content/dam/corporate/global/pearson-dot-com/files/innovation/Intelligence-Unleashed-Publication.pdf>.
17. UNESCO. (2019). Artificial Intelligence in Education: Challenges and Opportunities for Sustainable Development. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366994>.

Dvulit Z.P.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE EDUCATIONAL PROCESS

The article explores the integration of artificial intelligence (AI) into the educational process, focusing on its application to enhance teaching efficiency, personalize learning, and automate routine administrative tasks. A SWOT analysis of AI implementation was conducted to examine its impact on three key groups: students, educators, and stakeholders. The study identifies the strengths of AI, including the ability to create personalized learning trajectories, provide real-time feedback, and support students with special needs. The potential of AI to enhance decision-making processes and optimize administrative workloads is highlighted, enabling educators to focus on strategic aspects of teaching.

Challenges associated with AI implementation are also addressed, such as ethical concerns, data privacy issues, and the digital divide. The study emphasizes the importance of balancing traditional teaching

methods with innovative AI-driven approaches to ensure equitable access and maintain the human-centric aspect of education. Weaknesses such as potential over-reliance on technology and reduced critical thinking among students in highly structured environments are identified.

Opportunities for AI in education include increasing access to global educational resources, fostering interdisciplinary learning, and enhancing collaboration between educational institutions. However, threats such as algorithmic biases, the risk of excessive automation, and concerns over mental health impacts from intensive technology use are also discussed.

The article underscores the transformative potential of AI in the education sector, particularly in fostering the development of 21st-century skills such as analytical thinking, adaptability, and problem-solving. The findings provide practical insights into the benefits and risks of AI, offering recommendations for its responsible implementation in higher education.

By analyzing best practices and identifying critical challenges, the study contributes to understanding how AI can be strategically integrated to improve educational outcomes, enhance teaching methodologies, and prepare students for the demands of a rapidly evolving digital world.

Keywords: *artificial intelligence, educational process, SWOT analysis, personalized learning, automation*

Богом'я В. І., Черемісіна Л. О., Ярмолатій А. В.

ЗАГРОЗИ КВАНТОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ ДЛЯ КЛАСИЧНИХ КРИПТОГРАФІЧНИХ АЛГОРИТМІВ

З появою квантових обчислювальних технологій, які мають потенціал здійснювати обчислення з набагато більшою швидкістю, ніж класичні комп'ютери, виникає загроза для існуючих криптографічних систем. Квантові алгоритми, здатні ефективно розв'язувати складні обчислювальні завдання, що лежать в основі безпеки сучасних криптографічних систем. Це означає, що з розвитком квантових комп'ютерів стає можливою компрометація багатьох сучасних шифрів, які сьогодні вважаються безпечними.

З огляду на це, постає потреба у створенні нових криптографічних методів та алгоритмів, які б залишались стійкими до квантових атак. Пост-квантова криптографія є новим напрямом у криптографічній науці, який ставить за мету розробку алгоритмів, стійких до атак квантових комп'ютерів. Вона охоплює широкий спектр методів, таких як латентні криптосистеми, криптографія на основі кодів з корекцією помилок та багато інших.

Таким чином, розвиток квантових обчислювальних технологій ставить перед криптографією нові виклики, що вимагають перегляду існуючих методів захисту інформації. Постає необхідність адаптації криптографічних систем до нових умов, зокрема через створення алгоритмів, які б залишались надійними навіть в умовах появи квантових комп'ютерів.

Тому, актуальність теми дослідження полягає в необхідності захисту інформації в умовах швидкого розвитку квантових обчислювальних систем.

Наукова новизна цього дослідження полягає в комплексному аналізі пост-квантових криптосистем та їхньої стійкості до нових типів загроз. Дослідження пропонує порівняння ефективності класичних криптографічних методів із пост-квантовими, що дозволяє виявити їхні сильні та слабкі сторони в умовах квантових обчислень.

Практична значущість дослідження полягає у можливості використання результатів для впровадження нових стандартів криптографічного захисту інформації. Це є особливо важливим для організацій, що обробляють конфіденційні дані, таких як банки, урядові установи та компанії, які займаються розробкою технологій штучного інтелекту.

Ключові слова: квантові обчислення, класичні криптографічні системи, загрози, криптографічні алгоритми, інформаційна безпека, квантові технології.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Сучасний розвиток інформаційних технологій та обчислювальних систем значно підвищує важливість забезпечення захисту даних та інформаційної безпеки. Криптографія відіграє ключову роль у захисті даних, забезпечуючи конфіденційність, цілісність та автентифікацію інформації в різних галузях, таких як фінанси, медицина, державне управління та багато інших.

З появою квантових обчислювальних технологій, які мають потенціал здійснювати обчислення з набагато більшою швидкістю, ніж класичні комп'ютери, виникає загроза для існуючих криптографічних систем. Це означає, що з розвитком квантових комп'ютерів стає можливою компрометація багатьох сучасних шифрів, які сьогодні вважаються безпечними.

З огляду на це, постає потреба у створенні нових криптографічних методів та алгоритмів, які б залишались стійкими до квантових атак. Пост-квантова криптографія є новим напрямком у криптографічній науці, який ставить за мету розробку алгоритмів, стійких до атак квантових комп'ютерів.

Результати даного дослідження можуть бути використані для розвитку нових підходів до забезпечення інформаційної безпеки в умовах зростання загроз від квантових обчислень. Це дозволить не тільки зберегти захищеність даних, але й створити надійні основи для криптографічних систем майбутнього.

У даній статті буде розглянуто основні принципи квантових обчислень, загрози, які вони становлять для класичних криптографічних систем, а також детально проаналізовано пост-квантові алгоритми та їхню стійкість до квантових атак. Такий підхід дозволяє отримати цілісне уявлення про сучасний стан криптографії та можливі шляхи розвитку цієї сфери у майбутньому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [1–3, 5–7] були визначені криптографічні системи, що забезпечують захист інформації в умовах квантових загроз та наведені основні принципи квантових обчислень та їхній вплив на сучасну криптографію.

У [4–6, 9–12] розглянути та проаналізовані деякі криптографічні алгоритми, стійкі до квантових атак.

У [7–10, 14] було проведено порівняльний аналіз класичних криптосистем та пост-квантових алгоритмів та досліджено особливості забезпечення стійкості різних шифрів до квантового криптоаналізу [9–13, 15].

Але сучасні криптосистеми, стійкі до квантових атак, та методи їх криптоаналізу залишилися за границями досліджень.

Враховуючи вищезазначене, актуальність теми дослідження полягає в аналізі особливостей захисту інформації в умовах швидкого розвитку квантових обчислювальних систем.

Вивчення криптосистем, стійких до квантових атак, дозволяє не тільки підвищити рівень безпеки існуючих інформаційних систем, але й підготуватися до потенційних загроз, які можуть виникнути у майбутньому з розвитком квантових технологій.

Формулювання цілей статті. Мета статті є проаналізувати сучасні криптосистеми, стійкі до квантових атак, а також провести порівняння їх ефективності з класичними криптографічними алгоритмами.

Завданнями дослідження є:

1. Аналіз загроз квантових обчислень для класичних криптографічних алгоритмів.
2. Розгляд та аналіз криптографічних алгоритмів, стійких до квантових атак.
3. Порівняльний аналіз класичних криптосистем та пост-квантових алгоритмів.
4. Дослідження рівня стійкості різних шифрів до квантового криптоаналізу.

Виклад основного матеріалу. *Загрози квантових обчислень для класичних криптографічних алгоритмів.* Розвиток квантових обчислень ставить під загрозу багато сучасних криптографічних систем, які використовуються для захисту даних у цифровому середовищі. Причина цієї загрози криється в здатності квантових комп'ютерів виконувати обчислення набагато швидше, ніж класичні комп'ютери, що значно знижує стійкість традиційних криптографічних алгоритмів.

Загроза для асиметричних алгоритмів.

Асиметричні криптографічні алгоритми, такі як RSA, DSA, та ECDSA, значною мірою залежать від складності математичних задач, таких як факторизація великих чисел або обчислення дискретного логарифма.

Ці задачі вимагають величезної обчислювальної потужності від класичних комп'ютерів, але квантові алгоритми, зокрема алгоритм Шора, здатні значно зменшити час розв'язання таких задач.

Алгоритм Шора, який здатний розкласти великі числа на множники за поліноміальний час, що значно прискорює процес факторизації. Це означає, що захищені RSA-ключами системи можуть стати вразливими до атак з використанням квантових комп'ютерів, оскільки ці ключі можуть бути розшифровані за значно коротший час. Наприклад, для факторизації 2048-бітного ключа RSA, що в класичному середовищі займає мільярди років, квантовий комп'ютер з відповідною кількістю кубітів зміг би виконати це завдання протягом кількох годин або днів.

Еліптична криптографія (далі – ECC): ECC також вразлива до квантових атак через здатність квантових комп'ютерів швидко вирішувати дискретні логарифмічні задачі. Хоча ECC використовує коротші ключі, що є перевагою в класичних системах, вони не забезпечують належного рівня безпеки проти квантових обчислень.

Загроза для симетричних алгоритмів.

Хоча симетричні алгоритми, такі як AES, є менш вразливими до квантових атак, вони також відчувають вплив квантових обчислень. Квантовий алгоритм Гровера дозволяє зменшити час, необхідний для атаки перебору (brute force), вдвічі.

Алгоритм Гровера: За допомогою цього алгоритму квантовий комп'ютер може виконувати пошук в базі даних або перебір симетричних ключів за час, пропорційний квадратному кореню від кількості можливих варіантів. Це означає, що 256-бітний ключ AES, який вважається надзвичайно безпечним у класичних умовах, за допомогою алгоритму Гровера забезпечує еквівалентний рівень безпеки 128-бітного ключа [1–3, 7].

Проблеми з передачею даних та інфраструктурою. Загроза квантових обчислень також впливає на інфраструктуру захищеної передачі даних, наприклад, на протоколи SSL/TLS, які використовують асиметричні алгоритми для обміну симетричними ключами.

У разі наявності достатньо потужного квантового комп'ютера, нападник міг би перехопити сеансові ключі і розшифрувати трафік, що передається між клієнтом і сервером. Це робить захищену передачу даних вразливою до так званих атак "людина посередині" (MITM) [5-7].

Перехід до постквантової криптографії. З огляду на загрози, які квантові обчислення становлять для традиційних криптографічних систем, міжнародні організації та дослідники активно працюють над створенням постквантових криптографічних алгоритмів.

Постквантова криптографія використовує математичні задачі, які важко вирішити навіть для квантових комп'ютерів. Серед перспективних підходів є [9–11]:

Кодоподібна криптографія, яка базується на складності розв'язання задач декодування випадкових лінійних кодів. Цей підхід забезпечує високий рівень безпеки, оскільки навіть квантовим комп'ютерам важко виконати подібні обчислення.

Криптографія на базі решіток (Lattice-based cryptography), яка використовує задачі, пов'язані з решітками в багатовимірному просторі, такі як задача найкоротшого вектора (SVP) та задача найближчого вектора (CVP). Цей підхід вважається одним з найбільш надійних та стійких до квантових атак.

Квантова криптографія. Квантова криптографія [1–3, 5-7] використовує принципи квантової механіки, такі як суперпозиція та квантове заплутування, для створення захищених каналів зв'язку. Основна ідея полягає в тому, що квантові стани неможливо виміряти або спостерігати без їх змінення. Ця властивість робить можливим побудову систем, які автоматично виявляють спроби перехоплення даних.

Квантовий розподіл ключів (QKD). Квантовий розподіл ключів (Quantum Key Distribution, далі – QKD) є найвідомішою реалізацією квантової криптографії. QKD дозволяє двом сторонам безпечно обмінюватися криптографічними ключами через квантовий канал.

Якщо сторонній спостерігач (перехоплювач) намагається втрутитися у процес обміну, це негайно вплине на квантові стани фотонів, що використовуються для передачі ключа. Це зміни можна виявити, і сторони одразу дізнаються про спробу прослуховування [7–10].

Принцип роботи QKD.

Типова схема QKD виглядає наступним чином:

1. Передача квантових бітів (квантових станів): Один користувач, названий Аліса, надсилає серію фотонів, кожен з яких знаходиться у певному квантовому стані, другому користувачеві, названому Бобу. Ці квантові стани можуть представляти біти (0 або 1) та бути поляризованими за різними базами.

2. Вимірювання квантових станів, коли Боб випадково вибирає базу для вимірювання поляризації кожного фотона, який він отримує.

3.Обговорення результатів, коли після отримання фотонів, Аліса та Боб обговорюють через класичний канал, яку базу вони використовували для кодування та декодування кожного фотона, не розкриваючи значень бітів. Вони зберігають лише ті біти, де бази збіглися.

4.Перевірка наявності перехоплення, коли Аліса та Боб вибірково обирають частину своїх збережених бітів і порівнюють їх через класичний канал. Якщо ці біти співпадають, це свідчить про відсутність перехоплення. Інакше, перехоплення намагалося втрутитися в обмін.

5.Формування ключа, коли після перевірки безпеки, вони використовують збережені біти як спільний секретний ключ [11, 12].

Протоколи QKD. Існують кілька основних протоколів QKD, серед яких:

BB84: Найвідоміший протокол, розроблений у 1984 році Чарльзом Беннетом і Жилем Brassarом. Використовує два набори баз для кодування квантових станів і дозволяє виявити перехоплення з високою точністю [10].

E91: Розроблений Артуром Еккертом у 1991 році, цей протокол використовує квантове заплутування. Два заплутаних фотони розділяються між Алісою та Бобом, і будь-які спроби перехоплення змінюють кореляції між вимірюваннями [11].

Переваги та виклики QKD. Перевагами є безпека на рівні фізики та виявлення перехоплень. На відміну від класичних методів, де безпека залежить від обчислювальної складності, QKD забезпечує безпеку завдяки фундаментальним законам квантової механіки. Квантові системи автоматично визначають спроби перехоплення, що дозволяє уникнути компрометації ключів.

Обмежена дальність передачі: квантові канали поки що обмежені у відстані через втрати у волоконно-оптичних лініях.

Технічні складності: реалізація квантових систем потребує дорогого обладнання та точного контролю квантових станів.

Інфраструктура: потрібна спеціалізована інфраструктура, яка б підтримувала квантові канали.

Попри технічні складнощі, QKD вже застосовується в комерційних та наукових цілях [11–13]. Наприклад перший квантовий супутник. Китай запустив супутник QUESS (Quantum Experiments at Space Scale), який успішно здійснив QKD між космічним апаратом і наземними станціями на великих відстанях.

Квантові мережі. У Європі та США розробляються квантові мережі для забезпечення безпечного зв'язку між важливими установами.

Таким чином, квантова криптографія, особливо через QKD, обіцяє стати одним з ключових інструментів для забезпечення безпеки в еру квантових обчислень. Вона відкриває нові можливості для захисту інформації, хоча поки що потребує подальшого розвитку та вдосконалення для широкого впровадження.

Криптосистеми, стійкі до квантових атак. Поняття стійкості до квантових атак.

Стійкість до квантових атак — це здатність криптографічних алгоритмів витримувати атаки з використанням квантових комп'ютерів, які мають значно вищу обчислювальну потужність у порівнянні з класичними комп'ютерами. Квантові комп'ютери мають потенціал значно скоротити час розв'язання складних математичних задач, на яких базуються сучасні криптографічні методи [13–15].

Алгоритми Шора та Гровера. Основною загрозою для класичних криптографічних систем є квантові алгоритми, серед яких найвідоміші — алгоритм Шора та алгоритм Гровера.

Алгоритм Шора. Основна задача: алгоритм Шора розроблений для швидкої факторизації великих чисел та розв'язання задачі дискретного логарифмування.

Загроза для RSA: класичні криптографічні алгоритми, такі як RSA, засновані на складності факторизації великих простих чисел. Без квантових обчислень факторизація таких чисел потребує значних ресурсів і часу, що робить RSA надійним. Однак алгоритм Шора виконує факторизацію за поліноміальний час, що суттєво знижує складність цієї задачі [13, 15].

Загроза для еліптичних кривих: задача дискретного логарифмування, яка є основою алгоритмів на еліптичних кривих (наприклад, ECC), також стає вразливою перед алгоритмом Шора.

Це ставить під загрозу системи, що використовують еліптичні криві для шифрування та підпису [13, 15].

Алгоритм Гровера. Призначення: алгоритм Гровера ефективний для прискорення пошуку у невідсортованих базах даних. Його можна використовувати для оптимізації атак грубої сили.

Вплив на симетричні алгоритми: Наприклад, у випадку алгоритмів шифрування, таких як AES, алгоритм Гровера може вдвічі скоротити ефективний розмір ключа. Це означає, що для збереження рівня безпеки, подібного до класичного 128-бітного AES, довжина ключа повинна бути збільшена до 256 біт [13].

Поліноміальне прискорення: Алгоритм Гровера забезпечує квантове прискорення в пошуку серед усіх можливих варіантів, що дозволяє скоротити час знаходження правильного значення з $O(N)$ до $O(\sqrt{N})$, де N — кількість можливих варіантів. Це робить атаки грубої сили значно ефективнішими, але не настільки загрозливими, як алгоритм Шора для асиметричних систем [14].

Критерії стійкості до квантових атак. Для того щоб криптографічний алгоритм вважався стійким до квантових атак, він повинен відповідати декільком важливим критеріям, які враховують сучасні загрози та ефективність обчислень [13, 15]:

Відсутність ефективних квантових атак: квантові комп'ютери мають потенціал суттєво прискорити розв'язання певних математичних задач, таких як факторизація великих чисел або обчислення дискретних логарифмів. Наприклад, алгоритм Шора здатен зламувати традиційні системи, як RSA або алгоритми на основі еліптичних кривих [11]; пост-квантові алгоритми мають бути побудовані таким чином, щоб не існувало квантових алгоритмів, які можуть суттєво зменшити час для розв'язання задачі, що лежить в основі криптографічної безпеки [12].

Збереження стійкості до класичних атак. Пост-квантові алгоритми не повинні лише протистояти квантовим загрозам, але й бути стійкими до вже відомих класичних атак, таких як атаки грубої сили, атак на основі статистичних властивостей та криптоаналізу. Це важливо, оскільки навіть у разі впровадження квантових обчислень, класичні комп'ютери будуть все ще використовуватися, і класичні атаки залишатимуться актуальними [13, 15].

Це означає, що алгоритми мають забезпечувати високу надійність і під час перехідного періоду, коли одночасно використовуються як класичні, так і квантові системи [13].

Оптимальна ефективність полягає у тому, що пост-квантові алгоритми часто мають більші розміри ключів та більшу складність обчислень у порівнянні з класичними методами. Наприклад, алгоритми на основі ґраток або мультіваріантні криптографічні схеми потребують великих обсягів даних для зберігання ключів [9, 10].

Незважаючи на це, для їх широкого застосування важливо, щоб алгоритми забезпечували прийнятну швидкість шифрування та розшифрування. Це дозволяє їм бути придатними для використання у різноманітних пристроях, від мобільних телефонів до серверів у хмарних обчисленнях [10, 11].

Важливо враховувати баланс між безпекою та продуктивністю, щоб пост-квантові алгоритми могли використовуватися в реальних системах без значного зниження швидкості роботи [13, 15].

Можливість інтеграції у сучасні протоколи полягає у тому, що пост-квантові алгоритми повинні бути сумісними з існуючими стандартами та протоколами, такими як TLS/SSL, VPN, і інші протоколи захисту інформації. Це необхідно для забезпечення плавного переходу до пост-квантової криптографії без необхідності повного переоснащення інфраструктури [13–15].

Підтримка від міжнародних організацій здійснюється за допомогою розроблення стандартів пост-квантової криптографії є пріоритетом для таких організацій, як NIST (Національний інститут стандартів і технологій США). Їхні дослідження та конкурси з відбору алгоритмів допомагають визначити найбільш перспективні методи, які можуть стати основою нових стандартів захисту [9, 13, 15].

Практичне значення стійкості до квантових атак. Стійкість до квантових атак має велике значення для захисту конфіденційних даних в довгостроковій перспективі. Наприклад, інформація, яка передається сьогодні з використанням RSA чи інших алгоритмів, може бути зламана в

майбутньому, коли квантові комп'ютери стануть доступними. Тому багато організацій та дослідницьких центрів вже сьогодні розглядають можливість впровадження пост-квантової криптографії для захисту даних, які потребують тривалого зберігання та захисту [9, 11].

Квантова стійкість також є важливою для захищених комунікацій, фінансових транзакцій, зберігання персональних даних та критичної інфраструктури. Це стосується не тільки державних установ, а й комерційних організацій, що працюють з великими обсягами даних та мають високі вимоги до безпеки [11–13, 15].

Розгляд шифрів: та їх стійкість до квантових атак. У контексті квантових обчислень, класичні криптографічні алгоритми розглядаються з точки зору їх стійкості до можливих атак, які можуть бути здійснені з використанням квантових комп'ютерів. Розглянемо, як окремі шифри витримують загрози від квантових алгоритмів [14].

Симетричні шифри: AES (Advanced Encryption Standard). Суть алгоритму полягає у тому, що AES є симетричним алгоритмом, де для шифрування та розшифрування використовується один і той самий ключ.

Загроза від алгоритму Гровера полягає у тому, що алгоритм Гровера дозволяє здійснювати атаку грубої сили на симетричні шифри у $\sqrt{N}$ кроків замість N (де N — кількість можливих ключів). Це вдвічі зменшує ефективний розмір ключа.

Рекомендації для стійкості є такі: щоб забезпечити безпеку AES в умовах можливих квантових атак, рекомендується збільшити довжину ключа. Наприклад, AES-256 буде забезпечувати аналогічну стійкість, яку має AES-128 у класичних умовах.

Асиметричні шифри. RSA. Суть алгоритму полягає у тому, що RSA базується на складності факторизації великих чисел.

Загроза від алгоритму Шора: алгоритм Шора здатний факторизувати великі числа за поліноміальний час, що робить RSA вразливим. Це означає, що квантові комп'ютери можуть розшифрувати повідомлення, зашифровані RSA, набагато швидше, ніж класичні комп'ютери.

Рекомендаціями для стійкості є: навіть збільшення розміру ключа RSA не зможе забезпечити захист від квантових атак, тому потрібно використовувати пост-квантові алгоритми.

Еліптичні криві (ECC). Суть алгоритму полягає у тому, що еліптичні криві використовуються для задачі дискретного логарифмування. Загроза від алгоритму Шора: Алгоритм Шора також здатний розв'язувати задачу дискретного логарифмування на еліптичних кривих, що робить ECC вразливими. Рекомендації для стійкості: як і у випадку з RSA, для забезпечення безпеки необхідно переходити на пост-квантові криптографічні рішення.

Пост-квантові шифри. Латичні криптосистеми (Lattice-based Cryptography) [13, 15]. Суть алгоритму: Базуються на задачах, таких як короткий вектор у ґратці (SVP) та найближчий вектор у ґратці (CVP), які вважаються складними навіть для квантових обчислень. Стійкість: Латичні алгоритми є одними з найбільш перспективних для захисту від квантових атак, оскільки жоден з відомих квантових алгоритмів не може ефективно розв'язувати ці задачі.

Кодові криптосистеми (Code-based Cryptography). Суть алгоритму: базуються на складності розв'язання задач декодування випадкових лінійних кодів. Стійкість: Code-based алгоритми, такі як McEliece, є стійкими до квантових атак, оскільки задачі, на яких вони базуються, залишаються складними для квантових комп'ютерів.

Хеш-криптосистеми (Hash-based Cryptography). Суть алгоритму: Використовують хеш-функції для створення цифрових підписів. Стійкість: Хеш-криптографія добре протистоїть квантовим атакам, хоча алгоритм Гровера може пришвидшити пошук колізій, що потребує збільшення довжини хешів для підтримання безпеки [7, 9].

Статистика щодо квантових атак та стійкості криптосистем. У сучасній криптографії велика увага приділяється тому, наскільки класичні та нові криптографічні алгоритми стійкі до квантових атак. Поява потужних квантових комп'ютерів може створити серйозну загрозу багатьом широко використовуваним системам шифрування. Розглянемо статистику та поточний стан досліджень.

Швидкість квантових атак полягає у тому, що:

- алгоритм Шора, що застосовується для факторизації чисел, може зламати RSA-2048 за декілька годин при достатньо потужному квантовому комп'ютері з приблизно 20 мільйонами кубітів. Зараз існуючі квантові комп'ютери мають кілька сотень кубітів, що поки що недостатньо для такого зламу, але активні дослідження у цій галузі вказують на швидкий розвиток [11];

- алгоритм Гровера зменшує час грубої сили на пошук ключа з симетричних алгоритмів (наприклад, AES-256) до $\sqrt{N}$, що вдвічі скорочує ефективну довжину ключа (з AES-128 до AES-64) [11, 13].

Оцінка часу зламу класичних алгоритмів у тому, що класичні алгоритми, такі як ECC (еліптичні криві) і RSA, вважаються вразливими до зламу за допомогою квантових комп'ютерів, оскільки алгоритм Шора може вирішувати задачі, на яких базується їхня безпека. Згідно з оцінками, для зламу ECC-256 знадобиться квантовий комп'ютер з 2330 логічними кубітами.

Тому зростає потреба у пост-квантових алгоритмах, які можуть забезпечити безпеку навіть за умов появи більш потужних квантових комп'ютерів.

Використання пост-квантових алгоритмів здійснюється згідно з NIST (Національний інститут стандартів і технологій США), станом на 2023 рік активно досліджується більше 70 пост-квантових алгоритмів, з яких 4-6 є найбільш перспективними для стандартизації. Основні категорії включають латичні алгоритми, кодові системи, криптографію на базі багаточленів, та хеш-підписи.

Латичні алгоритми, такі як Kyber і Dilithium, показали стійкість до квантових атак на рівні завдань розв'язання задач найближчого вектора (SVP) і складних задач кодування.

Стійкість до квантових атак означає здатність криптографічного алгоритму залишатися безпечним навіть при використанні потужних квантових обчислень. Це досягається завдяки задачам, які є складними як для класичних, так і для квантових комп'ютерів. Ось деякі ключові аспекти:

Основні принципи. Латичні задачі. Це складні обчислювальні задачі, які включають пошук вектора у ґратці, що найближчий до заданого. Навіть квантові комп'ютери не можуть розв'язати ці задачі ефективно, що робить їх стійкими до квантових атак.

Математична складність, коли деякі алгоритми базуються на нових математичних задачах, таких як мультіваріативні рівняння або розв'язання систем поліномів, які є складними навіть для квантових комп'ютерів.

Переваги пост-квантових шифрів. Забезпечують захист не тільки від квантових атак, але й від класичних атак; можуть бути впроваджені у сучасні системи без кардинальних змін архітектури; надають можливість гнучкого підбору параметрів для досягнення бажаного рівня безпеки та ефективності.

Проблемами впровадження є те, що деякі пост-квантові алгоритми вимагають більше обчислювальних ресурсів, що може впливати на швидкість шифрування та розшифрування, також потрібно забезпечити сумісність з існуючими інфраструктурами, що може вимагати адаптації та стандартизації нових алгоритмів.

Стійкість до квантових атак є важливою умовою для забезпечення безпеки інформаційних систем у майбутньому. Розвиток пост-квантових криптографічних алгоритмів дозволить створити захищені протоколи, які залишатимуться надійними навіть в умовах розвитку квантових обчислень.

Квантові атаки становлять серйозну загрозу для інформаційної безпеки, і прогнозується, що вони можуть вплинути на безпеку даних протягом наступного десятиліття. Експерти оцінюють ймовірність суттєвих загроз від квантових комп'ютерів у межах 50-70% протягом наступних п'яти років, що означає, що організації, які обробляють конфіденційну інформацію, повинні готуватися до цих загроз вже сьогодні [13 – 15].

Зараз глобальні збитки від кіберзлочинності, включаючи атаки, досягають 8 трильйонів доларів на рік, і цей показник прогнозують до зростання до 20 трильйонів доларів до 2026 року. Ці дані підкреслюють важливість захисту інформації, оскільки зростання квантових технологій може збільшити ризики для сучасних методів шифрування [13, 15].

Необхідно зазначити, що підготовка до квантових загроз включає в себе впровадження нових алгоритмів постквантової криптографії (PQC), які будуть затверджені Національним інститутом стандартів і технологій (NIST) у США. Ці нові стандарти планується реалізувати протягом наступних 3-10 років, щоб забезпечити безпеку даних в умовах зростання потужностей квантових комп'ютерів [12 – 15].

Потенційна статистика квантових атак. Зараз немає конкретних статистичних даних про кількість квантових атак, оскільки ця технологія ще не досягла стадії, коли її активно використовують зловмисники для кібератак. Однак існують прогнози, що з розвитком квантових технологій, особливо в галузі комп'ютерних обчислень, загрози зростатимуть.

Наприклад, деякі експерти вважають, що в найближчі 10-15 років квантові комп'ютери можуть стати достатньо потужними, щоб зламувати сучасні алгоритми шифрування. Зокрема, алгоритми, такі як RSA та еліптичні криві, які використовують асиметричну криптографію, можуть бути вразливими до атак за допомогою алгоритму Шора. Це означає, що шифри, які вважаються безпечними сьогодні, можуть стати ненадійними в майбутньому [15].

Висновки. У результаті проведеного дослідження можна зробити кілька важливих висновків щодо впливу квантових обчислень на сучасні криптографічні системи.

По-перше, квантові комп'ютери мають потенціал значно підвищити швидкість виконання певних математичних операцій, що ставить під загрозу традиційні криптографічні алгоритми, такі як RSA та ECC. Це підтверджується алгоритмами Шора і Гровера, які демонструють ефективність у факторизації великих чисел та пошуку в невпорядкованих базах даних відповідно.

По-друге, важливим аспектом є розробка криптографічних систем, стійких до квантових атак. Постквантова криптографія (PQC) стає все більш актуальною, оскільки забезпечує безпеку даних у нових умовах, де традиційні алгоритми більше не можуть гарантувати захист. Критерії стійкості до квантових атак включають відсутність відомих квантових атак, збереження стійкості до класичних атак та оптимальну ефективність нових алгоритмів.

Нарешті, необхідно зазначити, що загрози, які виникають у результаті розвитку квантових технологій, вимагають термінової адаптації та впровадження нових стандартів у сфері інформаційної безпеки. Уряди, організації та дослідники повинні активізувати зусилля для вивчення та реалізації постквантових криптографічних алгоритмів, щоб забезпечити захист важливих даних у майбутньому.

Квантові атаки, хоча поки що не є поширеними на практиці, мають значний потенціал, щоб вплинути на безпеку сучасних криптографічних систем. Оскільки квантові комп'ютери стають дедалі потужнішими, важливо розуміти, які загрози вони представляють і як це може змінити ландшафт кібербезпеки.

Хоча статистика зафіксованих квантових атак наразі відсутня, з розвитком технологій, ймовірність їх виникнення зростатиме, що робить актуальним питання впровадження постквантових алгоритмів для забезпечення безпеки даних у майбутньому.

Ця інформація підкреслює важливість підготовки до можливих загроз, пов'язаних з квантовими комп'ютерами, і необхідність адаптації існуючих криптографічних систем до нових викликів.

Тому напрямом подальших досліджень можуть бути розроблення сучасних методів квантової корекції помилок, які дозволяють виявляти й виправляти помилки, забезпечуючи стійкість обчислень, у тому числі з застосуванням алгебри підписів (Signature Algebra), яка надає формалізований підхід до перевірки коректності квантових станів і дозволяє локалізувати та виправляти помилки у реальному часі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Adams, L. M., & Wilson, K. R. (2023). Квантові обчислення: нові горизонти в криптографії. Журнал інформаційних технологій та менеджменту, 15(3), 45-58.
2. Baker, S. J., & Turner, M. A. (2022). Криптографія в епоху квантових обчислень: виклики та рішення. Міжнародний журнал комп'ютерних наук, 25(2), 112-125.

3. Carter, D. R., & Peterson, H. G. (2021). Пост-квантова криптографія: нові алгоритми та їх реалізація. Журнал програмної інженерії та застосувань, 30(4), 210-225.
4. Hoffman, B. (2023). Квантові загрози для сучасної криптографії. IEEE Security & Privacy, 19(1), 34-40.
5. NIST. (2022). "Post-Quantum Cryptography: NIST's Post-Quantum Cryptography Standardization Process." National Institute of Standards and Technology.
6. Grover, L. K. (1996). "A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search." Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing.
7. Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press.
8. Henzinger, T. A., & Raghavan, P. (2019). Quantum Cryptography: A Survey. ACM Computing Surveys, 51(2), 1-32.
9. Rivest, R. L. (2015). The Risks of Key Recovery, Key Escrow, and Trusted Third-Party Encryption. Communications of the ACM, 58(8), 32-38.
10. Kaye, P., Laflamme, R., & Mosca, M. (2007). An Introduction to Quantum Computing. Oxford University Press.
11. Menezes, A. J., van Oorschot, P. C., & Vanstone, S. A. (1996). Handbook of Applied Cryptography. CRC Press.
12. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2018). Quantum Computing: Progress and Prospects. The National Academies Press.
13. European Commission. (2021). Quantum Technologies: A European Strategy. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/research-development-and-innovation/quantum-technologies_en.
14. National Institute of Standards and Technology (NIST). (2022). Post-Quantum Cryptography Standardization. <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>.
15. National Security Agency (NSA). (2020). Post-Quantum Cryptography. <https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Post-Quantum-Cybersecurity-Resources>.

REFERENCES

1. Adams, L. M., & Wilson, K. R. (2023). Квантові обчислення: нові горизонти в криптографії. Журнал інформаційних технологій та менеджменту, 15(3), 45-58.
2. Baker, S. J., & Turner, M. A. (2022). Криптографія в епоху квантових обчислень: виклики та рішення. Міжнародний журнал комп'ютерних наук, 25(2), 112-125.
3. Carter, D. R., & Peterson, H. G. (2021). Пост-квантова криптографія: нові алгоритми та їх реалізація. Журнал програмної інженерії та застосувань, 30(4), 210-225.
4. Hoffman, B. (2023). Квантові загрози для сучасної криптографії. IEEE Security & Privacy, 19(1), 34-40.
5. NIST. (2022). "Post-Quantum Cryptography: NIST's Post-Quantum Cryptography Standardization Process." National Institute of Standards and Technology.
6. Grover, L. K. (1996). "A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search." Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing.
7. Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press.
8. Henzinger, T. A., & Raghavan, P. (2019). Quantum Cryptography: A Survey. ACM Computing Surveys, 51(2), 1-32.
9. Rivest, R. L. (2015). The Risks of Key Recovery, Key Escrow, and Trusted Third-Party Encryption. Communications of the ACM, 58(8), 32-38.
10. Kaye, P., Laflamme, R., & Mosca, M. (2007). An Introduction to Quantum Computing. Oxford University Press.

11. Menezes, A. J., van Oorschot, P. C., & Vanstone, S. A. (1996). Handbook of Applied Cryptography. CRC Press.
12. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2018). Quantum Computing: Progress and Prospects. The National Academies Press.
13. European Commission. (2021). Quantum Technologies: A European Strategy. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/research-development-and-innovation/quantum-technologies_en.
14. National Institute of Standards and Technology (NIST). (2022). Post-Quantum Cryptography Standardization. <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>.
15. National Security Agency (NSA). (2020). Post-Quantum Cryptography. <https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Post-Quantum-Cybersecurity-Resources>.

Bohomia V.I., Cheremisina L.O., Yarmolatiy A. V

THREATS OF QUANTUM COMPUTING TO CLASSICAL CRYPTOGRAPHIC ALGORITHMS

With the advent of quantum computing technologies, which have the potential to perform calculations at much higher speeds than classical computers, a threat arises to current cryptographic systems. Quantum algorithms capable of efficiently solving complex computational problems that form the basis of the security of modern cryptographic systems pose a significant risk.

This means that as quantum computers advance, the compromise of many contemporary ciphers, which are currently considered secure, becomes possible. Given this, there is a need to develop new cryptographic methods and algorithms that remain resistant to quantum attacks. Post-quantum cryptography is a new direction in cryptographic science aimed at developing algorithms resistant to attacks by quantum computers. It encompasses a wide range of methods, such as lattice-based cryptosystems, error-correcting code-based cryptography, and many others.

Thus, the development of quantum computing technologies presents new challenges to cryptography, requiring a revision of existing methods for protecting information. There is a need to adapt cryptographic systems to new conditions, particularly through the creation of algorithms that remain reliable even in the presence of quantum computers.

Therefore, the relevance of this research lies in the necessity to protect information in the context of the rapid development of quantum computing systems. The scientific novelty of this study lies in the comprehensive analysis of post-quantum cryptosystems and their resistance to new types of threats. The research offers a comparison of the effectiveness of classical cryptographic methods with post-quantum ones, allowing the identification of their strengths and weaknesses in the context of quantum computing.

The practical significance of this research lies in the potential to use its results to implement new standards for cryptographic information protection. This is especially important for organizations that process confidential data, such as banks, government institutions, and companies involved in the development of artificial intelligence technologies.

Keywords: *quantum computing, classical cryptographic systems, threats, cryptographic algorithms, information security, quantum technologies.*

Богом'я В. І., Черемісіна Л. О., Ярмолатій А. В., Галунько В. В.

ЕФЕКТИВНА ОРГАНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ СТАНДАРТІВ ТА ПРАВОВИХ НОРМ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Сучасне суспільство активно використовує цифрові технології в різних сферах життя: економіці, охороні здоров'я, освіті, державному управлінні тощо. Це створює нові можливості, але в той же час відкриває шлях для появи кіберзагроз. Все це відповідно призводить до величезних економічних втрат від кібератак. Так збитки, завдані кібератаками, щороку сягають мільярдів доларів. Захист інформації є важливим елементом економічної стабільності та національної безпеки держави. Таким чином, актуальність статті обумовлена необхідністю протистояти сучасним кіберзагрозам, забезпечити безпеку інформації, дотримуватися законодавчих вимог та адаптуватися до швидких змін у цифровому світі. Відомо, що міжнародні стандарти часто розробляються з урахуванням глобальних практик, але їх застосування може бути ускладнене через локальні особливості. Загальні виклики у впровадженні стандартів і правових норм вже визначені фахівцями, але не наведена характеристика проблем у забезпеченні кібербезпеки та які рекомендації необхідно зробити для удосконалення системи стандартів та правових норм.

Тому метою статті є аналіз існуючих систем стандартів та правових норм у сфері інформаційної безпеки для розуміння їхньої ефективності, актуальності та можливостей удосконалення для розроблення відповідних рекомендацій. За результатами аналізу можна зазначити, що міжнародні стандарти, такі як ISO/IEC 27001 та ISO/IEC 27002, забезпечують фундаментальні принципи для створення систем управління інформаційною безпекою, сприяючи уніфікації підходів та управлінню ризиками. Разом з тим, динамічний розвиток кіберзагроз вимагає регулярного оновлення нормативно-правової бази для ефективної протидії новим викликам. Також спостерігається важливість комплексного підходу до забезпечення інформаційної безпеки. Це дозволить створити ефективну організацію системи стандартів та правових норм інформаційної безпеки, а тому створити безпечне інформаційне середовище, яке сприятиме стабільному розвитку суспільства, бізнесу та держави в умовах цифрової трансформації.

Ключові слова: інформаційна безпека, кібербезпека, кіберзагроза, міжнародні стандарти, національні стандарти, правові норми, ефективність, система

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Сучасне цифрове суспільство характеризується швидким розвитком цифрових технологій. Сучасне суспільство активно використовує цифрові технології в різних сферах життя: економіці, охороні здоров'я, освіті, державному управлінні тощо. Це створює нові можливості, але в той же час відкриває шлях для появи кіберзагроз [1,6].

Наразі спостерігається швидке зростання кількості та складності кіберзлочинів, коли атаки на інформаційні системи, витік даних, фішинг, шкідливе програмне забезпечення та інші форми кіберзлочинності становлять серйозну загрозу для компаній, урядів та приватних осіб.

Все це відповідно призводить до величезних економічних втрат від кібератак. Так збитки, завдані кібератаками, щороку сягають мільярдів доларів. Захист інформації є важливим елементом економічної стабільності та національної безпеки держави.

Ще одним аспектом ситуації є те, що у світі зростає обсяг персональної інформації, що зберігається та передається в цифровій формі. Забезпечення конфіденційності є важливим аспектом захисту прав людини, тому захист персональних даних є дуже важливим [2,7].

Також присутні міжнародні та геополітичні загрози, коли кіберпростір стає ареною міждержавного протистояння, а кіберзброя – новим інструментом у геополітиці.

Національні та міжнародні правові норми вимагають впровадження заходів безпеки, що зобов'язує організації дотримуватися стандартів і законодавчих вимог, тому виникає необхідність дотримання відповідного законодавства [3,4].

Таким чином, актуальність статті обумовлена необхідністю протистояти сучасним кіберзагрозам, забезпечити безпеку інформації, дотримуватися законодавчих вимог та адаптуватися до швидких змін у цифровому світі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Правові норми у сфері кібербезпеки визначені у міжнародному законодавстві Загальної декларацією прав людини (ст. 12 про конфіденційність) та Будапештської конвенцією про кіберзлочинність [5,6].

Правові норми у сфері кібербезпеки визначені у Національному законодавстві Законом України "Про основні засади забезпечення кібербезпеки України" та Європейськими директивами, наприклад, GDPR.

Низький рівень обізнаності про стандарти наведено у [7, 8].

Труднощі адаптації міжнародних норм до національних реалій наведено у [9, 10], коли міжнародні стандарти часто розробляються з урахуванням глобальних практик, але їх застосування може бути ускладнене через локальні особливості.

Загальні виклики у впровадженні стандартів і правових норм визначені у [9, 10], але не наведена характеристика проблем у забезпеченні кібербезпеки та які рекомендації необхідно зробити для удосконалення системи стандартів та правових норм.

Метою статті є аналіз існуючих систем стандартів та правових норм у сфері інформаційної безпеки для розуміння їхньої ефективності, актуальності та можливостей удосконалення для розроблення відповідних рекомендацій.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести огляд міжнародних та національних стандартів кібербезпеки (наприклад, ISO/IEC 27001, NIST, GDPR).
2. Провести дослідження правового регулювання кібербезпеки на рівні національного та міжнародного законодавства.
3. Провести аналіз основних викликів у впровадженні стандартів та норм.
4. Розробити рекомендації щодо вдосконалення системи стандартів і правових норм у сфері інформаційної безпеки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Коротко розглянемо теоретичні основи інформаційної безпеки, а саме наддамо поняття інформаційної безпеки та кібербезпеки, визначимо основні загрози інформаційній безпеці та характеризуємо роль стандартів і правових норм у забезпеченні кібербезпеки.

Інформаційна безпека – це стан захищеності інформаційних ресурсів та процесів їхньої обробки, який забезпечує конфіденційність, цілісність та доступність інформації.

Основними цілями інформаційної безпеки є конфіденційність – захист інформації від несанкціонованого доступу; цілісність – забезпечення коректності та захист від несанкціонованих змін та доступність – гарантування доступу до інформації у необхідний час.

Що стосується поняття «кібернетична безпека», то кібербезпека – це сукупність заходів, спрямованих на захист систем, мереж, програмного забезпечення та даних від кіберзагроз, таких як хакерські атаки, шкідливі програми, фішинг тощо. Кібербезпека є складовою інформаційної безпеки, орієнтованою переважно на цифрове середовище.

Які основні загрози інформаційній безпеці існують та визначені фахівцями в цієї галузі:

- кіберзлочини: хакерські атаки (наприклад, DDoS-атаки), викрадення персональних або корпоративних даних, фішинг (обман користувачів для отримання їхніх даних).
- шкідливе програмне забезпечення: віруси, трояни, програми-зидирники (ransomware), бекдори (backdoor) для несанкціонованого доступу до систем.
- інсайдерські загрози: дії співробітників, що можуть ненавмисно або навмисно створити загрози для інформаційної безпеки.

- порушення конфіденційності: незаконний доступ до персональних даних, витік корпоративної інформації.
- соціальна інженерія: маніпулювання людьми для отримання доступу до конфіденційної інформації.
- технічні збої: аварії в обладнанні, втрати даних через несправності систем.

Для визначення ролі стандартів і правових норм у забезпеченні кібербезпеки розглянемо такі стандарти кібербезпеки, як міжнародні стандарти (ISO/IEC 27001, NIST Cybersecurity Framework), що забезпечують уніфікацію вимог до безпеки інформації, визначення процедур для оцінки ризиків і реагування на інциденти, підвищення рівня довіри між партнерами та клієнтами. Також національні стандарти, що допомагають враховувати локальні особливості та специфіку законодавства [10,11].

Системи стандартів у сфері інформаційної безпеки організована наступним чином. Існують міжнародні стандарти в сфері інформаційної безпеки.

ISO/IEC 27001 (Система управління інформаційною безпекою). Цей стандарт є міжнародно визнаною моделлю для створення, впровадження, моніторингу та вдосконалення системи управління інформаційною безпекою (СУІБ). Основні характеристики стандарту: забезпечення захисту інформації шляхом управління ризиками; визначає вимоги до впровадження політики інформаційної безпеки, управління ризиками, моніторингу, аудиту та вдосконалення безпеки; ідентифікація активів та оцінка ризиків; впровадження контролю доступу, криптографії, управління інцидентами та безперервності бізнесу; дозволяє організаціям отримати офіційне підтвердження відповідності вимогам стандарту.

ISO/IEC 27002 (Керівні принципи забезпечення безпеки). Цей стандарт є доповненням до ISO/IEC 27001 і надає практичні рекомендації для впровадження заходів безпеки. Основними характеристиками є: допомогти організаціям впроваджувати відповідні заходи захисту на основі аналізу ризиків; охоплює 14 основних доменів, серед яких: управління активами, безпека персоналу, управління доступом, криптографія, фізична безпека, захист операцій тощо; вибір конкретних заходів безпеки залежно від бізнес-цілей і ризиків; адаптація політик безпеки до потреб організації.

Існують також інші міжнародні релевантні стандарти, наприклад:

- ISO/IEC 27005 – Управління ризиками інформаційної безпеки, який забезпечує методологічну основу для ідентифікації, оцінки та управління ризиками.
- ISO/IEC 22301 – Управління безперервністю бізнесу, який регламентує підготовку організацій до кризових ситуацій.
- NIST Cybersecurity Framework (США). Включає 5 основних функцій: ідентифікація, захист, виявлення, реагування, відновлення. Служить національною основою для управління кіберризиками.

До національних стандартів можна віднести ДСТУ в Україні. Наприклад, ДСТУ ISO/IEC 27001:2015 – національна адаптація міжнародного стандарту для українських організацій, що законодавчо підтримує впровадження СУІБ в державному та приватному секторах.

Також, необхідно визначити NIST (США). Це Національний інститут стандартів і технологій США розробляє рекомендації та стандарти кібербезпеки, наприклад, NIST SP 800-53 (Контроль безпеки та конфіденційності) та зосереджується на інтеграції безпеки в технологічну інфраструктуру [10, 12].

Іншими прикладами можуть бути у Німеччині BSI IT-Grundschutz; у ЄС: ENISA (Європейське агентство з кібербезпеки).

Вплив стандартів на управління ризиками та організацію безпеки здійснюється через систематизацію процесів, коли стандарти надають структурований підхід до управління ризиками, а також визначають етапи: ідентифікація активів, оцінка ризиків, вибір заходів захисту [10, 11].

Також вплив стандартів на управління ризиками та організацію безпеки здійснюється через підвищення ефективності управління, коли впровадження стандартів сприяє уніфікації політик

безпеки, що знижує імовірність помилок та забезпечується інтеграція безпеки в усі бізнес-процеси. Це надає можливість [12,13]:

- зменшення ризиків, коли відповідність стандартам допомагає мінімізувати кіберзагрози шляхом впровадження надійних технічних і організаційних заходів;
 - підвищення довіри, коли організації, які дотримуються міжнародних стандартів, викликають більше довіри у клієнтів і партнерів;
 - підготовка до інцидентів, коли стандарти регламентують процеси управління інцидентами, забезпечення безперервності бізнесу та швидкого відновлення після атак;
 - відповідність законодавству, коли дотримання стандартів часто є обов'язковою умовою для виконання правових вимог, таких як GDPR.

Таким чином, стандарти та національні регуляції відіграють важливу роль у формуванні ефективної системи інформаційної безпеки, сприяючи зменшенню ризиків і підвищенню стійкості організацій до кіберзагроз.

За результатами аналізу [1-7, 11] можна визначити характеристики проблем у сфері впровадження стандартів і правових норм.

По-перше, це низький рівень обізнаності про стандарти, що обумовлено відсутністю інформаційної кампанії щодо важливості стандартів кібербезпеки, недостатнім рівнем підготовки фахівців у сфері інформаційної безпеки та складністю технічних термінів і процедур, викладених у стандартах.

Наслідками цього низького рівня обізнаності є те, що підприємства та організації не впроваджують належні заходи безпеки та присутній ризик неналежного реагування на кіберінциденти [11].

По-друге це труднощі адаптації міжнародних норм до національних реалій, що обумовлено різницею в юридичних системах та економічних умовах різних країн, високою вартістю адаптації стандартів для малих і середніх підприємств та відсутністю відповідних ресурсів та інфраструктури для впровадження.

Наслідками цього є повільне впровадження міжнародних стандартів у національне законодавство та невідповідність вимогам глобального ринку.

По-третє, це динаміка кіберзагроз та потреба в оновленні законодавства, що обумовлено постійним розвитком нових типів кіберзагроз (наприклад, шкідливе ПЗ, атаки на IoT), технологічними інноваціями (штучний інтелект, блокчейн, квантові обчислення), які змінюють середовище загроз та застаріле або недостатньо деталізоване законодавство у багатьох країнах.

Наслідками динаміка кіберзагроз є недостатня підготовленість національних систем безпеки до сучасних викликів та відставання від потреб цифрового суспільства [11,12].

Рекомендації. Враховуючи вищенаведене доцільно надати рекомендації щодо вдосконалення систем стандартів і правових норм, як розробка нових стандартів, що відповідають сучасним викликам, посилення міжнародного співробітництва у сфері кібербезпеки, розроблення освітніх ініціатив для підвищення рівня компетенцій у сфері кібербезпеки.

Що стосується розроблення нових стандартів, що відповідають сучасним викликам, це – інтеграція вимог до захисту новітніх технологій (IoT, штучний інтелект (AI), хмарних обчислень); розробка стандартів, що враховують галузеві особливості (медицина, фінанси, енергетика), спрощення та адаптація стандартів для різних масштабів бізнесу (малий і середній бізнес).

Це наддасте змогу отримати збільшення охоплення стандартами різних типів організацій та підвищення готовності до нових типів загроз.

Що стосується посилення міжнародного співробітництва у сфері кібербезпеки, це – створення глобальних платформ для обміну досвідом та інформацією про кіберзагрози, розробка універсальних стандартів, які будуть взаємно прийнятими різними країнами, підтримка країн, що розвиваються, у впровадженні кібербезпеки.

Це наддасте змогу отримати такий очікуваний ефект, як зменшення розриву між країнами у рівні кіберзахисту та підвищення ефективності міжнародної координації у боротьбі з кіберзлочинністю.

Що стосується освітніх ініціатив для підвищення рівня компетенцій у сфері кібербезпеки, це – впровадження освітніх програм з кібербезпеки у школах та університетах, підвищення кваліфікації існуючих фахівців через тренінги та сертифікації, організація національних і міжнародних конференцій, хакатонів, семінарів.

Це надасте змогу отримати такий очікуваний ефект, як формування кадрів, здатних ефективно впроваджувати сучасні стандарти та підвищення загального рівня кібергігієни серед населення.

Реалізація зазначених рекомендацій дозволить створити більш гнучку, адаптивну та ефективну систему кібербезпеки, яка відповідатиме сучасним викликам цифрового світу, забезпечуючи захист держави, бізнесу та громадян.

Висновки з дослідження

1. Підводячи підсумки аналізу систем стандартів і правових норм, можна зазначити, що міжнародні стандарти, такі як ISO/IEC 27001 та ISO/IEC 27002, забезпечують фундаментальні принципи для створення систем управління інформаційною безпекою, сприяючи уніфікації підходів та управлінню ризиками.

Але спостерігаються труднощі впровадження національних норм, тому адаптація міжнародних стандартів до національних реалій потребує врахування економічних, юридичних та технологічних особливостей кожної країни. Це уповільнює процес інтеграції сучасних заходів безпеки.

Разом з тим, динамічний розвиток кіберзагроз вимагає регулярного оновлення нормативно-правової бази для ефективної протидії новим викликам.

2. Також спостерігається важливість комплексного підходу до забезпечення інформаційної безпеки. Це по-перше системність, коли забезпечення інформаційної безпеки повинно включати як технічні, так і організаційні заходи. При цьому важливо забезпечити інтеграцію стандартів, правових норм та управлінських рішень.

По-друге, це освіта та обізнаність, коли необхідно підвищувати рівень знань та компетенцій як серед фахівців, так і серед широкого загалу, щоб запобігати основним кіберзагрозам.

По-третє, це міжнародне співробітництво, коли глобальний характер кіберзагроз потребує координації зусиль на міждержавному рівні, включаючи обмін інформацією та кращими практиками.

По-четверте, це інновації, коли для протидії новим викликам у сфері кібербезпеки важливо постійно розробляти та впроваджувати сучасні технології, які відповідають актуальним загрозам.

Це дозволить створити ефективну організацію системи стандартів та правових норм інформаційної безпеки, а тому створити безпечне інформаційне середовище, яке сприятиме стабільному розвитку суспільства, бізнесу та держави в умовах цифрової трансформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ ISO/IEC 27000:2018. Інформаційні технології. Методи захисту. Системи управління інформаційною безпекою (ISO/IEC 27000:2016, IDT).
2. ДСТУ ISO/IEC 27002:2018 Інформаційні технології. Методи захисту. Звід практик щодо заходів інформаційної безпеки (ISO/IEC 27002:2013; Cor 1:2014, IDT).
3. IEEE 802.11-2020 – стандарт безпеки бездротових локальних мереж, контроль доступу (MAC) та функції фізичного рівня (PHY).
4. Впровадження засобів захисту інформації для споживачів та постачальників хмарних послуг на основі стандарту ISO/IEC 27017.
5. Стандарт безпеки даних платіжних карт PCI DSS. Стандарт FINRA для забезпечення захисту даних користувачів при здійсненні фінансових операцій.

6. Інформаційна безпека держави: навч. посіб. для студ. спец. 6.170103 «Управління інформаційною безпекою», 125 «Кібербезпека»/ В.І. Гур'єв, Д.Б. Мехед, Ю.М. Ткач, І.В. Фірсова. Ніжин: ФОП Лук'яненко В.В. ТПК «Орхідея», 2021. 166 с. : іл.
7. Turkalo V., Zaplotynskyi B. Fundamentals of information security management system engineering of modern process-oriented enterprises: monograph. Kyiv: KUIPL, 2024. 81 p., <https://www.lap-publishing.com>
8. Turkalo V.M., Bogomya V.I., Iarmolatii A.V. Information security management system: problem aspects of implementation. Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку: матеріали XXXVIII Міжнародної науково-практичної конференції / за ред. І.В. Жукової, Є.О. Романенка. м. Брно (Чехія): ГО «ВАДНД», 07 листопада 2023 р. С.276-280.
9. Корченко О.Г. Аудит та управління інцидентами інформаційної безпеки // О.Г. Корченко, С.О. Гнатюк, С.В. Казмірчук, В.М. Панченко, С.В. Мельник. Київ: Центр навч.-наук. та наук.-пр. видань НА СБ України, 2020. 193 с.
10. Юдін О.І. Захист інформації в мережах передачі даних // О.І. Юдін, О.Г. Корченко, Г.Ф. Конахович Київ: Вид-во ТОВ «НВП» Інтерсервіс», 2021. 716 с.
11. Юдін О.К. Інформаційна безпека. Нормативно-правове забезпечення: підручник / О.К.Юдін. Київ : НАУ, 2021. 639 с.
12. Інформаційна та кібербезпека: соціотехнічний аспект: підручник / [В. О. Хорошко, В.Б. Толубко, С.В. Толюпа]; за заг. ред. д-ра техн. наук, професора В.Б. Толубка. Київ: ДУТ, 2021, 288 с.
13. Богом'я В.І., Кочегаров В.С. Кібербезпека в хмарних сервісах за допомогою застосування криптографічних методів. Водний транспорт. 2022. Вип.1(35). С.25–32.

Bohomia V. I., Cheremisina L. O., Yarmolatii A. V., Galynko V.V.

EFFECTIVE ORGANIZATION OF THE SYSTEM OF STANDARDS AND LEGAL NORMS OF INFORMATION SECURITY

Modern society actively employs digital technologies in various areas of life: the economy, healthcare, education, public administration, and more. This creates new opportunities but simultaneously opens pathways for the emergence of cyber threats.

All this leads to significant economic losses caused by cyberattacks. The damage inflicted by cyberattacks amounts to billions of dollars annually. Information protection is a crucial element of a state's economic stability and national security.

Thus, the relevance of this article is driven by the need to counter contemporary cyber threats, ensure information security, comply with legislative requirements, and adapt to rapid changes in the digital world.

It is known that international standards are often developed with consideration of global practices, but their application can be complicated by local specifics. General challenges in implementing standards and legal norms have already been identified by experts, but the specific issues in ensuring cybersecurity and the recommendations needed to improve the system of standards and legal norms have not been fully characterized.

The aim of this article is to analyze the existing systems of standards and legal norms in the field of information security to understand their effectiveness, relevance, and potential for improvement, and to develop appropriate recommendations.

Based on the analysis, it can be noted that international standards, such as ISO/IEC 27001 and ISO/IEC 27002, provide fundamental principles for creating information security management systems, contributing to the unification of approaches and risk management.

At the same time, the dynamic evolution of cyber threats requires the regular updating of the regulatory framework to effectively address new challenges.

Moreover, the importance of a comprehensive approach to ensuring information security has been observed. This will enable the creation of an effective organization of the system of standards and legal norms of information security, fostering a secure information environment that supports the stable development of society, business, and the state in the context of digital transformation.

Keywords: information security, cybersecurity, cyber threat, international standards, national standards, legal norms, effectiveness, system