

**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 2 (43 )**

**Київ  
2025**

Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2025. – Випуск 2 (43). – 238 с. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43>

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](mailto: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 № 21 від 27.03.2025 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

#### **Кириченко О.С.**

Вплив режиму та способу конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання ..... 5

#### **Кучеренко Н. В., Капочкін Б.Б., Капочкіна М. Б.**

Прикладні аспекти закономірності процесу поглинання енергії акустичних хвиль у воді ..... 20

#### **Науменко А.В., Капочкіна М.Б.**

Теорія і практика оптимізації проектування днопоглиблювальних робіт у руслах річок ..... 31

#### **Гусак І.Л., Боріна М. В.**

Метод формування моделей руху судна ..... 48

#### **Томчаковський Г.Г., Капочкіна М.Б.**

Результати дослідження причин мусонного вітру над індоокеанською аномалією сили тяжіння ..... 57

#### **Кириллова О.В., Ларіна І.М.**

Критерії та умови сталого функціонування контейнерного терміналу порту ..... 75

#### **Монюшко М.М., Васалатій Н.В., Черой Л.І.**

Аналіз швидкостей течій в окремих районах середземного моря: розрахунки та їх значення для ефективного судноводіння ..... 87

#### **Калініченко Є.В.**

Енергоефективність та безпека судноплавства: точки поєднання та розбіжності ..... 97

#### **Гончарук І.П., Головань А.І.**

Інноваційна система машинного навчання для моніторингу суднового обладнання в реальному часі ..... 104

#### **Тарасенко Т. В., Мазур Т. М.**

Основні методи моніторингу для управління енергоефективністю на судні згідно додатку VI МК МАРПОЛ 73/78 ..... 117

#### **Калініченко Є. В., Колеснік О.В., Калініченко Г.Є.**

Поза правилом 19: аналіз неофіційної ієрархії в процесі прийняття рішень під час навігації в обмеженій видимості ..... 122

#### **Крупов І.В.**

Проведення днопоглиблювальних робіт в разі змінного гідрографічного ландшафту морського дна ..... 135

#### **Сагін С.С., Сагін С.В.**

Забезпечення безпеки судноплавства під час розходження з суднами, що виконують днопоглиблювальні роботи ..... 149

|  |     |
|--|-----|
| <b>Сагін С.В., Поповський О.Ю., Куропятник О.А.</b><br>Особливості регулювання частоти обертання суднового дизеля під час використання системи вибіркового каталітичного відновлення ..... | 161 |
| <b>Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С.</b><br>Дослідження впливу органічних нанопокриттів на забезпечення процесів мащення підшипникових вузлів судових дизелів .....                  | 176 |
| <b>Пізінцалі Л.В., Россомаха О.І.,<br/>Росомаха О.А., Шахов В.І.</b><br>Суднова утилізація як інструмент подолання дефіциту металобрухту в металургійній галузі України .....              | 196 |
| <b>Сагін С.В., Поповський О.Ю., Куропятник О.А.</b><br>Забезпечення швидкісних режимів роботи судових дизелів, що використовують систему рециркуляції випускних газів .....                | 200 |
| <b>Кучерук Г.Ю., Лучко О.С.</b><br>Екзистенціальні перешкоди в професійній діяльності моряків .....  | 215 |

## МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

|   |     |
|---|-----|
| <b>Лопатюк С.П.</b><br>Використання команд «SLICE», «SECTIONPLANE» при 3d-моделюванні в AUTOCAD ..... | 220 |
|---|-----|

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

|  |     |
|--|-----|
| <b>Тупкало В.М., Богом'я В.І., Ярмолатій А.В.</b><br>Концептуальні засади системотехніки кіберзахисених цифрових систем на основі використання апарату синтезу сигнатурної алгебри ..... | 248 |
| <b>Автори випуску</b> .....  | 237 |

## СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

УДК 629.1.04:621.3.082.62

doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.01

© Кириченко О.С.

**ВПЛИВ РЕЖИМУ ТА СПОСОБУ КОНВЕКЦІЇ НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
СКОНСТРУЙОВАНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ  
СУДНОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ**

В роботі проаналізовано вплив режиму природної і примусової конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля суднового електричного обладнання. Відзначено про особливості експлуатації термоелектричних пристроїв у морському та річковому судноплавстві, зокрема вплив підвищеної вологості, корозійної активності солоної води, вібрації і змінних температурних навантажень. Розглянуто особливості природної та примусової конвекції, а також їхній вплив на ефективність тепловідведення. Окремо підкреслено необхідність застосування примусової конвекції для ефективного охолодження термоелектричного модуля. Визначено, що природної конвекції часто недостатньо для розсіювання тепла, особливо за умов підвищених теплових навантажень у судновому середовищі. Проаналізовано способи підвищення коефіцієнта тепловіддачі при примусовій конвекції, зокрема застосування повітряного охолодження за допомогою вентилятора та радіатора, а також рідинного охолодження. Визначено оптимальні умови теплового режиму для забезпечення стабільної роботи термоелектричного модуля в суднових умовах. Сконструйовано термоелектричний модуль площею  $8 \times 8$  мм, що відносить його до категорії малих модулів. Габаритні розміри П-подібного ланцюга модуля становлять  $6,11 \times 7,12 \times 1,9$  мм. Розміщення 11 напівпровідників Р-та 11 напівпровідників N-типу, 23-х металевих контактних комутаційних пластин дозволило створити у сконструйованому модулі 21-ну напівпровідникову термопару. За результатами чисельного розрахунку отримано розподіл основних робочих параметрів сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання при силі струму  $0,5$  А в режимі примусової конвекції з коефіцієнтом тепловіддачі  $h=50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Також, досліджено робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля при зміні струму в діапазоні  $0-1$  А для різних коефіцієнтів тепловіддачі. Проведено аналіз параметрів, зокрема густини струму  $j$ , напруги  $U$ , напруженості електричного поля  $E$ , температури гарячої сторони  $t$ , густини теплового потоку  $q$ , омичного нагріву  $J$ , а також еквівалентного стресу  $\sigma$  і деформацій  $\epsilon$ .

**Ключові слова:** термоелектричний модуль, конструювання, конвекція, коефіцієнт тепловіддачі, робочі характеристики, термоелектричний ефект Пельтьє, суднове електрообладнання.

**Постановка проблеми.** Сучасне суднове електрообладнання потребує ефективних методів термостатування для забезпечення стабільної роботи електричних та електронних компонентів і підвищення їх надійності. Одним із перспективних рішень у цій галузі є використання термоелектричних модулів (ТЕМ) на основі зворотного термоелектричного ефекту Пельтьє, які дозволяють здійснювати локальне охолодження без застосування рухомих частин та робочих рідин. Ефективність роботи таких модулів значною мірою залежить від теплового режиму їх експлуатації, а також від способу організації конвекції для відведення тепла. Виділяють природний (вільний) і примусовий (вимушений) режими конвекції. Природна конвекція базується на теплових потоках, що виникають через різницю температур, і є енергоефективною, але менш дієвою при високих теплових навантаженнях. Радіаторне охолодження забезпечує пасивне відведення тепла завдяки збільшенню площі тепловіддачі, проте ефективність його роботи залежить від умов навколишнього середовища. Вентиляторне охолодження значно підвищує ефективність тепловідведення, але створює шум і є менш

надійним через наявність рухомих частин. Примусова конвекція здійснюється за допомогою радіаторів, вентиляторів або рідинного охолодження, що дозволяє значно покращити тепловідведення, проте вимагає додаткових витрат енергії та конструктивних рішень. Рідинне охолодження є найбільш ефективним способом, оскільки рідина має вищу теплопровідність, проте цей метод складніший у реалізації і вимагає додаткових насосів та трубопроводів.

Термоелектричні модулі Пельтьє широко застосовуються у судновому електрообладнанні, зокрема в системах охолодження електронних блоків суднової автоматики, навігаційного обладнання та комунікаційних пристроїв. Наприклад, вони використовуються в охолоджувальних модулях радарних систем, термостатованих корпусах судових комп'ютерів та системах контролю температури в енергетичних установках суден.

Актуальність дослідження зумовлена зростаючими вимогами до ефективності та надійності судових електричних та електронних систем, які працюють у складних морських і річкових умовах. Висока вологість, корозійна активність солоної води, зміни температури та вібрації можуть негативно впливати на роботу електричних та електронних компонентів, що підвищує потребу в стабільних і малогабаритних системах терморегуляції. Використання термоелектричних модулів Пельтьє є перспективним напрямом, однак їх ефективність значною мірою залежить від оптимізації тепловідведення, що визначає необхідність даного дослідження.

У даній статті досліджено вплив режиму та способу конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля, призначеного для охолодження судового електрообладнання. Проведений аналіз дозволяє визначити оптимальні умови експлуатації модуля, що сприятиме підвищенню його ефективності та надійності у складі бортових систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження у сфері термоелектричного охолодження свідчать про зростаючий інтерес до застосування термоелектричних модулів (ТЕМ) у судових електричних та електронних системах. Багато наукових праць присвячено вивченню ефективності ТЕМ у різних режимах експлуатації, проте питання оптимізації тепловідведення залишається актуальним. Особливу увагу приділяють впливу способу організації конвекції на продуктивність модулів, оскільки саме тепловий режим визначає їх довговічність та енергетичну ефективність. У зв'язку з цим проведено ґрунтовний аналіз сучасних підходів до керування розподілом теплових потоків і їх застосування у судовій техніці, що становить основний інтерес даного дослідження.

У дослідженні [1] розглянуто перспективи використання генераторів в океанічних термоелектричних системах (ОТЕС) для перетворення теплової енергії. Проаналізовано ефективність таких рішень та доведено можливість розробки ОТЕС із прийнятними техніко-економічними показниками.

У роботах [2-5] детально розглядаються фундаментальні принципи теорії термоелектричних ефектів, їх математичне моделювання, а також методи оптимізації характеристик термоелектричних матеріалів і пристроїв. Окремі частини роботи [6] **можуть виявитись корисними** під час конструювання термоелектричних модулів, що мають допустимий рівень термічних напружень.

Новий підхід до генерації електроенергії на морських суднах, зокрема на кораблях та самохідних плавзасобах представлено в [7]. Запропонована технологія передбачає використання великих масивів термоелектричних модулів Зеебека, закріплених на внутрішній поверхні металевих пластин корпусу судна, розташованих під ватерлінією. Робота цих масивів базується на використанні тепла, яке виділяється з вихлопних газів головного двигуна, електрогенератора або допоміжного обладнання, зокрема судових пальників чи сміттєспалювальних установок.

Публікація [8] представляє систему рекуперації відпрацьованого тепла (WHRS), яка включає термоелектричний генератор (ТЕГ) та високоефективний підвищувальний перетворювач постійного струму, розроблений для підвищення енергоефективності морських суден.

Ознайомитись з унікальною концепцією збору енергії можна в статті [9]. Пропонована система використовує термоелектричний генератор (ТЕГ) для перетворення теплової енергії вихлопних газів судового двигуна в електричну. Інноваційний підхід до розробки ТЕГ базується на принципах струнного перетворювача, що дозволяє усунути дисбаланс у втраті потужності та забезпечити

ефективну роботу всіх модулів ТЕГ на їх максимальній точці потужності (MPP), що особливо важливо для масштабного впровадження цієї технології.

У [10] розробляється, виготовляється та тестується прототип термоелектричного генератора (ТЕГ), призначеного для збору енергії з метою живлення бездротових датчиків, що здійснюють моніторинг стану суднового обладнання. Ця технологія базується на ефективному перенесенні тепла між джерелами відпрацьованої теплоти судна та навколишнім повітрям, що дозволяє генерувати електроенергію безпосередньо, без використання рухомих механічних компонентів.

Визначенню коригувального коефіцієнта конвекції для застосування в методі перехідних процесів при аналізі термоелектричних модулів присвячена робота [11]. В ній, також, наведено рекомендації щодо оптимальної кореляції для розрахунку поправочного коефіцієнта конвекції.

Результати комп'ютерного моделювання механічних напружень, що виникають у термоелектричних модулях охолодження за умов циклічного навантаження представлено в [12]. Методом ультразвукового аналізу визначено тензор пружних сталей для матеріалу на основі  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , а також встановлено межі його пружної та пластичної деформації.

У [13] висвітлено розробку теплової моделі для системи дистиляції води на основі термоелектричного модуля. Запропонована модель дозволяє проводити детальний аналіз експериментальних даних, отриманих у процесі роботи термоелектричної дистиляційної системи. В ході дослідження встановлено значення для локального коефіцієнту теплопередачі конвекції.

Експериментальній оцінці теплових та електричних характеристик енергетичної системи, що базується на термоелектричному генераторі присвячена робота [14]. Система, що розглядається, містить ребристий пластинчастий радіатор із вентиляторним охолодженням, а також алюмінієвий РТС-нагрівач, який використовується для імітації теплової поведінки мікропроцесорного блоку під навантаженням із швидким підвищенням температури.

Термоелектричні холодильники з вільною конвекцією тепла проаналізовано в статті [15], а термоелектричне охолодження як інноваційний підхід до точкового відведення тепла від надвеликих інтегральних схем (НВІС) розглянуто в [16]. Технологія дозволяє забезпечити ефективне регулювання температури, зменшуючи ризик перегріву. Зазвичай її комбінують із системами примусової конвекції, такими як вентилятори, що підвищує ефективність тепловідведення та сприяє стабільній роботі електронних компонентів.

У [17] запропоновано стратегію оптимізації, що спрямована на максимальне підвищення ефективності примусового конвекційного охолодження в межах заданого об'єму радіатора при фіксованих енергетичних витратах і рівні генерації ентропії.

Дослідження [18] є корисним при вивченні стаціонарних теплових полів у судових електросистемах. У публікації [19] здійснено порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів, які відрізняються за геометрією напівпровідникових елементів, призначених для електрообладнання транспортних засобів. У [20] наведено результати чисельного тривимірного моделювання термоелектричного охолоджувача, що використовується у вимірювальних системах автоматизованого контролю. Особливості застосування 3D-моделювання для формування професійної готовності інженерів висвітлено в [21].

У [22] детально розглянуто можливості використання компенсованих комутаційних пластин у різних варіаціях термоелектричних елементів, призначених для транспортного електрообладнання. У свою чергу, в [23] представлено термоелектричний модуль, в якому застосовано особливу технологію контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів, що дозволяє суттєво знизити вплив термічних напружень. В [24, 25] проаналізовано одношарове демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях, з використанням конкретного прикладу показано вплив термічних напружень на модель термоелектричного модуля з класичною конструкцією без демпфування та на різні моделі термоелектричних модулів з демпфуванням.

**Мета дослідження** полягає в аналізі впливу режиму природної і примусової конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання, а також в

розгляді способів реалізації примусової конвекції із застосуванням вентиляторного або рідинного охолодження.

**Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження.** В дослідженні проаналізовано вплив типу конвекції на сконструйований термоелектричний модуль судного електрообладнання. Для аналізу роботи термоелектричного модуля суднового електрообладнання з урахуванням електричної, теплової і механічної складової можуть бути використані аналітичні рівняння [2, 4, 5].

Рівняння нерозривності електричного заряду (електрична частина):

$$\nabla \left( \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) = 0, \quad (1)$$

де  $\mathbf{J}$  – вектор густини електричного струму,  $\text{A}/\text{m}^2$ ;

$\mathbf{D}$  – вектор густини електричного потоку,  $\text{Кл}/\text{m}^2$ ;

Рівняння теплопровідності (теплова частина):

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} = \dot{q}, \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу,  $\text{кг}/\text{m}^3$ ;

$C$  – теплоємність матеріалу,  $\text{Дж}/^\circ\text{C}$ ;

$\mathbf{q}$  – вектор теплового потоку,  $\text{Вт}/\text{m}^2$ ;

$\dot{q}$  – тепловиділення на одиницю об'єму,  $\text{Вт}/\text{m}^3$ .

Рівняння (1) і (2) зв'язані за допомогою визначальних рівнянь для векторів теплового потоку та густини електричного струму, а також визначального рівняння для діелектричного середовища:

$$\mathbf{q} = [\Pi] \mathbf{J} - [\lambda] \nabla T; \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = [\sigma] (E - [\alpha] \nabla T), \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = [\varepsilon] \mathbf{E}, \quad (5)$$

де  $[\Pi]$  – матриця коефіцієнтів Пельтьє,  $\text{В}$ ;

$[\lambda]$  – матриця теплопровідності,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$[\sigma]$  – матриця електропровідності,  $\text{См}/\text{м}$ ;

$[\alpha]$  – матриця коефіцієнтів Зеєбека,  $\text{В}/\text{К}$ ;

$\mathbf{E}$  – вектор інтенсивності електричного поля,  $\text{В}/\text{м}$ ;

$[\varepsilon]$  – матриця коефіцієнтів діелектричної проникності,  $\text{Ф}/\text{м}$ .

При незмінності в часі магнітних полів електричне поле  $\mathbf{E}$  є безвихровим  $\nabla \times \mathbf{E} = 0$  і може бути визначене за скалярним електричним потенціалом  $\varphi$ :

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi. \quad (6)$$

Підстановка рівнянь (3)–(6) в рівняння (1)–(2) дає систему система вирішуючих рівнянь при пов'язаному термоелектричному аналізі:

$$\begin{cases} \nabla \left( [\varepsilon] \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \nabla ([\sigma] [\alpha] \nabla T) + \nabla ([\sigma] \nabla \varphi) = 0; \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla ([\Pi] \mathbf{J}) - \nabla ([\lambda] \nabla T) = \dot{q}. \end{cases} \quad (7)$$

де член  $\dot{q}$  у системі рівнянь (7) включає електричну потужність  $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ , що витрачається на генерацію теплоти (джоулевий нагрів) і здійснення роботи полем Зеєбека (термоелектричний ефект)  $[\alpha] \cdot \nabla T$ .

При пов'язаному термоелектричному аналізі для механічної частини використовується рівняння рівноваги в теорії пружності. Воно описує механічну поведінку матеріалу під впливом термічних та електричних навантажень.

Рівняння рівноваги у тензорній формі (механічна частина):

$$\nabla \sigma + \mathbf{F} = 0, \quad (8)$$

де  $\sigma$  – тензор напружень (напруження в матеріалі);

$\mathbf{F}$  – вектор масових сил;

$\nabla\sigma$  – дивергенція тензора напружень, що описує зміну напруженого стану в об'ємі тіла.

У термоелектричному аналізі враховуються термічні напруження, які виникають через градієнти температури. Для ізотропного матеріалу зв'язок напружень із деформаціями та температурою виражається законом Гука як скалярний добуток тензорів з урахуванням термічного розширення:

$$\sigma = C_{\text{пм}} : (\varepsilon_{\text{д}} - \varepsilon_{\text{т}}), \quad (9)$$

де  $C_{\text{пм}}$  – тензор пружних модулів;

$\varepsilon_{\text{д}}$  – тензор деформацій;

$\varepsilon_{\text{т}}$  – термічна деформація.

Термічна деформація в (9) визначається з виразу:

$$\varepsilon_{\text{т}} = \alpha_{\text{т}} \Delta T, \quad (10)$$

де  $\alpha_{\text{т}}$  – коефіцієнт теплового розширення;

$\Delta T$  – зміна температури.

Таким чином, при спільному аналізі електрики, тепла та механіки розв'язується підсумкова система рівнянь, яка включає рівняння нерозривності електричного заряду, рівняння теплопровідності (7) та рівняння механічної рівноваги (8):

$$\begin{cases} \nabla \left( [\varepsilon] \nabla \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + \nabla ([\sigma] [\alpha] \nabla T) + \nabla ([\sigma] \nabla \phi) = 0; \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla ([\Pi] J) - \nabla ([\lambda] \nabla T) = \dot{q}; \\ \nabla (C_{\text{пм}} : (\varepsilon_{\text{д}} - \varepsilon_{\text{м}})) + F = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Конструювання термоелектричного модуля було пов'язане з розробкою конкретних технічних рішень, включаючи їх реалізацію у вигляді створення креслень деталей термоелектричного модуля, вибір електротехнічних матеріалів для цих деталей, проробку їх з'єднань і врахування електричних, теплових і механічних параметрів.

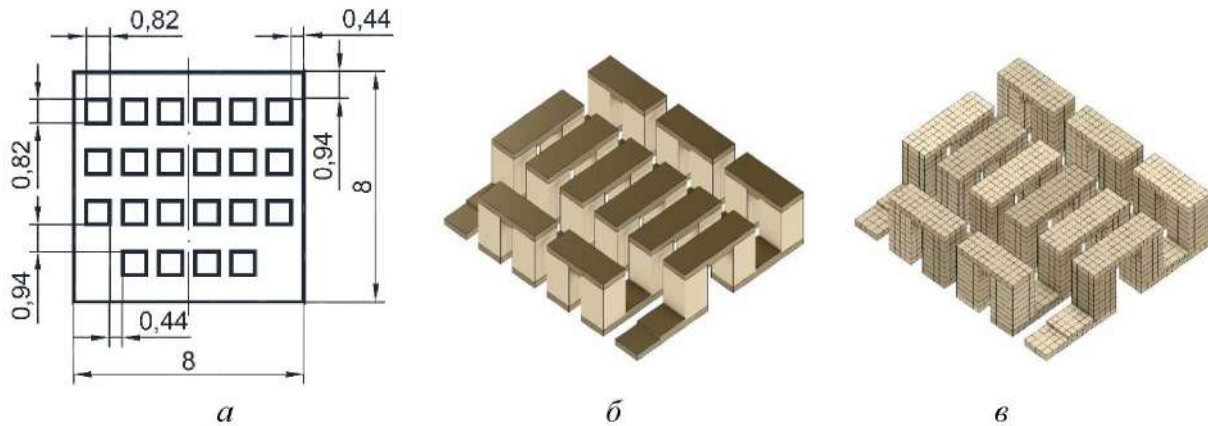


Рисунок 1 – Схема плану розташування  $P$ - та  $N$ -напівпровідників по площі сконструйованого термоелектричного модуля (а), геометрична (б) та кінцево-елементна (в) модель сконструйованого термоелектричного модуля

На схемі плану розташування 22-х напівпровідників  $0,82 \times 0,82$  мм (рис. 1, а) проілюстровано вертикальну симетрію їх розміщення в 4 рядки та 6 стовпців в ізоляційному корпусі термоелектричного модуля з габаритами  $8 \times 8$  мм, що відносить його до категорії малих (мініатюрних) модулів. Вони можуть використовуватися для дуже компактних пристроїв, де пріоритетом є невеликі габарити та мала маса. Розміри  $0,82 \times 0,82$  мм кожного напівпровідника підбрано таким чином, щоб при їх висоті 1,5 мм об'єм кожного з них складав  $1 \text{ мм}^3$ . Відстань від краю ізоляційного корпусу до напівпровідника з обох сторін по горизонталі становить 0,44 мм, а по вертикалі – 0,94 мм. Всі відстані між самими напівпровідниками, також, по горизонталі становлять 0,44 мм, а по вертикалі – 0,94 мм. Сконструйований термоелектричний модуль містить 11 напівпровідників  $P$ - та 11 напівпровідників  $N$ -типу і 23 металеві

контактні комутаційні пластини, що дозволило створити ланцюг з 21-єї напівпровідникової термоелектричної пари. Габаритні розміри  $\Pi$ -подібного ланцюга сконструйованого термоелектричного модуля становлять  $6,11 \times 7,12 \times 1,9$  мм. Структуру з'єднання термоелектричних елементів модуля у формі класичного  $\Pi$ -подібного ланцюга обрано через зручність розташування елементів (рівномірне тепло- і електропровідне з'єднання), ефективне охолодження (забезпечує правильний теплообмін між пластинами), мінімальні втрати енергії (оптимальний шлях для електричного струму). При конструюванні та виборі габаритних розмірів, а також кількості напівпровідників для сконструйованого термоелектричного модуля за основу було взято термоелектричний модуль TEC1-01102.

Геометричну та кінцево-елементну моделі термоелектричного модуля (рис. 1, б-в) показано без зовнішнього ізоляційного корпусу і захисного компаунду. Товщина ізоляційного корпусу залежить від товщини керамічних пластин з оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ). Теплопровідні матеріали, такі як термопаста з оксидом алюмінію або силіконове мастило, зазвичай наносять на зовнішні поверхні модуля (між корпусом модуля і радіатором), але не всередині. Всередині ізоляційного корпусу немає повітря або вакууму, оскільки вільний простір, як правило, заповнено діелектричним і вологостійким компаундом, наприклад, кремнійорганічним силіконом, епоксидною смолою або склокерамікою. Компаунд не тільки захищає модуль від механічних пошкоджень, а й забезпечує електричну ізоляцію. Наявність повітря або вакууму всередині ізоляційного корпусу модуля є небажаною, оскільки це може призвести до погіршення теплопередачі та пошкодження модуля під час експлуатації.

Креслення та геометричну модель поздовжньої (а, б) та поперечної (в, г) напівпровідникової  $P$ - $N$ -термопари термоелектричного модуля суднового електрообладнання наведено на рис. 2. Кожен термоелектричний елемент представляє собою напівпровідникову  $P$ - $N$ -термопару з геометрично ідентичними формами напівпровідників-паралелепіпедів  $0,82 \times 0,82 \times 1,5$  мм. Поздовжні та поперечні контактні комутаційні пластини мають однакову товщину 0,2 мм і ширину 0,82 мм, проте мають різну довжину відповідно 2,58 мм і 2,08 мм. Кожна поздовжня та поперечна контактна пластина посередині містить спеціальний виступ висотою 0,1 мм і площею відповідно  $0,94 \times 0,82$  мм та  $0,44 \times 0,82$  мм. Ці виступи допомагають краще з'єднувати  $P$ - і  $N$ -напівпровідники, забезпечуючи надійний контакт і рівномірний розподіл електричного струму. В якості матеріалу напівпровідників використано телурид вісмуту ( $Bi_2Te_3$ ), а для металевих контактних комутаційних пластин – мідь (Cu).  $P$ - і  $N$ -тип таких напівпровідників можна отримати легуванням, в якості домішок, наприклад, можна використати відповідно сурму (Sb) і селен (Se).

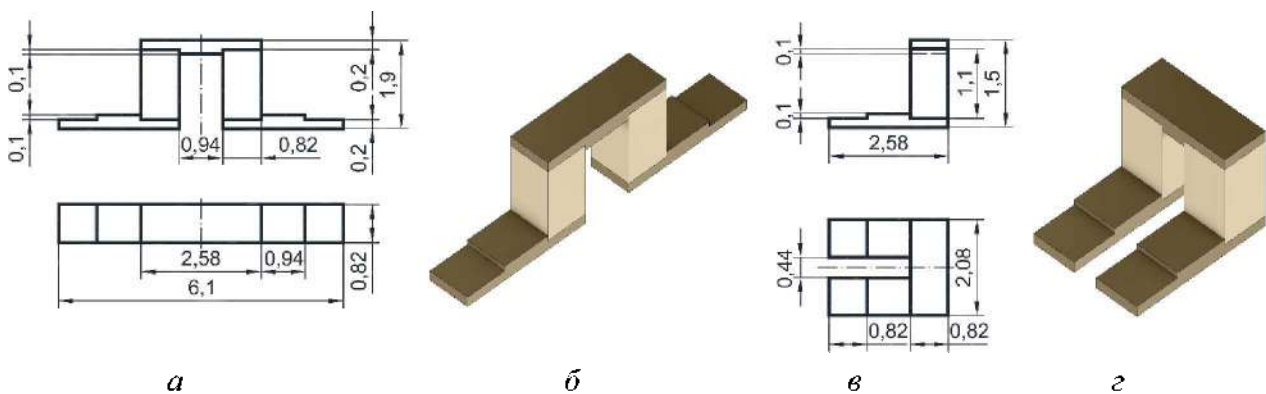


Рисунок 2 – Креслення та геометрична модель поздовжньої (а, б) та поперечної (в, г) напівпровідникової  $P$ - $N$ -термопари сконструйованого термоелектричного модуля

Розрахунок сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання проводився з використанням чисельного методу скінченних елементів [26-28]. Він проводився при наступних вихідних параметрах та обраних граничних умовах: для крайньої торцевої поверхні на останній в термоелектричному ланцюзі контактній комутаційній пластині було задано електропотенціал  $\phi_0=0$  В; температура холодних пластин  $t_0=0$  °С; для першої і останньої контактної комутаційної пластини в термоелектричному ланцюзі крайні торцеві поверхні вважались нерухомими; матеріали всіх деталей термоелектричного модуля вважались ізотропними. Теплообмін з оточуючим середовищем

досліджено як за рахунок природної (вільної), так і примусової (вимушеної) конвекції з поверхонь гарячих контактних комутаційних пластин термоелектричного модуля, що забезпечувалось вибором необхідного коефіцієнта тепловіддачі відповідно  $h=15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) і  $h=50, 100, 200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Термоелектричні коефіцієнти Зеебека:  $\alpha_P=200$  мкВ/К,  $\alpha_N=-200$  мкВ/К; питомі електричні опори:  $\rho_P=1,0 \cdot 10^{-5}$  Ом·м,  $\rho_N=0,9 \cdot 10^{-5}$  Ом·м,  $\rho_{Cu}=1,68 \cdot 10^{-8}$  Ом·м; теплопровідності:  $k_P=k_N=1,5$  Вт/(м·К),  $k_{Cu}=401$  Вт/(м·К); модулі Юнга  $E_P=E_N=5,2 \cdot 10^{10}$  Па,  $E_{Cu}=1,1 \cdot 10^{11}$  Па; коефіцієнти Пуассона  $\nu_P=\nu_N=0,28$ ,  $\nu_{Cu}=0,34$ ; коефіцієнти теплового розширення:  $\alpha_{PT}=1,4 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>;  $\alpha_{NT}=1,3 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>,  $\alpha_{CuT}=1,65 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>; температура оточуючого середовища  $t_{oc}=20$  °С. При стандартному підключенні (червоний «+», чорний «-») струм першим входить в P-напівпровідник термоелектричного модуля.

Розподіл робочих параметрів по сконструйованому термоелектричному модулю суднового електрообладнання при силі струму  $I=0,5$  А для випадку примусової конвекції з гарячих пластин модуля при коефіцієнті тепловіддачі  $h=50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) зображено на рис. 3. Затемненим зонам чорного кольору відповідали найбільші (максимальні) в діапазоні значення електричних, теплових і механічних величин, сірим та світлим зонам відповідно сірого та білого кольору відповідали середні і найменші (мінімальні) в діапазоні значення. Аналіз розподілу робочих параметрів вказує на те, що термоелектричний модуль суднового електрообладнання працює у складних експлуатаційних умовах оскільки одночасно піддається впливу термічних, механічних та електромагнітних навантажень.

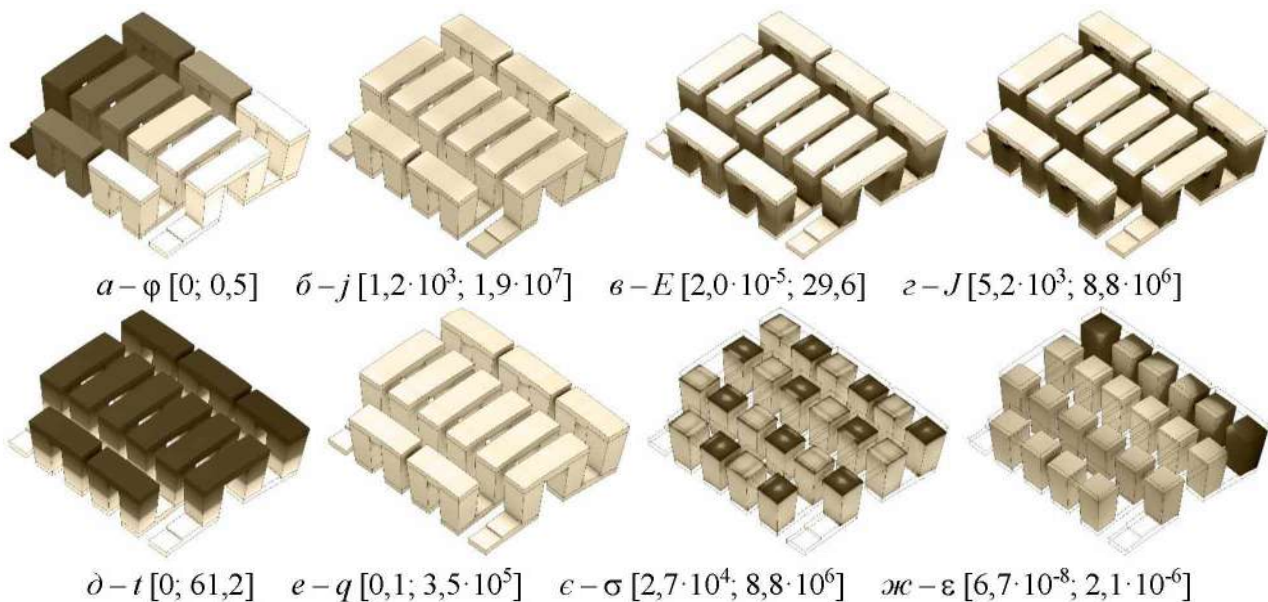


Рисунок 3 – Розподіл електричного потенціалу,  $\phi$  [В] (а) густини струму  $j$  [А/м<sup>2</sup>] (б), напруженості електричного поля  $E$  [В/м] (в), омичного нагріву  $J$  [Вт/м<sup>3</sup>] (г), стаціонарного теплового поля  $t$  [°С] (д), густини теплового потоку  $q$  [Вт/м<sup>2</sup>] (е) по термоелектричному модулю, а також розподіл еквівалентного стресу  $\sigma$  [Па] (є) та деформацій  $\epsilon$  [м] (ж) в напівпровідниках термоелектричного модуля при робочому струмі 0,5 А та коефіцієнті тепловіддачі  $h=50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Результати розрахунку у вигляді сімейства кривих для функцій  $U(I), E(I), j(I), t(I), q(I), J(I), \sigma(I), \epsilon(I)$  в діапазоні струму 0-1 А представлено на рис. 4-5. Для природної конвекції коефіцієнт тепловіддачі приймався рівним  $h=15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а для трьох випадків примусової конвекції  $h=50, 100, 200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), що можна забезпечити зміною способу охолодження модуля за рахунок використання радіатора і вентилятора або рідинного охолодження.

Вибір конкретних значень коефіцієнта тепловіддачі при розрахунку залежить від режиму конвекції (природна або примусова), властивостей оточуючого середовища (повітря, рідина) і характеристик потоку. Для ефективної роботи термоелектричного модуля суднового електрообладнання необхідно забезпечити добре тепловідведення з гарячої сторони, наприклад, за допомогою радіаторів і примусового обдуву. Використання радіаторів, вентиляторів або рідинного охолодження допомагає

підтримувати оптимальний перепад температур і покращує продуктивність модуля. Орієнтовний діапазон значень коефіцієнта тепловіддачі  $h$ : в режимі природної конвекції для звичайних умов в повітрі  $h=5-25$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), при цьому без активного охолодження ефективність нижча; в режимі примусової конвекції при використанні вентилятора та радіатора  $h=20-200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), разом з цим конкретне значення залежить від швидкості повітряного потоку і конструкції радіатора, оскільки радіатори з більшими площами поверхонь і добрим повітряним потоком забезпечують більш високий коефіцієнт; в режимі примусової конвекції при використанні рідинного охолодження  $h=100-10000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), одночасно коефіцієнт залежить від швидкості потоку рідини, типу течії рідини (ламінарний, перехідний, турбулентний) та її теплопровідності, водяне охолодження зазвичай має  $h=500-5000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), охолодження з фазовим переходом, наприклад, двофазні системи, може досягати  $h=10000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а інколи і більше. Таким чином, для сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання режим примусової конвекції з рідинним охолодженням буде найбільш ефективним, але й більш складним в реалізації. Режим примусової конвекції з використанням радіатора та вентилятора може бути оптимальним компромісом між ефективністю і простотою.

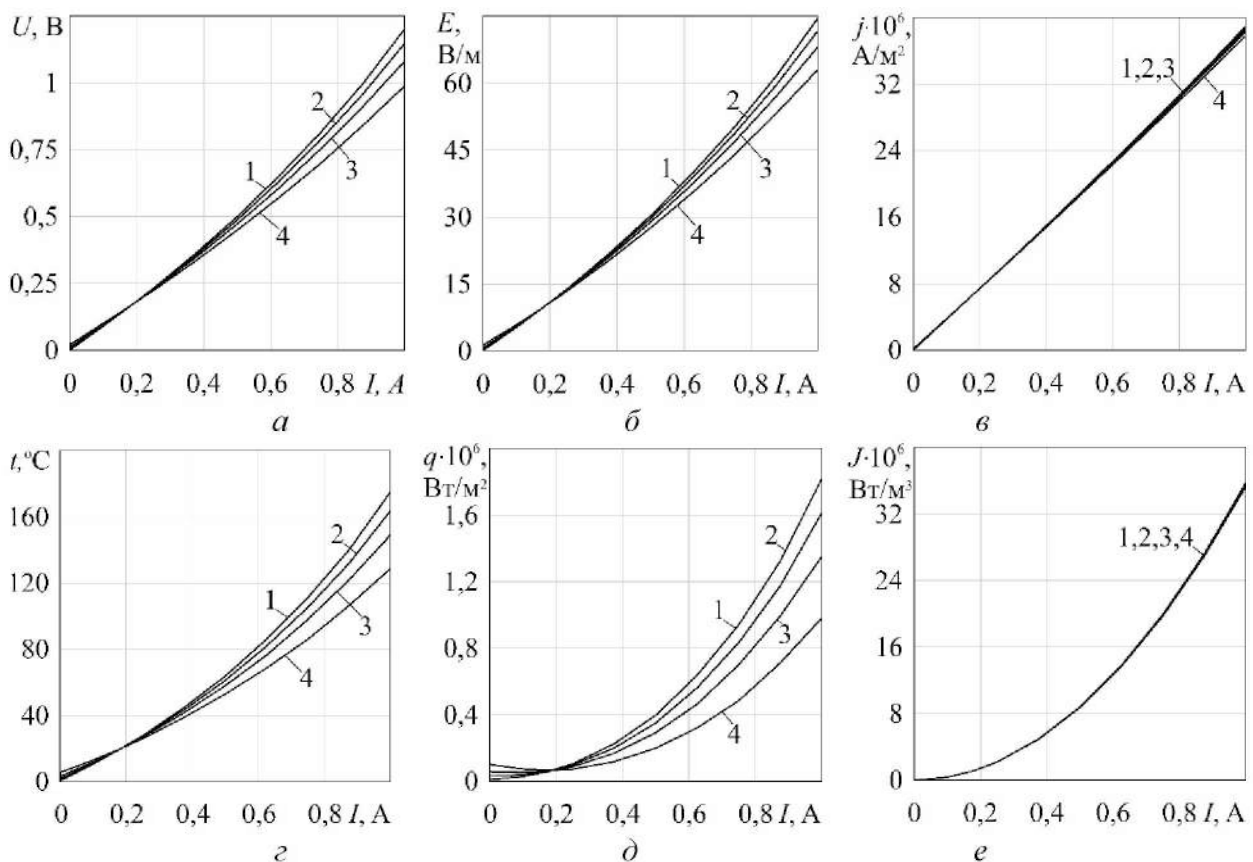


Рисунок 4 – Графіки функцій  $U(I)$ ,  $E(I)$ ,  $j(I)$ ,  $t(I)$ ,  $q(I)$ ,  $J(I)$  по напрузі  $U$  (а), напруженості електричного поля  $E$  (б), густині струму  $j$  (в), температурі на гарячій стороні  $t$  (г), густині теплового потоку  $q$  (д) та омічному нагріву  $J$  (е) в термоелектричному модулі в залежності від сили робочого струму  $I$  через модуль при різних коефіцієнтах тепловіддачі  $h$ :

1 –  $h=15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 2 –  $h=50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 3 –  $h=100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 4 –  $h=200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Результати температурного розрахунку наведено на рис. 4, г у вигляді сімейства температурних кривих  $t(I)$  при різних коефіцієнтах тепловіддачі  $h$ . Температура  $t$  в термоелектричному модулі суднового електрообладнання при збільшенні сили струму  $I$  зростає. Моделювання проводилось при коефіцієнті тепловіддачі з  $h=15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (природна конвекція) та коефіцієнтах  $h=50, 100, 200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (примусова конвекція). При збільшених коефіцієнтах тепловіддачі при зростанні сили струму від 0,2 А до 1 А вплив примусової конвекції посилюється. В області малих струмів термоелектричні модулі не завжди працюють ефективно з різних причин, інколи більша частина підведеної електрики може

перетворюватися на омичний нагрів через зміни у тепловому балансі і подальший перерозподіл теплових потоків.

Отримані характеристики для температури  $t$  показують, що при роботі модуля в умовах природної конвекції (крива 1 на рис. 4, з) тепловідведення є менш ефективним через утворення термічного бар'єру. Примусова конвекція (криві 2-4 на рис. 4, з) сприяє зменшенню цього опору, охолодження гарячої сторони модуля, наприклад, з використанням радіатора та вентилятора або рідинного охолодження, збільшує температурний градієнт і покращує продуктивність модуля.

Еквівалентний стрес та деформації щодо термоелектричного модуля суднового електрообладнання надають можливість оцінити його механічний стан під впливом температури, електричного струму за зовнішніх сил. Оцінка еквівалентного напруження за Мізесом надає можливість встановити момент, коли електротехнічний матеріал [29-31] досягне межі текучості та може розпочатися пластична деформація або можуть виникати тріщини чи руйнування. Якщо еквівалентний стрес  $\sigma_{\text{екв}}$  перевищить межу текучості, то матеріал термоелектричного модуля може пластично деформуватися, що призведе до його пошкодження або втрати ефективності роботи. Саме тому використання моделювання для нових сконструйованих термоелектричних модулів допомагає оптимізувати їх геометрію та матеріали, щоб зменшити напруження та продовжити термін служби суднового обладнання в цілому.

Напруження (рис. 5, а) в термоелектричних модулях суднового електрообладнання спричинені термічними напруженнями, що викликані різницею температур між гарячою і холодною сторонами, механічними напруженнями, що пов'язані з кріпленням модуля або механічними навантаженнями, залишковими напруженнями, що можуть з'явитись через неоднорідне охолодження під час виготовлення або спаювання контактів, структурними змінами в електротехнічному матеріалі через напруги від електроміграції при достатньо тривалому проходженні струму з відносно високим значенням сили струму через модуль.

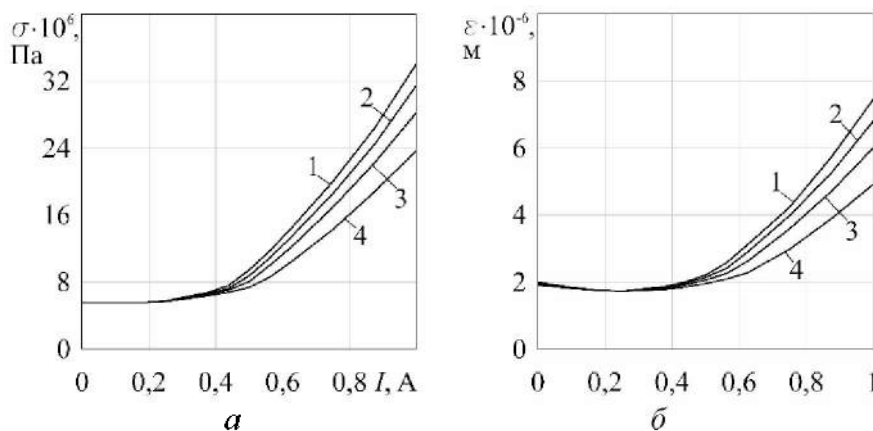


Рисунок 5 – Графіки функцій  $\sigma(I)$ ,  $\epsilon(I)$  по еквівалентному стресу  $\sigma$  (а) та деформаціям  $\epsilon$  (б) в напівпровідниках модуля в залежності від сили робочого струму  $I$  при різних коефіцієнтах тепловіддачі  $h$ : 1 –  $h=15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 2 –  $h=50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 3 –  $h=100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 4 –  $h=200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Деформації (рис. 5, б) вказують на зміщення точок у термоелектричному модулі через термічне розширення/стиснення матеріалів, механічні навантаження (затискання, вагу і т.д.), відмінність у коефіцієнтах теплового розширення між шарами модуля. При аналізі деформацій в термоелектричних модулях суднового електрообладнання слід звертати увагу на відхилення геометрії задля уникнення втрати контактів або пошкоджень, на нерівномірність розширення, яка може призвести до відшарування паяних з'єднань.

Таким чином, еквівалентний стрес показує, чи є ризик механічного руйнування через температурні градієнти та навантаження, а деформації допомагають оцінити, чи призведе теплове розширення/стиснення до втрати контактів або механічного пошкодження. Отже, обидва параметри є

важливими при оцінці довговічності та ефективності роботи термоелектричних модулів суднового електрообладнання.

Границя текучості напівпровідникових матеріалів і металевих контактних пластин у термоелектричних модулях суднового електрообладнання суттєво різняться через їхню природу та механічні властивості [32]. У термоелектричних модулях часто застосовують наступні напівпровідникові матеріали: телурид вісмуту ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), сплави сурми і телуру ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ), сплави вісмуту і селену ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ) і т.д. Ці напівпровідникові матеріали мають відносно низьку механічну міцність і крихкість. Для подібних напівпровідникових сполук границя текучості є низькою та становить менше 50 МПа, залежно від складу і експлуатаційних умов по температурі.

Металеві контактні пластини, що з'єднують напівпровідники, як правило, виготовляють з міді (Cu), нікельованих або посріблених мідних сплавів, алюмінію (Al). Метали мають високу пластичність і значно вищу границю текучості. Границя текучості для чистої міді без домішок становить від 33 до 55 МПа, проте вказані значення діапазону можуть бути іншими в залежності від способу обробки та легування. В термоелектричних модулях суднового електрообладнання в якості металевих контактних пластин часто застосовують мідь, що може мати границю текучості від 70-100 МПа (відпалена) до 210 МПа (холоднокатана). В даний час існують мідні сплави, в яких завдяки спеціальним легуючим компонентам та термічній обробці границя текучості може становити понад 400 МПа. Також, в якості металевих контактних пластин в модулях використовують алюміній з границею текучості від 10-40 МПа (відпалений) до 200 МПа (загартований сплав). Нікельовані покриття металевих контактних пластин термоелектричного модуля суднового електрообладнання можуть мати підвищену механічну стійкість.

Порівнюючи напівпровідникові елементи та металеві контактні пластини термоелектричного модуля варто зазначити наступне. Напівпровідники легко тріскаються і деформуються під механічним навантаженням, особливо під час термічних циклів. Це відноситься і до перехідних шарів, які використовуються для покращення адгезії між напівпровідниками і металевими контактами, а також до бар'єрних шарів, що представляють собою напівпровідникові покриття або вставки для запобігання дифузії металів у напівпровідниковий матеріал, продовжуючи термін експлуатації модуля. Металеві контактні пластини, що виконують роль для розподілу електричного струму та механічної підтримки, значно міцніші. Таким чином, металеві контактні пластини мають у рази, а інколи й на порядок, вищу границю текучості за напівпровідники, що слід враховувати щодо довговічності та надійності термоелектричних пристроїв суднового електрообладнання.

**Висновок.** В роботі проведено аналіз впливу природної і примусової конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання. На основі аналізу отриманих робочих характеристик в діапазоні струмів 0-1 А при різних режимах конвекції встановлено, що для термоелектричного модуля режим примусової конвекції з коефіцієнтом тепловіддачі  $h=200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  виявився максимально ефективним. Отже, для створеного термоелектричного модуля суднового електрообладнання найбільш дієвим варіантом є примусова конвекція способом рідинного охолодження, хоча його реалізація є доволі складною. Альтернативним рішенням, яке забезпечує баланс між ефективністю та простотою, може бути примусова конвекція способом вентиляторного охолодження із застосуванням радіатора та вентилятора.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Лобунець Ю.М. Оцінка характеристик ОТЕС з термоелектричними перетворювачами енергії. Термоелектрика. №1. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2013., С. 62-67.
2. Анатичук Л.І. Термоелектрика: монографія. Термоелектричні перетворювачі енергії: термоелементи. Елементна база термоелектрики. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. Т. 2. 376 с.

3. Анатичук Л.І., Семенюк В.О. Оптиміальне керування властивостями термоелектричних матеріалів і приладів. Черновці: ПРУТ, 1992. 264 с.
4. Анатичук Л.І. Термоелементи і термоелектричні пристрої: довідник. Київ: Наук. думка, 1979. 768 с.
5. Goldsmid H. Julian. Introduction to Thermoelectricity. Second Edition / H. Julian Goldsmid. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
6. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph / Hladyshev D., Hnat H. etc. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2023. 464 p. Available at: DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1
7. Armenakis Y., Chatzis S. Waste heat recovery and electrical power production on vessels by means of TEG arrays attached on the hull below the underwater line. 2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Washington, DC, USA, 2019, pp. 430-437. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESTS.2019.8847849>
8. Zogogianni C.G., Zarkadis N.A., Tatakis E.C. Energy savings in marine applications using thermoelectric modules and high step-up DC/DC converter. 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), Glasgow, UK, 2016, pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0303>
9. Joseph R., Jet T.K., Qingyu Alex Yan, Lee Meng Yeong. Design of stand-alone thermoelectric power generation system for marine engine exhaust system. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, 2016, pp. 4078-4084. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793238>
10. Jovanovic V., Ghamaty S., Elsner N. B. Design, Fabrication and testing of quantum well thermoelectric generator. Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems, 2006. ITherm 2006., San Diego, CA, USA, 2006. pp. 1417-1423. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2006.1645511>
11. Lau P. G. Convection correction factor determination for use with the transient test method for thermoelectric modules. Eighteenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings, ICT'99 (Cat. No.99TH8407), Baltimore, MD, USA, 1999. pp. 252-255. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICT.1999.843381>
12. Anatyshuk L.I., Balazyuk V.N., Luste O.J., Malysheko V.V. Studying stresses in thermoelectric cooling modules for increasing their cyclic stability. Proceedings ICT'03. 22nd International Conference on Thermoelectrics (IEEE Cat. No.03TH8726), La Grande Motte, France, 2003, pp. 619-622. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICT.2003.1287589>
13. Al-Madhhachi H., Prest M., Min G. Evaluation of the convection heat transfer coefficient in a thermoelectric distillation system. 2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE), Newcastle Upon Tyne, UK, 2016. pp. 213-217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSAE.2016.7810190>
14. Ionescu V., Neagu A.A. Investigation of the Energy Conversion Efficiency for a Thermoelectric Generator System with Forced Convection Cooling. 2023 17th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, Romania, 2023. pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/10.1109/EMES58375.2023.10171737>
15. Sochard I.I. Free convection heat transfer thermoelectric refrigerators. IEEE Transactions on Electron Devices. vol. 10. no. 2. pp. 103-104, March 1963, DOI: <https://doi.org/10.1109/T-ED.1963.15124>
16. Akhsham M., Dousti M.J., Safari S. Neural Network-Based Control of Forced-Convection and Thermoelectric Coolers. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. vol. 44, no. 2, pp. 582-591. Feb. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCAD.2024.3438689>
17. Iyengar M., Bar-Cohen A. Least-energy optimization of forced convection plate-fin heat sinks. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. vol. 26, no. 1. pp. 62-70. March 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2003.811484>
18. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Костюченко В.І., Пріступа С.В., Пастух О.В., Голубева С.М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ. // Водний транспорт, 2021. № 3 (34). С. 13-21.
19. Кириченко О.С. Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, 2023. Т. 34 (73). № 1. С. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>

20. Кириченко О.С., Білюк І.С., Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М., Гаврилов С.О., Бугрім Л.І. Чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, 2018. Т. 29 (68). Ч. 1. № 6. С. 58-63.
21. Кириченко О.С. Критерії формування готовності до професійної діяльності інженерів на основі 3D-моделювання. // Освітологічний дискурс: наукове електронне видання. Київ. 2017. № 3-4 (18-19). С. 296-308.
22. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Пріступа С.В., Голубева С.М., Пастух О.В. Термоелектричні модулі з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики. // Водний транспорт, 2023. Вип. 1 (37). С. 201-213. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>
23. Кириченко О.С. Термоелектричні модулі з різними способами контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2023. № 1 (277). С. 31-37. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37>
24. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Пріступа С.В., Голубева С.М. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2024. Вип. 1 (39). С. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
24. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Пріступа С.В., Голубева С.М. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2024. Вип. 1 (39). С. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
25. Kyrychenko O., Golubieva S., Morneva M. Modeling of Thermoelectric Modules with Thermal Stress Damping for Transport Electrical Equipment. // 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES, IEEE Scopus), Kremenchuk, Ukraine, 2023, P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>
26. Вислоух С.П., Волошко О.В., Тимчик Г.С., Філіпова М.В. Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2021. 228 с.
27. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів. К.: НТУУ «КПІ», 2015. 391 с.
28. Костюшко І.А., Любашенко Н.Д., Третиник В.В. Методи обчислень. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2021. 243 с.
29. Прокопів В.В., Прокопів В.В. Напівпровідникові матеріали функціональної електроніки. Івано-Франківськ: вид-во «Плай» ЦІТ Прикарпатського національного університету ім. Василя Стеваника, 2009. 216 с.
30. Леонт'єв В.О., Бевз С.В., Видмиш В.А. Електротехнічні матеріали: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2013. 122 с.
31. Paolo Mele. Recent Advances in Thermoelectric Materials for High Efficiency Energy Conversion and Refrigeration. MDPI Basel, 2022. 100 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-3504-3>
32. Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications Edited by Saim Memon. London: IntechOpen, 2019. 142 p. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.89640>

## REFERENCES

1. Lobunets, Y.M. (2013). Otsinka kharakterystyk OTES z termoelektrychnymy peretvoriuvachamy enerhii. *Termoelektryka. №1*. Chernivtsi: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 62-67. [in Ukrainian].
2. Anatyshchuk, L.I. (2003). Termoelektrichestvo. Termoelektricheskie preobrazovateli energii: termoelementi. Elementnaya baza termoelektrichestva. [Thermoelectricity. Thermoelectric energy converters: thermoelements. Elemental base of thermoelectricity.]. Chernovtsi: Institut termoelektrichestva [in Ukrainian].
3. Anatyshchuk, L.I., & Semenyuk, V.A. (1992). Optimalnoe upravlenie svoistvami termoelektricheskikh materialov i priborov [Optimal control of the properties of thermoelectric materials and devices]. Chernivtsi: PRUT [in Ukrainian].
4. Anatyshchuk, L.I. (1979). Termoelementi i termoelektricheskie ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kyiv: Nauk. dumka [in Ukrainian].
5. Goldsmid, H. Julian. (2016). Introduction to Thermoelectricity. Second Edition Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-49256-7
6. Hladyshev D., Hnat H. etc. (2023). Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch. DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1
7. Armenakis Y., Chatzis S. (2019). Waste heat recovery and electrical power production on vessels by means of TEG arrays attached on the hull below the underwater line. *2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, Washington, DC, USA, pp. 430-437. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESTS.2019.8847849>
8. Zogogianni C.G., Zarkadis N.A., Tatakis E.C. (2016). Energy savings in marine applications using thermoelectric modules and high step-up DC/DC converter. *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, Glasgow, UK, pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0303>
9. Joseph R., Jet T.K., Qingyu Alex Yan, Lee Meng Yeong. (2016). Design of stand-alone thermoelectric power generation system for marine engine exhaust system. *IECON 2016 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, pp. 4078-4084. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793238>
10. Jovanovic V., Ghamaty S., Elsner N. B. Design. (2006). Fabrication and testing of quantum well thermoelectric generator. *Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems. IITHERM 2006*, San Diego, CA, USA, pp. 1417-1423. DOI: <https://doi.org/10.1109/IITHERM.2006.1645511>
11. Lau P. G. (1999). Convection correction factor determination for use with the transient test method for thermoelectric modules. *Eighteenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings, ICT'99 (Cat. No.99TH8407)*, Baltimore, MD, USA, pp. 252-255. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICT.1999.843381>
12. Anatyshchuk L.I., Balazyuk V.N., Luste O.J., Malyshko V.V. (2003). Studying stresses in thermoelectric cooling modules for increasing their cyclic stability. *Proceedings ICT'03. 22nd International Conference on Thermoelectrics (IEEE Cat. No.03TH8726)*, La Grande Motte, France, pp. 619-622. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICT.2003.1287589>
13. Al-Madhhachi H., Prest M., Min G. (2016). Evaluation of the convection heat transfer coefficient in a thermoelectric distillation system. *2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE)*, Newcastle Upon Tyne, UK, pp. 213-217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSAE.2016.7810190>
14. Ionescu V., Neagu A.A. (2023). Investigation of the Energy Conversion Efficiency for a Thermoelectric Generator System with Forced Convection Cooling. *2023 17th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, Oradea, Romania, pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/10.1109/EMES58375.2023.10171737>
15. Sochard I.I. (1963). Free convection heat transfer thermoelectric refrigerators. *IEEE Transactions on Electron Devices. vol. 10. no. 2.* pp. 103-104. DOI: <https://doi.org/10.1109/T-ED.1963.15124>
16. Akhsham M., Dousti M.J., Safari S. (2025). Neural Network-Based Control of Forced-Convection and Thermoelectric Coolers. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. vol. 44, no. 2,* pp. 582-591. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCAD.2024.3438689>

17. Iyengar M., Bar-Cohen A. (2003). Least-energy optimization of forced convection plate-fin heat sinks. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. vol. 26, no. 1. pp. 62-70. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2003.811484>
18. Taranenko, S.V., Kyrychenko, O.S., Kolesnik, V.V., Kostyuchenko, V.I., Pristupa, S.V., Pastukh, O.V., & Golubieva S.M. (2021). Modelyuvannya statsionarnogo teplovogo polya strumoprovodnykh shin sudnovykh GRShch [Modeling of the stationary thermal field of jet-conducting tires of ship main switchboards]. *Vodnyi transport – Water transport*. (Vols. 3(34)), (pp. 13-21) [in Ukrainian].
19. Kyrychenko, O.S. (2023). Porivnyalnyi analiz kharakteristik termoelektrichnykh moduliv z rizmnyimi geometrichnyimi formami napivprovodnykiv dlya yelektrorobladnannya transportu [An up-to-date analysis of the characteristics of thermoelectric modules with different geometric shapes of conductors for electrical transport]. *Vcheni zapiski Tavriiskoho natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadskogo – These are notes from the Tavria National University named after V.I. Vernadsky*. (Vols. 34(73)), (pp. 256-263). DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39> [in Ukrainian].
20. Kyrychenko, O.S., Bilyuk, I.S., Shareiko, D.Yu., Fomenko, A.M., Gavrilov, S.O., & Bugrim, L.I. (2018). Chiselne trimirne modelyuvannya termoelektrichnogo okholodzhuvacha vimiryuvalnogo yelektroustatkuvannya avtomatichnykh sistem [Numerical trimmer modeling of thermoelectric cooler and electrical installation of automatic systems]. *Vcheni zapiski Tavriiskoho natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadskogo – These are notes from the Tavria National University named after V.I. Vernadsky*. (Vols. 29(68)), (pp. 58-63) [in Ukrainian].
21. Kyrychenko, O.S. (2017). Kriterii formuvannya gotovnosti do profesiinoi diyalnosti inzheneriv na osnovi 3D-modelyuvannya [Criteria for determining readiness for professional activity of engineers based on 3D modeling]. *Osvitologichnii diskurs – Ostological discourse*. (Vols. 3-4(18-19)), (pp. 296-308) [in Ukrainian].
22. Taranenko, S.V., Kyrychenko, O.S., Pristupa, S.V., Golubieva, S.M., & Pastukh, O.V. (2023). Termoelektrichni moduli z kompensovanymi komutatsiinymi plastinami dlya pristroiv sudnovoi yenergetiki [Thermoelectric modules with compensated switching plates for ship power systems]. *Vodnyi transport – Water transport*. (Vols. 1(37)), (pp. 201-213). DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23> [in Ukrainian].
23. Kyrychenko, O.S. (2023). Termoelektrichni moduli z rizmnyimi sposobami kontaktnogo z'ednannya napivprovodnykovykh termoelementiv [Thermoelectric modules with various methods of contact connection of conductor thermoelements]. *Visnik Skhidnoukraiïnskoho natsionalnogo universytetu imeni Volodymyra Dalya – Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dal*. (Vols. 1(277)), (pp. 31-37). DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37> [in Ukrainian].
24. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Приступа С.В., Голубева С.М. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2024. Вип. 1 (39). С. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
25. Kyrychenko, O., Golubieva, S., & Morneva, M. (2023). Modeling of Thermoelectric Modules with Thermal Stress Damping for Transport Electrical Equipment. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES, IEEE, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432> [in Ukrainian].
26. Visloukh, S.P., Voloshko, O.V., Timchik, G.S., & Filipova, M.V. (2021). Komp'yuterne modelyuvannya protsesiv ta sistem. Chiselni metodi [Computer modeling of processes and systems. Numerical Methods]. Kyiv: KPI im. Igorya Sikorskoho, Politekhnik [in Ukrainian].
27. Karvatskyi A.I. (2015). Metod skinchennykh elementiv u zadachakh mekhaniky sutsilnykh seredovykh. Prohramna realizatsiia ta vizualizatsiia rezultativ. K.: NTUU «KPI». [in Ukrainian].
28. Kostyushko, I.A., Lyubashenko, N.D., & Tretinik, V.V. (2021). Metodi obchislen [Calculation methods]. Kyiv: KPI im. Igorya Sikorskoho, Politekhnik [in Ukrainian].
29. Prokopiv V.V., Prokopiv V.V. (2009). Napivprovodnykovi materialy funktsionalnoi elektroniky. Ivano-Frankivsk: vyd-vo «Plai» TsIT Prykarpatskoho natsionalnogo universytetu im. Vasyliia Stevanyka. [in Ukrainian].

30. Leontiev, V.O., Bevz, S.V., & Vidmish, V.A. (2013). *Yeletrotekhnichni materiali* [Electrical materials]. Vinnitsa: VNTU [in Ukrainian].
31. Paolo Mele. (2022). *Recent Advances in Thermoelectric Materials for High Efficiency Energy Conversion and Refrigeration*. MDPI Basel, DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-3504-3>
32. Memon Saim. (2019). *Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications* Edited by. London: IntechOpen. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.89640>

**Kyrychenko O.S.**

### **INFLUENCE OF CONVECTION MODE AND METHOD ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE DESIGNED THERMOELECTRIC MODULE FOR SHIP ELECTRICAL EQUIPMENT**

*The paper analyzes the influence of the natural and forced convection modes on the performance characteristics of the designed thermoelectric module for ship electrical equipment. The peculiarities of the operation of thermoelectric devices in sea and river navigation are noted, in particular, the influence of increased humidity, corrosive activity of salt water, vibrations and variable temperature loads. The peculiarities of natural and forced convection are considered, as well as their influence on the efficiency of heat removal. The need to use forced convection for effective cooling of the thermoelectric module is especially emphasized. It is determined that natural convection is often insufficient for heat dissipation, especially under conditions of increased thermal loads in the ship environment. Methods for increasing the heat transfer coefficient during forced convection are analyzed, in particular, the use of air cooling using a fan and radiator, as well as liquid cooling. The optimal thermal conditions are determined to ensure stable operation of the thermoelectric module in ship conditions. The thermoelectric module with an area of  $8 \times 8$  mm was designed, which refers it to the category of small modules. The overall dimensions of the U-shaped circuit of the module are  $6.11 \times 7.12 \times 1.9$  mm. The placement of 11 P-type semiconductors and 11 N-type semiconductors, 23 metal contact switching plates made it possible to create a 21-semiconductor thermocouple in the designed module. According to the results of numerical calculations, the distribution of the main operating parameters of the designed thermoelectric module of ship electrical equipment at a current strength of 0.5 A in the forced convection mode with a heat transfer coefficient  $h=50$  W/(m<sup>2</sup>K) was obtained. Also, the performance characteristics of the designed thermoelectric module when changing the current in the range of 0-1 A for different heat transfer coefficients were investigated. The analysis of parameters, in particular current density  $j$ , voltage  $U$ , electric field strength  $E$ , hot side temperature  $t$ , heat flux density  $q$ , ohmic heating  $J$ , as well as equivalent stress  $\sigma$  and deformations  $\varepsilon$ , was carried out.*

**Keywords:** thermoelectric module, design, convection, heat transfer coefficient, performance characteristics, thermoelectric Peltier effect, ship electrical equipment.

*Стаття прийнята 15.03.2025*

© Кучеренко Н. В., Капочкін Б. Б., Капочкіна М. Б.

## ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ ПОГЛИНАННЯ ЕНЕРГІЇ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У ВОДІ

Навігаційне забезпечення судноплавства базується на штатних гідроакустичних приладах судна, засобах донної інфраструктури позиціонування та зв'язку, берегових та донних засобах висвітлення підводної обстановки. Гідроакустичні засоби гідролокації та шумопеленгації працюють у різних частотних діапазонах. Метою дослідження є визначення фізичних причин змін дальності розповсюдження акустичного сигналу в залежності від частоти випромінювача. Критично розглянуті проблеми впливу на дальність розповсюдження акустичних хвиль в'язкості водного середовища, впливу релаксаційних процесів на поглинання акустичної енергії (дисоціації - рекомбінації розчиненої речовини з порушення термодинамічної рівноваги системи). Показано, що коректні емпіричні формули для розрахунку поглинання звуку у морській воді досі не існують, адже їх фізична суть настільки різна, що складається враження невизначеності розуміння, що саме (який фактор чи процес) є відповідальним за затухання звуку у морській воді. Результатами розрахунків вперше визначено, що для всього діапазону частот акустичних хвиль дальність їх розповсюдження, що виміряна не у одиницях виміру відстані, а у циклах, є константою. Однакова кількість циклів відповідає однаковому поглинанню акустичної енергії. Дальність розповсюдження звуку визначається довжиною хвилі, яка для умов практичної відсутності дисперсії звуку у воді пов'язана з частотою, але тільки статистично, а не фізично. За рахунок цього склалося хибне враження про залежність дальності розповсюдження звуку від частоти. Таким чином, вперше представлено підґрунтя для повноцінного переосмислення теорії процесу поглинання енергії акустичних хвиль у воді. Означений підхід може бути правомірним і для інших типів хвиль у інших середовищах.

**Ключові слова:** навігаційне забезпечення судноплавства; поглинання енергії хвиль; гідроакустика; дальність розповсюдження звуку; довжина хвилі; частота хвилі; релаксація звуку; дисперсія звуку; коефіцієнт поглинання звуку.

**Постановка проблеми.** Поглинання енергії акустичної хвилі у морській воді - явище незворотного переходу енергії механічної хвилі, що проявляється стисканням-розтягненням практично нестискуваної води, в теплову (в підвищення швидкості кінетичного руху молекул). Поглинання енергії акустичних хвиль у воді пов'язують з такою фізичною властивістю середовища як в'язкість, з процесами дисоціації - рекомбінації розчиненої речовини в умовах змін тиску та порушенням термодинамічної рівноваги системи. Навігаційне забезпечення судноплавства базується на штатних гідроакустичних приладах судна, засобах донної інфраструктури позиціонування та зв'язку, берегових та донних засобах висвітлення підводної обстановки. Гідроакустичні засоби гідролокації та шумопеленгації працюють у різних частотних діапазонах. Метою дослідження є визначення фізичних причин змін дальності розповсюдження акустичного сигналу в залежності від частоти випромінювача.

Вплив в'язкості середовища на поглинання акустичної енергії.

Вважається загальноприйнятим [1], що механізми поглинання звуку у воді пов'язані, в основному, з її в'язкістю. У той же час чіткого фізичного розуміння впливу в'язкості на акустичні хвилі не існує. Це підтверджує той факт, що в'язкість одночасно розглядається у двох типах - здвигова та об'ємна. Така фізична властивість речовини, як в'язкість залежить від температури, і це інтуїтивно зрозуміло та експериментально доведено: при збільшенні температури обидва види в'язкості зменшуються. Тиск також повинен впливати на в'язкість, але вважається, що зміна тиску змінює лише здвигову в'язкість, а об'ємна в'язкість чомусь залишається незмінною. Тобто, об'ємна в'язкість не у повній мірі відповідає

фізичним властивостям в'язкості, як загального поняття. Здвигова в'язкість нібито виникає як результат взаємодії під час руху суміжних шарів води один відносно другого. Цю в'язкість формалізують через коефіцієнт здвигової (Стоксової чи першої) в'язкості. У результаті лабораторних дослідів доведено, що здвигове в'язке поглинання енергії акустичних хвиль у морській воді практично не відбувається і є домінуючим лише у прісній воді. У морській воді поглинання енергії акустичної хвилі за рахунок здвигової в'язкості стає суттєвим лише для ультразвуку (частота > 1 МГц). Причини такої особливості прояву здвигової в'язкості у морській воді для нас не є очевидними.

У морській воді домінує поглинання енергії звуку за рахунок об'ємної в'язкості, яка формалізується через коефіцієнт об'ємної в'язкості. Об'ємна в'язкість проявляється в процесах, що супроводжуються змінами об'єму рідини при проходженні акустичної хвилі. Локальні стискання та розрідження, мабуть, приводять до порушення термодинамічної рівноваги системи. Вважається, що цей механізм викликає витрати акустичної енергії. Об'ємна в'язкість більше здвигової у два - три рази. Тобто логічно вважати, що і поглинання акустичних хвиль у морській воді за рахунок переходу енергії звукової хвилі в тепло, повинно відбуватися не менш, ніж удвічі більше. У той же час загальновідомо, що прісна та морська вода змінюють свій об'єм під дією тиску не більше, ніж на 1%. Тобто, фізичний процес стискання - розтягнення, який у воді фактично не проявлений, удвічі більше впливає на поглинання звуку, ніж фізичне явище здвигової в'язкості.

Якщо у прісній воді домінує здвигова в'язкість, а у морській – об'ємна, то саме розчинені у воді речовини мають бути найвпливовішими у процесі поглинання звукової енергії. Таким чином можна констатувати, що витрати енергії акустичної хвилі відбуваються в процесі дисоціації – рекомбінації розчиненої речовини, що на нашу думку не має відношення до такої фізичної властивості середовища, як в'язкість.

При поширенні звуку у воді, яка характеризується здвиговою і об'ємною в'язкостями (фізичний зміст яких досі не визначений але більш-менш надійно формалізований відповідними коефіцієнтами) та теплопровідністю, коефіцієнт поглинання повздовжньої хвилі дорівнює:

$$\text{Акл} = (\omega^2 / 2\rho c^3) [4\eta / 3 + \xi + \chi(1/C_v - 1/C_p)], \quad (1)$$

де  $\rho$  - щільність середовища,

$c$  - швидкість звуку,

$\omega = 2\pi f$  - колова частота звукової хвилі ( $f$  - частота, кількість коливань на одну секунду),

$\eta$  і  $\xi$  - коефіцієнти здвигової та об'ємної в'язкості, відповідно,

$\chi$  - коефіцієнт теплопровідності,

$C_p$  і  $C_v$  - теплоємність середовища при постійних тиску та об'ємі.

У наведеній емпіричній формулі головний вплив на поглинання акустичної хвилі має частота хвилі. Причини того, що коефіцієнти в'язкості на порядки менше впливають на поглинання енергії акустичних хвиль, ніж їх частота, у емпіричних формулах не мають пояснення, в них лише зафіксовано зазначений факт.

Слід зауважити, що в аспекті розповсюдження повздовжніх хвиль у воді, на відміну від інших речовин, є проблеми з поняттям густини води. Відповідно до закону Ньютона-Лапласа повздовжні хвилі, у тому числі звук, розповсюджуються у середовищі зі швидкістю, яка залежить від стискуваності рідини та її густини, яка у даному випадку є показником молекулярної маси речовини. Слід зазначити, що механічні повздовжні хвилі рухають молекули речовини, долаючи інерцію їх маси (у формулу Ньютона-Лапласа входять як щільність) та сили міжмолекулярної взаємодії (у формулу входять як пружність). У воді, на відміну від інших речовин, повздовжні хвилі рухають не тільки поодинокі молекули води з молекулярною масою 18, але й утворені асоціації з декількох молекул (від двох і більше), у яких міра інерції (маса) більша у порівнянні з молекулою води. Нами неодноразово вказувалося на проблематичність визначення густини морської води, про що свідчить факт відсутності узагальненої формули її розрахунку. Невизначеність густини води як характеристики, що входить у формулу швидкості звуку Ньютона-Лапласа, є причиною неможливості її застосування для розрахунку

швидкості звуку у воді. Невизначеність густини (яка суттєво залежить і від структурованості морської води) у формулі (1) призводить до невизначеності коефіцієнту поглинання звуку.

Крім того слід зауважити, що формально швидкість розповсюдження акустичних хвиль є функцією частоти акустичних хвиль, що відповідає терміну - дисперсія звуку. Однак, хоч і з досі невизначених причин, дисперсія звуку у воді не перевищує 1 % (на відміну від інших рідин, де може перевищувати 20 %). Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності також є залежними від структурованості води. Таким чином, члени рівняння розрахунку коефіцієнту поглинання енергії звуку (1) є залежними один від одного і тому не визначеними у повній мірі, а сама емпірична формула не має чіткого фізичного змісту.

У роботі [2] аналітично виведена формула коефіцієнту поглинання звуку у морській воді, у якій також поглинання звуку прямо пропорційне частоті у другому ступені.

Прикладне значення мають рівняння опосередкованого визначення ступеню поглинання звуку, як функції тільки показника частоти. Наприклад, зміну інтенсивності звуку залежно від відстані описують рівнянням:

$$I_x = I_0 e^{-fx}, \quad (2)$$

де  $I_0$  – початкова інтенсивність звуку,

$f$  – частота повздовжніх хвиль,

$I_x$  – інтенсивність звуку на відстані  $x$  від випромінювача.

Наявність такого типу рівнянь свідчить про те, що такі аргументи розрахунку поглинання звуку як  $\rho$ ,  $c$ ,  $\eta$ ,  $\xi$ ,  $\chi$ ,  $C_V$ ,  $C_P$  не є суттєвими, а можливо, і науково обґрунтованими. Однак слід враховувати, що зазначений тип емпіричних формул не забезпечує необхідну достовірність у всьому діапазоні частот - від інфразвуку до гіперзвуку. Так, для звуку в діапазоні від 60 Гц до 60 кГц коефіцієнт затухання апроксимується залежністю:

$$\alpha = 0,036f^{3/2}, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт затухання звуку у воді, в децибелах на кілометр;

$f$  – частота коливань звуку, в кГц.

У гіперзвуковому діапазоні виникає потреба враховувати певні додаткові процеси. У роботі [3] наводиться формула для коефіцієнту поглинання звуку ( $\alpha$ ) для частот, що перевищують 1 МГц, як функцію частоти ( $f$ ), температури ( $T$ ) і глибини ( $D$ ):

$$\alpha = 0,00049 f^2 e^{-(T/27+D/17)} \quad (4)$$

Альтернативне рівняння, надане у роботах [4, 5], у якому налічується вже 10 констант.

*Вплив релаксації на поглинання акустичної енергії.*

Для води у гіперзвуковому діапазоні частот коефіцієнт поглинання звуку стає залежним від релаксації - процесу відновлення термодинамічної рівноваги середовища, порушеного через зміну тиску і температури у водному середовищі при проходженні звукової хвилі. Загальновідомо, що релаксація пов'язана з процесами на молекулярному та міжмолекулярному рівні. Вважається, що поглинання акустичних хвиль в рідинах може бути обумовлено коливальною релаксацією, структурною релаксацією, обертово-ізомерною релаксацією, дисоціацією розчинених речовин тощо. Наприклад, за незмінних температури та тиску число дисоційованих та рекомбінованих іонів у морській воді знаходиться в певній рівновазі, але в процесі розповсюдження акустичної хвилі ця рівновага порушується. В зонах підвищеного тиску ступінь дисоціації зростає, а в зонах зниженого тиску рівновага ступінь дисоціації знижується. Рекомбінація іонів потребує певного часу, внаслідок чого відновлення рівноваги запізнюється за фазою відносно хвилі тиску, тому весь процес має релаксаційний характер. Але важливо розуміти, що релаксаційне поглинання акустичних хвиль

завжди супроводжується явищем дисперсії звуку, однак у воді для гіперзвуку дисперсія така само незначна як і для звукового діапазону. Таким чином, пов'язаний з релаксацією коефіцієнт поглинання звуку, що наведений у формулі (5), також не є фізично обґрунтованим:

$$\alpha_p = (c_{\infty 2} - c_0) / 2c_0 \cdot \omega 2\tau / (1 + \omega 2\tau), \quad (5)$$

де  $\tau$  – термін релаксації,  $c_0$  – швидкість поширення звуку за низьких частот,  $c_{\infty}$  – швидкість звуку за високих частот.

Всупереч цьому у роботі [6] вказується, що поглинання звуку у морській воді перевищує поглинання у прісній воді і що це пов'язано з релаксаційними процесами.

Виходячи з того, що наявність процесу релаксації визначається наявністю дисперсії звуку, можна констатувати, що для морської води процеси релаксації, у тому числі структурної релаксації, релаксації, що пов'язана з дисоціацією розчинених речовин, не є впливовими на поглинання звуку. Тобто у морській воді, у якій дисперсія звуку практично не проявляється, поглинання звуку не повинно залежати від релаксації, особливо у гіперзвуковому діапазоні частот.

Таким чином нами показано, що коректні емпіричні формули для розрахунку поглинання звуку у морській воді досі не існують. Вірніше, формул для розрахунку поглинання звуку досить багато, але їх фізична суть настільки різна, що складається враження невизначеності розуміння, що саме (який фактор чи процес) є відповідальним за затухання звуку у морській воді.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Даний аналіз базується на узагальнених даних, представлених у підручнику “Спеціальні розділи фізичної океанології” [7], та статей у напрямку гідроакустики, надрукованих у період з 2015 до 2021 р. [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Також врахована інформація з наукових джерел [3, 4, 5; 14, 15; 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22].

Нажаль, досі загальноприйнятою є хибна, з нашої точки зору, теза про те, що за умов практичної відсутності дисперсії звуку у морській воді, релаксаційні процеси в ній все таки вважаються впливовими на поглинання акустичної енергії. У розвиток цієї тези нібито експериментально визначено, що двома основними хімічними речовинами, з якими пов'язане виникнення релаксаційних процесів за певних звукових частот, є борати і сульфати магнію. Фактично без опису експериментів та обговорення (всебічного аналізу) їх результатів, вважається експериментально встановленим, що борати перестають прогресивно поглинати звук, починаючи з частоти 3,0 - 3,5 кГц, а сульфат магнію - починаючи з частоти 300 кГц. Тобто, борати поглинають акустичну енергію у звуковому діапазоні частот, а сульфати магнію - в ультразвуковому діапазоні частот. У роботі [3] наведено рівняння для розрахунку частот релаксації боратів ( $f_1$ ) та сульфатів ( $f_2$ ):

$$f_1 = 0,78(S/35)0.5e^{(T/26)}, \quad (6)$$

де  $T$  – температура;  
 $S$  – солоність.

$$f_2 = 42e^{(T/17)}, \quad (7)$$

де  $T$  – температура.

Зазначені частоти релаксації сульфатів та боратів входять до формули розрахунку коефіцієнту поглинання звуку [3].

$$\alpha = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{(pH-8)/0.56} + 0.52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \left(\frac{S}{35}\right) \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-D/6} + 0.00049 f^2 e^{-(T/27+D/17)} \quad (8)$$

Однак, слід звернути увагу на формули (6, 7) розрахунку частот релаксації, обумовлені наявністю у воді боратів та сульфату магнію. Частота релаксації сульфатів розраховується без урахування їх концентрації і є функцією виключно температури, що не є логічним. Частота релаксації боратів розраховується за даними солоності, яка згідно закону Дітмара опосередковано враховує концентрацію боратів. Але, враховуючи відсоткове співвідношення загальної концентрації солі до концентрації боратів, зазначений спосіб представлення концентрації боратів у формулі не є коректним.

Таким чином слід зазначити, що діапазон частот, у якому на поглинання звуку впливають релаксаційні процеси боратів та сульфатів, не може бути визнаний науково обґрунтованим. Наведені формули слід розглядати як такі, що не є фізично поясненими та однозначно експериментально підтвердженими, адже у зазначених діапазонах частот досі не зафіксовано фактів прояву дисперсії звуку.

Аналіз аргументів формули (8) дає змогу констатувати, що у всіх трьох складників коефіцієнту поглинання звуку фігурує частота звуку у другому ступені, яка і є головним аргументом функції. Поглинання звуку, від якого залежить дальність дії засобів гідролокації і шумопеленгації, фактично розраховується лише як функція частоти звуку (кГц), початкової амплітуди акустичної хвилі (кПа), і емпіричного коефіцієнту затухання звуку (дБ/км), який також визначається як функція частоти звуку [23].

**Виявлення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття.** У результаті проведеного аналізу наукових досліджень, нами було констатовано суттєві обмеження теоретичних методів розрахунку поглинання звуку у морській воді та відсутність однозначно експериментально підтверджених та фізично обґрунтованих формул таких розрахунків.

У звуковому діапазоні частот процес розповсюдження акустичних хвиль в морському середовищі можна вважати адіабатичним відповідно до припущення Ньютона (без обміну енергією з тією частиною середовища, де звукова хвиля в даний момент не поширюється). Тобто, при збільшенні довжини хвилі збільшується ширина та об'єм фронтальної області з аномально високими характеристиками тиску і, відповідно, збільшується тривалість існування умов стискання/розрідження середовища. Так наприклад, на частоті 25 Гц ширина фронтальної області інтенсивного стискання морського середовища перевищує 30 м, а сам процес стискання триває до 0,1 с. А ось вже при випромінюванні акустичної енергії на мегагерцевих частотах (у міліметровому діапазоні довжин хвиль), у морському середовищі починають реєструватися об'ємні теплові молекулярні акустичні шуми. Слід зазначити, що в процесі експериментальних досліджень важко виділити частини енергії, яка губиться за рахунок виключно поглинання, чи виключно за рахунок розсіяння. З цієї причини, з метою досягнення практичних цілей, було знехтувано фізичною суттю процесів та введено хибне поняття коефіцієнту затухання, що характеризує сумарне ослаблення звуку в певних діапазонах частот [24].

Враховуючи усі перераховані протиріччя (чи вірніше невизначеності) можна констатувати, що процеси релаксації, зміни в'язкості та структурованості можуть бути впливовими на швидкість розповсюдження звуку, але не на його ослаблення у морській воді. Цей факт опосередковано підтверджується тим, що всупереч негативному впливу релаксації, в'язкості, іншим процесам та властивостям води, звук у морській воді, на відміну від інших речовин, здатен розповсюджуватися на тисячі кілометрів, а інфразвук розповсюджується на більші відстані у порівнянні з ультразвуком.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Сучасний стан науки у напрямку дослідження процесів поглинання звуку в океані потребує висунення та опрацювання принципово нових гіпотез з фізики процесів поглинання звуку. Такі гіпотези повинні враховувати те, що:

- довгі акустичні хвилі розповсюджуються на більші відстані;
- дисперсія звуку у морській воді проявлена лише для нижнього діапазону інфразвуку;
- інфразвукові та звукові хвилі розповсюджуються у морській воді адіабатично.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Нами у 2019 році було зроблене допущення (висунута гіпотеза), що в процесі розповсюдження хвилі поглинання її енергії протягом одного циклу є константою, тобто не залежить від частоти хвилі. Таким чином, для кожної частоти поглинання звуку на дистанції, яка вимірюється однаковою кількістю циклів (довжин хвиль) також є константою. В таблиці 1 наведені дані про експериментально визначені приблизні кількісні оцінки дальності розповсюдження акустичних хвиль, що відрізняються за ознакою довжини [25].

Таблиця 1 – Дальність дії гідроакустичних систем залежно від довжини хвилі [25] з розрахунками авторів (стовпчик 4)

| Частота акустичного сигналу (кГц) | Довжина хвилі акустичного сигналу (м) | Дальність дії (м) | Дальність дії (цикл) |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------|----------------------|
| 1                                 | 2                                     | 3                 | 4                    |
| 0,1                               | 15,3                                  | $\geq 1000000$    | 66666                |
| 1                                 | 1,53                                  | $\geq 100000$     | 66666                |
| 10                                | 0,153                                 | 10000             | 66666                |
| 25                                | 0,061                                 | 3000              | 50000                |
| 50                                | 0,031                                 | 1000              | 33333                |
| 100                               | 0,015                                 | 600               | 40000                |
| 500                               | 0,003                                 | 150               | 50000                |
| 1000                              | 0,002                                 | 50                | 33333                |

Слід зазначити що похибка визначення кількісної оцінки якоїсь величини (у даному випадку дальності розповсюдження акустичних хвиль) збільшується зі зменшенням її абсолютного значення. Можливо тому, для довжин хвиль, що вимірюються від десятків метрів до 15 см, дальність дії гідроакустичних засобів складає 66666 циклів, а для хвиль з меншою довжиною починає коливатися від 50000 до 33333 циклів. Відповідно до таблиці 1 можна висунути постулат про те, що дальність розповсюдження звуку у воді оцінюється 66666 циклами довжини акустичної хвилі. Це дозволяє стверджувати, що для морської води поглинання акустичної енергії на одному циклі однакове для акустичних хвиль незалежно від довжини хвилі і, відповідно, незалежно від частоти коливань. Тоді виникає можливість теоретичного перерахунку дальності дії гідроакустичних систем відповідно до довжини акустичної хвилі, на якій вони працюють. Результати розрахунків представлені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Дальність дії гідроакустичних систем залежно від робочої довжини хвилі

| Частота акустичного сигналу (кГц) | Довжина хвилі акустичного сигналу (м) | Дальність дії теоретична (м) |
|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| 1                                 | 2                                     | 3                            |
| 0,01                              | 153                                   | 10 199 898                   |
| 0,025                             | 61,2                                  | 4 079 959                    |
| 0,05                              | 30,6                                  | 2 039 979                    |
| 0,075                             | 20,4                                  | 1 369 986                    |
| 0,1                               | 15,3                                  | 1 019 989                    |
| 0,125                             | 12,24                                 | 815 991                      |
| 0,250                             | 6,12                                  | 407 995                      |
| 0,5                               | 3,06                                  | 203 997                      |
| 0,75                              | 2,04                                  | 135 998                      |
| 1                                 | 1,53                                  | 101 998                      |
| 5                                 | 0,306                                 | 20 399                       |
| 10                                | 0,153                                 | 10 200                       |
| 25                                | 0,061                                 | 4 066                        |
| 50                                | 0,031                                 | 2 066                        |
| 100                               | 0,015                                 | 1 000                        |
| 500                               | 0,003                                 | 200                          |
| 1000                              | 0,002                                 | 133                          |

Розглянемо відповідність теоретично визначених значень максимальної дальності розповсюдження звуку експериментально зафіксованим оціночним значенням для акустичних хвиль різної довжини (рис.1).



Рисунок 1 – Дальність дії гідроакустичних систем (розрахована – червона; експериментальна – синя) залежно від довжини хвилі (наведено діапазон 10 - 1000 кГц).

Для 10 кГц теоретична дальність складає 10,2 км, а експериментальна оцінка - 10 км; на частоті 500 кГц - 0,2 км і 0,15 км відповідно. Слід звернути увагу, що суттєвою різницею у бік зменшення експериментальних значень дальності дії гідроакустичних систем залежно від довжини хвилі відносно теоретичних, характеризується ультразвуковий діапазон частот 25 - 100 кГц. У цьому частотному діапазоні знаходяться резонансні частоти газових бульбашок різного розміру, що можуть бути у морському середовищі. Вони не враховуються у теоретичних розрахунках, але негативно впливають на експериментальні данні, бо під час виконання гідроакустичного експериментального оцінювання дальності дії гідроакустичного засобу, усунути вплив бульбашок практично неможливо. За результатами наших експериментів, які були проведені в натурних умовах в 2019 р. видно, що опромінювання води ультразвуком протягом певного часу призводить до дегазації води, тобто, створення газових бульбашок, які послаблюють звук за рахунок його поглинання та розсіяння, що фізично не є процесом поглинання звуку саме морською водою як субстанцією.

**Висновки.** Вважається загальновідомим, що дальність розповсюдження акустичних хвиль залежить від їх частоти. В результаті виконаних досліджень показано, що існуючий кореляційний зв'язок між дальністю розповсюдження акустичних хвиль і їх частотою є хибною кореляцією. Навігаційне забезпечення судноплавства базується на штатних гідроакустичних приладах судна, засобах донної інфраструктури, позиціонування та зв'язку, берегових та донних засобах висвітлення підводної обстановки. Гідроакустичні засоби гідролокації та шумопеленгації працюють у різних частотних діапазонах. Акустичні хвилі звукового та інфразвукового частотного діапазону використовуються для звукопідводного зв'язку, тому що мають дальність розповсюдження, що вимірюється в кілометрах. Недоліком звукового та інфразвукового каналу зв'язку є його низька пропускна здатність. Передачу великих об'ємів інформації забезпечують ультразвукові канали зв'язку. Недоліком ультразвукового каналу зв'язку є мала дальність розповсюдження звуку, що обмежена сотнями метрів. В напрямку гідролокації ультразвукові прилади забезпечують, на відміну від звукового діапазону, значну просторову розподільчу здатність, але на обмеженій відстані. Таким чином особливості фізики розповсюдження звуку з різною частотою на різну дальність не сприяють уніфікації засобів зв'язку та гідролокації. Причина зазначених особливостей розповсюдження акустичних хвиль у морській воді розглядається у зазначеній статті вперше, що має пріоритетне значення для навігації та підводного сегменту автономного сегменту ідентифікації АІС.

У роботі нами розглянуті проблеми впливу на дальність розповсюдження акустичних хвиль в'язкості морської води та процесів дисоціації - рекомбінації розчиненої речовини, що супроводжуються порушенням термодинамічної рівноваги системи. Критичний огляд цього впливу на процес затухання звуку показав фізичну необґрунтованість такого підходу до визначення дальності розповсюдження звуку у морському середовищі. Результатами наших розрахунків вперше визначено, що для всього діапазону

частот акустичних хвиль дальність їх розповсюдження, що виміряна не у одиницях виміру відстані, а у циклах, є константою: однакова кількість циклів відповідає однаковому поглинанню акустичної енергії. І ця кількість циклів нами оцінена у 66666. За рахунок різниці довжин акустичних хвиль, дальність розповсюдження звуку визначається довжиною хвилі, яка для умов практичної відсутності дисперсії звуку у воді, має статистичний зв'язок з частотою хвилі. За рахунок цього у дослідників склалося хибне враження про залежність дальності розповсюдження звуку від частоти. Але наявність кореляції у даному випадку не пов'язана з наявністю причинно наслідкового зв'язку між частотою акустичних хвиль і дальністю їх розповсюдження. Таким чином, вперше представлено підґрунтя для повноцінного переосмислення теорії процесу поглинання енергії акустичних хвиль у воді. Означений нами підхід може бути правомірним і для інших типів хвиль у воді чи інших середовищах.

### Література

1. Беруков Ю. Ф. Поглощение и рассеяние звука в море. Реверберация. *Океанология. Часть I. Физические явления и процессы в океане*. С. 29 URL <https://studfile.net/preview/1093214/page:29/> (дата звернення 10.12.2024).
2. Шулейкин В.В. *Физика моря*, Наука, Москва, 1968 г., 1090 с.
3. Ainslie M. A., McCole J. G., A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water, *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3), 1671-1672, Mar.1998.
4. Francois RE, Garrison GR Sound absorption based on ocean measurements: *Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions* *The Journal of the Acoustical Society of America* 72, 896-907, 1982; doi:10.1121/1.388170
5. Francois RE, Garrison GR Sound absorption based on ocean measurements. *Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption* *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6), 1879-1890, 1982 doi:10.1121/1.388673
6. Енциклопедія фізики і техніки URL: [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/2919.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/2919.html) (дата звернення 15.12.2024).
7. Михайлов В.І., Кучеренко Н.В. *Спеціальні розділи фізичної океанології: підручник* – Одеса : Екологія, 2011.– 238 с. ISBN 966-87407-6-3: 24.00.
8. Гладких І.І., Капочкін Б.Б., Кучеренко Н.В., Капочкіна М.Б. Вплив аномальних властивостей води на гідроакустичні технології. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» № 7 (1229) 2017, с. 164-172 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23
9. Гладких И.И., Капочкина М.Б., Зорин В.Ю. Современный уровень технологий, использующих гидроакустические методы для обеспечения навигации и морских поисково-спасательных работ. *Первый независимый научный вестник «технические науки»* №1/2015, Т. 2000, - с. 47-54.
10. Гладких І.І., Кучеренко Н.В., Капочкіна М.Б., Зорін В.Ю. Перспективы технологий, использующих гидроакустические методы, для обеспечения навигации и морских поисково-спасательных работ. *«Первый независимый научный вестник (технические науки) №2/2015»* Т. 2000, - с. 60-66.
11. Гладких І.І., Н.В. Кучеренко, М.Б. Капочкіна, Нізамутдінов І.Ф. Причини виникнення підводного звукового каналу *збірник наукових праць науково-дослідного центру Збройних Сил України «Державний океанаріум»* № 1 (2) - Одеса: Фенікс, 2018. - С.194 – 206.
12. Кучеренко Н.В., Капочкін Б.Б., Капочкіна М.Б., Барган О.Г. Проблемні питання застосування гідроакустичних засобів гідролокації та пеленгації підводних цілей *Збірник наукових праць науково-дослідного центру Збройних Сил України «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»* № 1 (3) – 2020, Одеса. С. 124-131.
13. Капочкіна М.Б., Гладких І.І., Кучеренко Н.В. Математичне моделювання акустичного поля корабля. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Графічні технології моделювання об'єктів, процесів та явищ», (23-24 квітня 2020 року – Одеса)*. м. Одеса. С.39
14. Михайлов И. Г., Соловьев В. А., Сырников Ю. П., Основы молекулярной акустики, том XII вып. 1 М., 1964 год.

15. Мэзона У. Физическая акустика, том 2, часть А и Б, М., 1968-69.
16. Herzfeld K.F., Litovitz T.A., Absorption and dispersion of ultrasonic waves, 1st Edition - January 1, 1959, eBook ISBN: 9781483275703.
17. Вадов Р.А. Поглощение и затухание низкочастотного звука в морской среде *Акустический журнал*, 2000, том 46, № 5, 1999 год С. 624 -631.
18. Ерохин Н.Ф. Изучение свойств воды в критической области акустическими методами *Вестник Таганрогского института имени А. П. Чехова* раздел 4. С. 96-101.
19. Протасов В.Р. Особенности распространения и излучения звука в воде Биоакустика рыб. – М.: Наука, 1965. – 208 с. URL: <https://collectedpapers.com.ua/ru/bioacoustics-of-fishes/osoblivosti-poshirennyaya-viprominyuvannya-zvuku-u-vodi> (дата звернення 10.01.2025).
20. Fisher F. and Simmons V., Sound absorption in sea water, *J. Acoustic. Soc. Am.*62, 558—564 (1977) doi:10.1121/1.381574.
21. Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. and Sanders J.V. (1982) *Fundamentals of Acoustics*. 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
22. Мандельштам Л. И., Леонтович М. А., К теории поглощения звука в воде, «ЖЭТФ», 1937, т. 7, в. 3, 438 с.
23. Митько А.В., Попов Н.Н. Лабораторный практикум по дисциплине «Морские информационные системы». – СПб.; РГТУ, 2013. – 64 с. URL: [http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/rid\\_4f5f0a12f8f24a6a91407edf50774d41.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_4f5f0a12f8f24a6a91407edf50774d41.pdf) (дата звернення 20.01.2025).
24. Лисютин В. А., Ярошенко А.А. Вертикальное распределение скорости звука в океане *Севастопольский национальный технический университет* URL: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/10720/1/12%2858%29\\_1\\_13.doc](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/10720/1/12%2858%29_1_13.doc) (дата звернення 01.02.2025).
25. Калькулятор звукової частоти та довжини хвилі URL: <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/sound-frequency-wavelength/> (дата звернення 01.02.2025).

## REFERENCES

1. Berukov Yu. F. Absorption and scattering of sound in the sea. Reverberation. Oceanology. Part I. Physical phenomena and processes in the ocean. pp. 29 URL: <https://studfile.net/preview/1093214/page:29/> (date of application 10.12.2024)
2. Shuleikin V.V. *Physics of the sea*, Nauka, Moscow, 1968, 1090 p.
3. Ainslie M. A., McColm J. G., A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water, *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3), 1671-1672, Mar.1998.
4. Francois RE, Garrison GR Sound absorption based on ocean measurements: *Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions* *The Journal of the Acoustical Society of America* 72, 896-907, 1982; doi:10.1121/1.388170
5. Francois RE, Garrison GR Sound absorption based on ocean measurements. *Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption* *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6), 1879-1890, 1982 doi:10.1121/1.388673
6. *Encyclopedia of physics and technology* URL: [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/2919.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/2919.html) (date of application 15.12.2024).
7. Mykhaylov V.I., Kucherenko N.V. *Special sections of physical oceanology: textbook* - Odesa: Ekologiya, 2011. - 238 p. . ISBN 966-87407-6-3: 24.00.
8. Gladkikh I.I., Kapochkin B.B., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B. The influence of anomalous properties of water on hydroacoustic technologies *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. Series: "New solutions in modern technologies" No. 7 (1229) 2017, p. 164-172 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23
9. Gladkikh I.Y., Kapochkina M.B., Zorin V.Yu. Modern level of technologies using hydroacoustic methods for navigation and marine search and rescue operations *First independent scientific journal "Technical sciences"* No. 1/2015, Vol. 2000, - p. 47-54.

10. Gladkikh I.I., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B., Zorin V.Yu. Perspectives of technologies using hydroacoustic methods to ensure navigation and marine search and rescue operations "First independent scientific journal (technical sciences) No. 2/2015" Vol. 2000, - p. 60-66.
11. Gladkikh I.I., N.V. Kucherenko, M.B. Kapochkina, Nizamutdinov I.F. The causes of the underwater sound channel, a collection of scientific works of the research center of the Ukrainian Armed Forces "State Oceanarium" No. 1 (2) - Odesa: Phoenix, 2018. - P.194 - 206.
12. Kucherenko N.V., Kapochkin B.B., Kapochkina M.B., Bargan O.G. Problematic issues of the use of hydroacoustic means of hydrolocation and direction finding of underwater targets. Collection of scientific works of the research center of the Ukrainian Armed Forces "State Oceanarium" of the Military Institute - Maritime Forces of the National University "Odesa Maritime Academy" No. 1 (3) - 2020, Odesa, - P. 124-131.
13. Kapochkina M.B., Gladkikh I.I., Kucherenko N.V. Mathematical modeling of the acoustic field of a ship. Collection of theses of reports of the International Scientific and Practical Conference "Graphic Technologies for Modeling Objects, Processes and Phenomena", (April 23-24, 2020 - Odesa). Odesa. - P.39
14. Mykhailov I.G., Solov'ev V.A., Syrnikov Yu.P., Fundamentals of molecular acoustics, volume XII, issue 1 M., 1964 h.
15. Mazona U. Physical acoustics, volume 2, part A and B, M., 1968-69.
16. Herzfeld K.F., Litovitz T.A., Absorption and dispersion of ultrasonic waves, 1st Edition - January 1, 1959, eBook ISBN: 9781483275703.
17. Vadov R.A. Absorption and attenuation of low-frequency sound in the marine environment Acoustic journal, 2000, volume 46, number 5, 1999 p. 624-631.
18. Erokhin N.F. Study of the properties of water in the critical region by acoustic methods Bulletin of the Taganrog Institute named after A.P. Chekhov Radel 4, pp. 96-101.
19. Protasov V.R. Peculiarities of propagation and emission of sound in water Bioacoustics of fish. - M.: Nauka, 1965. - 208 p. URL: <https://collectedpapers.com.ua/ru/bioacoustics-of-fishes/osoblivosti-poshirennya-ta-viprominyuvannya-zvuku-u-vodi> (date of application 10.01.2025).
20. Fisher F. and Simmons V., Sound absorption in sea water, J. Acoustic. Soc. Am.62, 558—564 (1977) doi:10.1121/1.381574.
21. Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. and Sanders J.V. (1982) Fundamentals of Acoustics. 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
22. Mandelshtam L. I., Leontovich M. A., To the theory of sound absorption in water, ZhETF, 1937, v. 7, v. 3, 438 p.
23. Mytko A.V., Popov N.N. Laboratory workshop on the discipline "Marine Information Systems". – St. Petersburg; RGSMU, 2013. – 64 p. URL: [http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/rid\\_4f5f0a12f8f24a6a91407edf50774d41.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_4f5f0a12f8f24a6a91407edf50774d41.pdf) (date of application 20.01.2025).
24. Lysyutin V. A., Yaroshenko A. A. Vertical distribution of sound speed in the ocean Sevastopol National Technical University URL: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/10720/1/12%2858%29\\_1\\_13.doc](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/10720/1/12%2858%29_1_13.doc) (date of application 01.02.2025)
25. Sound frequency and wavelength calculator URL: <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/sound-frequency-wavelength/> (date of application 01.02.2025).

*Kucherenko N., Kapochkin B., Kapochkina M.*

## **APPLIED ASPECTS OF THE LAW OF THE PROCESS OF ABSORPTION OF ACOUSTIC WAVE ENERGY IN WATER**

*Navigation support for shipping is based on the standard hydroacoustic devices of the ship, means of the bottom infrastructure of positioning and communication, shore and bottom means of lighting the underwater situation. Hydroacoustic sonar and direction finding facilities operate in different frequency ranges. The purpose of the study is to determine the physical reasons for changes in the propagation range of an acoustic signal depending on the frequency of the emitter. The problems of the influence of the viscosity of the water medium on the propagation distance of acoustic waves, the influence of relaxation processes on the absorption of acoustic energy (dissociation - recombination of a dissolved substance due to a violation of the thermodynamic equilibrium of the system) are critically considered. It is shown that correct empirical formulas for calculating sound absorption in seawater still do not exist, because their physical essence is so different that there is an impression of uncertainty in understanding what exactly (which factor or process) is responsible for the attenuation of sound in seawater. The results of the calculations determined for the first time that for the entire frequency range of acoustic waves, the range of their propagation, which is measured not in units of measurement of distance, but in cycles, is a constant. The same number of cycles corresponds to the same absorption of acoustic energy. The range of sound propagation is determined by the wavelength, which for the conditions of the practical absence of sound dispersion in water is related to frequency, but only statistically, not physically. Due to this, a false impression was formed about the dependence of the sound propagation distance on the frequency. Thus, for the first time, the basis for a complete rethinking of the theory of the process of absorbing the energy of acoustic waves in water is presented. The defined approach may be valid for other types of waves in other environments.*

**Keywords:** *navigation support for shipping; absorption of wave energy; hydroacoustics; sound propagation distance; wavelength; wave frequency; sound relaxation; dispersion of the sound; sound absorption coefficient.*

*Стаття прийнята 15.03.2025*

© Науменко А.В., Капочкіна М.Б.

## ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЄКТУВАННЯ ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ У РУСЛАХ РІЧОК

Оптимізація проектування днопоглиблювальних робіт у руслах річок досягається шляхом узгодження з фізичними законами формування русла. Загальновідомо, що річкові русла формуються під впливом сили тяжіння, тобто у відповідності з нахилом земної поверхні. Враховано також, що природні річкові русла прокладені вздовж кордонів тектонічних блоків, тому нами досліджено вплив блокової подільності твердої оболонки Землі на формування руслових процесів. Базові принципи блокової структури літосфери були визначені в рамках ротаційної теорії структуроутворення, розробленої К.Ф. Тяпкіним. Зазначена теорія охоплює до десятка епізодів швидкоплинних змін у процесі структуроутворення нашої планети, відповідно до яких були сформовані мережі блокової подільності літосфери. Завдяки цьому виникли перспективи підвищення ефективності днопоглиблювальних робіт під час штучної оптимізації русла річки. Задіяння на практиці теоретичних знань стосовно природних процесів руслоутворення є впливовим чинником покращення стратегії планування вантажоперевезення річковим транспортом.

**Ключові слова:** річкові транспортні коридори, безпека судноплавства, днопоглиблювальні роботи, процеси руслоутворення, геоморфологія, ротаційна теорія структуроутворення, морська навігація.

**Вступ.** У роботі [1] розглянуто проблематику вантажоперевезень річковими транспортними коридорами (шляхами). На карті (рис. 1) показано, що найбільш розгалуженою є мережа річкових транспортних шляхів у центральній і північній Європі.



Рисунок 1 – Карта-схема сьомого міжнародного транспортного коридору [2].

На карті показано канали, що з'єднують Каспійське море з Азовським (довжина 101 км) і Білим морями, Балтійське море з Білим морем. Як приклад, 7-й міжнародний транспортний коридор по річці Дунай пов'язує порти Чорного моря з Європейськими країнами (показаними рожевим кольором).

Динаміка розвитку судноплавних каналів Дунай-Чорне море, нажаль, свідчить про те, що Румунія значно випереджає Україну у створенні логістичних шляхів сьомого міжнародного транспортного коридору.

Слід вважати, що річкові транспортні шляхи України, як складова Європейської транспортної системи, у майбутньому мають певну перспективу конкурувати з автомобільними і авіаційними перевезеннями. Але слід враховувати, що ефективність судноплавства по річках України дуже сильно залежить від щорічного зменшення їх водності у посушливий сезон. В умовах, коли навігація на річках погіршується, підвищується актуальність днопоглиблювальних робіт. За таких умов виникає необхідність вирішення головної проблеми: визначити, яким чином штучне втручання в руслові процеси матиме мінімальну собівартість за рахунок максимального наближення до природних процесів, тобто, бути науково-обґрунтованим. Зараз, у зв'язку з певними досягненнями у напрямку гідрології руслових процесів, зазначені задачі можуть бути виконані зі значно більшою ефективністю, ніж у минулому.

**Стан вивченості проблеми.** В останні роки в Україні у галузі геоморфології та гідрогеології опубліковані нові наукові результати пріоритетного характеру, які можуть бути успішно реалізованими на практиці як результат формування нового підходу до проектування днопоглиблювальних робіт у руслах річок. Зміна парадигми днопоглиблювальних робіт базуватиметься на раніше невідомих особливостях процесів руслоутворення.

На схемі (рис. 2) показана класична схема руслоутворення річки, що враховує лише вплив сили тяжіння на рух води, тобто рельєф місцевості [3].

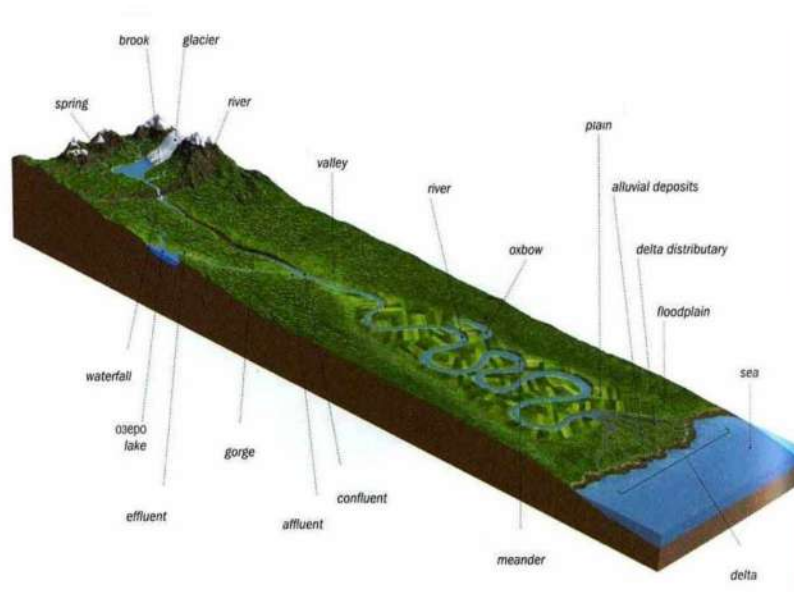


Рисунок 2 – Схема утворення русла річки [3].

Зазначена схема не враховує вплив на руслові процеси блокової подільності твердої оболонки Землі, яка є динамічною, і сприяє трансформації рельєфу суходолу [4]. Слід враховувати, що тектонічні процеси діють у сукупності з гідрогеологічними процесами, формуючи ендегенну флюїдодинамічну теорію безперервної трансформації річкової мережі [5]. Флюїдодинамічні природні процеси суттєво впливають на трансформацію річкового русла, що найчастіше проявляється на дельтових ділянках русел. В монографії [6] декларуються базові положення ендегенної теорії рельєфоутворення. Її авторами в першу чергу були узагальнені результати наукових досліджень, виконаних Інститутом геологічних наук НАНУ, [7], інших авторів [5,8,9].

Важливі дані про ендегенну природу формування рельєфу на узмор'ї узагальнені в роботі Ключової В.О. [10], де багато років тому було звернуто увагу на системне чергування в рельєфі

суходолу північного Приазов'я горстів і грабенів (рис. 3), уздовж яких, так само системно, відбувається формування вздовжберегових прямолінійних акумулятивних форм типу кіс.

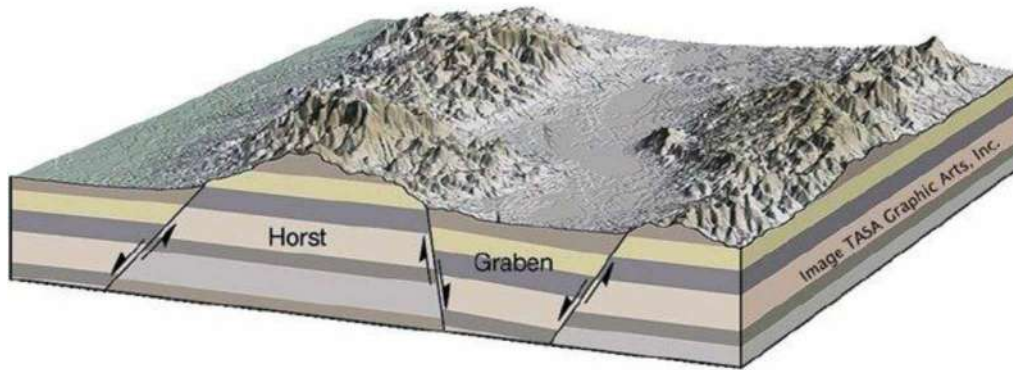


Рисунок 3 - Схема геологічних структур горстів та грабенів [11]

В останні роки, завдяки науковому внеску відомого українського вченого К.Ф. Тяпкіна [4], виникло підґрунтя для ревізії екзогенної гіпотези формування річкових русел. К.Ф. Тяпкін, врахувавши ротаційні ефекти, на базі даних емпіричних досліджень встановив, що за сучасного положення Земної осі генерується поділ поверхні Землі на квадратні блоки з орієнтацією виключно  $0^\circ$  і  $270^\circ$ . У геологічному минулому, коли положення осі обертання Землі неодноразово змінювалося, в рельєфі були сформовані прямокутні блоки з іншими азимутами простягання:  $17^\circ$  і  $287^\circ$ ;  $35^\circ$  і  $305^\circ$ ;  $45^\circ$  і  $315^\circ$ ;  $62^\circ$  і  $332^\circ$ ;  $77^\circ$  і  $347^\circ$ . Результати геологічного картографування на щитах та кристалічних масивах суходолу показують, що підпорядкованість розломів і блоків відповідає теорії фракталів і вони є частковими до основного базового просторового масштабу ( $140 \pm 10$  км). Це блоки, що мають розміри: 70; 35; 17,5; 8,7; 4,4; ... км. Завдяки науковому відкриттю К.Ф. Тяпкіна, є можливість не тільки районування територій за ознакою блокової подільності Земної кори, а й перспективи прогнозування напрямків майбутніх трансформацій суходолу. Вперше це було виконано на прикладі півдня Одеського регіону (рис. 4), а результати дослідження були опубліковані у монографії [12].

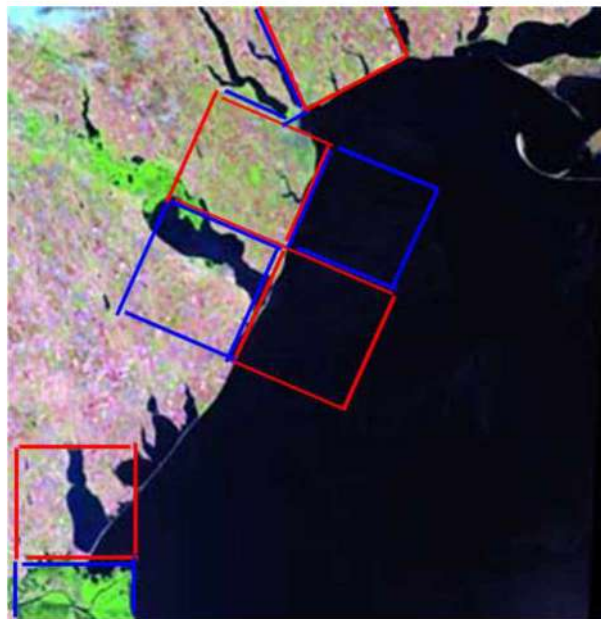


Рисунок 4 - Схема районування півдня Одеського регіону за ознакою блокової подільності твердої оболонки Землі (синім показані блоки, що занурюються, червоним, що піднімаються) [12].

На схемі показано, що у Придунав'ї, в районі найбільшої річки України, рельєф суходолу вже встиг перебудуватися відповідно до сучасної орієнтації блокової подільності літосфери, тобто  $0^\circ$  і  $270^\circ$ . У Придністров'ї ще збереглася діагональна орієнтація блокової подільності.

Зазначений принцип блокової подільності твердої оболонки Землі відкриває методичні спроможності для районування території всієї України (рис. 5).



Рисунок 5 - Топографічна карта України Maps [13].

На карті, прямолінійними ділянками русла Дніпра проявлений вплив блокової подільності літосфери на річкову мережу. Результати наукових досліджень Інституту геологічних проблем НАН України [7,14] об'єктивно обґрунтовують науковий напрямок, що розглядає геофлюїодинамічні структури, як канали вертикальної міграції пластових та глибинних флюїдів, які відіграють активну роль у формуванні річкової мережі.

Приуроченість певних ділянок річкового русла до геофлюїодинамічних структур літосфери обумовлює їх прямолінійність (або прямолінійність їх окремих фрагментів), схожість геометрії їх контурів та періодичну повторюваність, характерну для лінійних зон розривних порушень земної кори.

Нами для районів акваторій сформульовано нову парадигму акумулятивного рельєфоутворення, в основі якої лежить блокуючий ефект вертикальних потоків рідини в гідросфері над зонами розломів, який призводить до трансформування горизонтальних течій зазначеними вертикальними потоками флюїдів. За таких умов зниження швидкості горизонтального потоку, особливо в придонному шарі, де концентрація завислих наносів зазвичай максимальна, призводить до випадання з течії зваженої речовини на дно. А у тому місці, де перетинаються розломи (у вузлі їх перетину), течія має змінити напрямок руху. Результати математичного гідродинамічного моделювання зазначеного процесу свідчать про те, що відкладення наносів перед прямолінійною зоною розвантаження підземних вод значно ослаблюється, що компенсується лавиноподібним відкладенням наносів поза зазначеною зоною [9,15].

Для умов суходолу нами пропонується використовувати зазначені природні процеси для вдосконалення теорії руслоутворення, і на її основі - розробки практичних методів підвищення ефективності днопоглиблювальних робіт. Фізична модель впливу геофлюїодинамічних структур на формування рельєфу суходолу враховує процеси тектонічного розщільнення порід [7,14].

Це призводить до різкої гіпсометричної та морфометричної диференціації рельєфу в межах геофлюїодинамічних структур. При цьому характерно, що орієнтування осьової лінії кожної з цих форм рельєфу відповідає азимуту простягання однієї з лінійних зон горизонтальної напруги у літосфері, що формують геофлюїодинамічні структури. Важливо розуміти, що прояви підземного водообміну диференційовані у просторі та максимально помітні у зонах підвищеної проникності земної кори, тобто, у геофлюїодинамічних структурах. У межах геофлюїодинамічних структур вертикальна міграція пластових та глибинних флюїдів посилює ефект ландшафтного проявлення цих структур.

Геофлюїдодинамічні структури пов'язані з процесами перезволоження ґрунтів суходолу. Активний прояв геофлюїдодинамічних структур на сучасному етапі зумовлює їх вплив практично на всі компоненти сучасних ландшафтів (рельєф, річкова гідромережа, конфігурація берегової смуги).

Зазначена фізична модель руслоутворення була реалізована у вигляді запропонованого авторського проекту судноплавного каналу Дунай- море [16]. Розглядалося декілька різних варіантів. Проект під умовною назвою “Канал Дунай-Сасик-Чорне море”, автором якого був Капочкін Б.Б., передбачав днопоглиблення існуючого каналу “Дунай-Сасик”, який на той час вже втратив свою функцію подачі дунайської води в Сасик, з подальшим виходом у Чорне море (рис. 6). Важливою особливістю проекту було коректне обрання траси каналу. У даному випадку канал, що був побудований для наповнення озера Сасик дунайською водою, за азимутом співпав з азимутом простягання пересипу, що відділяє озеро Сасик від моря, тобто є паралельним напрямку берегової смуги, яка існувала до 1700 р. [17]. Зазначена берегова смуга на сучасному геодинамічному етапі на суходолі проявлена береговими піщаними морфоформами (дивись рис. 3), що мають місцеву назву «Гринду». У нашій монографії [6] доведено, що усі без виключення надводні акумулятивні утворення формуються геофлюїдодинамічними процесами. З'єднувальний канал Дунай - Сасик за азимутом співпадає з руслом Очаківського рукава Дунаю, що сформований геофлюїдодинамічними процесами.



Рисунок 6 – Схема судноплавних шляхів з Української дельти Дунаю до Чорного моря [18].

**Отримані результати.** Відповідно до методичного рішення щодо районування суходолу за критерієм блокової подільності літосфери, наведеного у монографії [12] нами виконано районування Причорномор'я та північної Добруджі (рис. 7).



Рисунок 7 – Схема блокової подільності регіону Причорномор'я та Північної Добруджі [19]

На схемі показані два тектонічні блоки базового розміру 140x140 км. У регіоні Причорномор'я тектонічний блок з заходу обмежений меридіонально зорієнтованою ділянкою русла річки Прут, а у Північній Добруджі - меридіонально зорієнтованою ділянкою русла річки Дунай. На зазначеній ділянці річки Прут та Дунай течуть назустріч одна одній у кордонах меридіонально зорієнтованої (сучасної) *геофлюїдодинамічної структури, довжиною приблизно 280 км*, і в районі міста Рені змінюють напрямок на  $90^\circ$ , повертаючи на схід. На цій ділянці річка Дунай стає південною межею Причорноморського блоку та, одночасно, північною межею блоку Добруджі. В кордонах Причорноморського тектонічного блоку існуюча мережева система малих річок та Придунайських озер сформована вздовж сучасної системи розломів, тобто в системі  $0^\circ$  і  $270^\circ$ . Безпосереднє русло Дунаю досі знаходиться у стані трансформації відповідно широтної орієнтації.

Слід зазначити, що максимальну здібність до трансформації мають ділянки річок, що протікають алювіальними рівнинами та у районах дельт. Дельта Дунаю є типовим алювіальним конусом виносу. Важливо констатувати, що в районі Кілійської дельти, східний кордон якої має меридіональну орієнтацію, відповідно до східного кордону блоку 140x140 км у Північній Добруджі досі збереглися прояви діагональної ( $62^\circ$  і  $332^\circ$ ) блокової подільності (проявлені напрямками прямолінійних взаємно перпендикулярних фрагментів рукавів Дунаю (рукава Очаківський і Старостамбульський) (рис. 8).



Рисунок 8 - Схема блокової подільності у Кілійській дельті Дунаю (просторовий масштаб 17,5x17,5 км, орієнтація  $62^\circ$  і  $332^\circ$ ).

Відповідно до ротаційної теорії рельєфоутворення, зазначені ділянки рукавів згодом неминуче зникнуть, натомість посиляться рукава відповідно до блокової подільності, що має орієнтацію  $0^\circ$  і  $270^\circ$ .

Таким чином, перспективні судноплавні шляхи повинні проектуватися лише вздовж сучасної системи розломів, тобто  $0^\circ$  і  $270^\circ$ , як це показано на рис. 9.

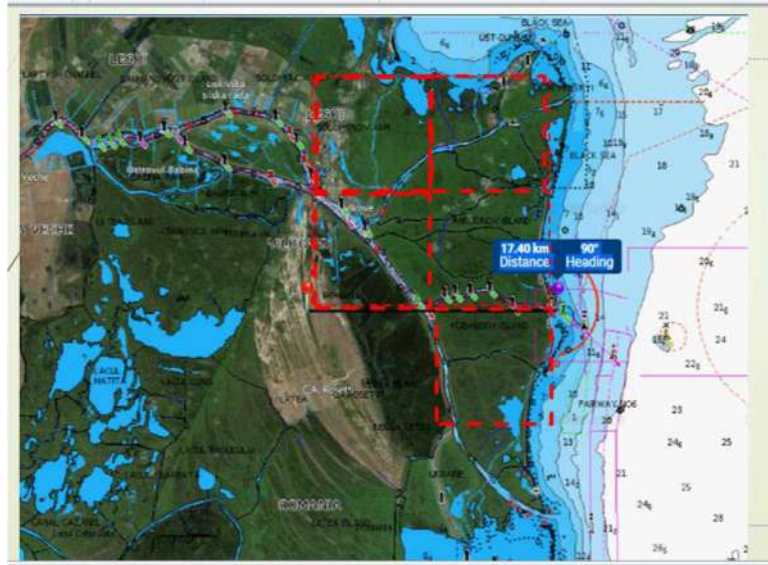


Рисунок 9 – Схема блокової подільності у Кілійській дельті Дунаю просторовим масштабом  $17,5 \times 17,5$  км і орієнтацією  $0^\circ$  і  $270^\circ$ .

Відповідно до схеми сучасної блокової подільності (рис. 9), очікується посилення водності у рукавах меридіональної орієнтації: Білгородський, Полуночний, Шабаш; та широтної орієнтації: Середній, Бистрий, Східний.

Відповідно до методичного рішення районування суходолу за критерієм блокової подільності літосфери, наведеного у монографії [12], нами виконано районування Придніпров'я. Результати виконаного дослідження є актуальними, бо у майбутньому цей річковий судноплавний шлях потребуватиме відновлення. За сучасних умов, що склалися після руйнування греблі Каховської ГЕС, відновлення русла Дніпра повинно здійснюватися з урахуванням існуючої та перспективної гіпсометричної та морфометричної диференціації рельєфу в межах геофлюїдодинамічних структур, тобто, має бути науково обгрунтованим. Враховуючи зазначене, нами розроблені певні пропозиції методичного характеру, що базуються на наукових досягненнях останніх років в області геофлюїдодинаміки.

Досліджено, яким чином блокова подільність літосфери впливає на руслові процеси Дніпра, що протікає по Українському кристалічному щиту. У першу чергу, звертає на себе увагу прямолінійний характер русла Дніпра на ділянці довжиною до 300 км - від Канева до Дніпра (рис. 10). На цій ділянці у морфометрії проявляються 4 тектонічні блоки, розмірами приблизно  $140 \times 140$  км, що сформувалися під кутом, близьким до  $305^\circ$ . Це у руслі Дніпра проявлено на ділянках Канів-Кременчук і Кременчук - Дніпро. На північний схід від русла Дніпра, малі річки та балки сформовані за азимутом  $35^\circ$ , тобто, у тій самій системі. Таким чином, замість того, щоб від Канева текти у найкоротшому напрямку до Чорного моря - на Вознесенськ у Південний Буг, або у напрямку Херсону, Дніпро «використовує обхідні шляхи» - геофлюїдодинамічні структури.

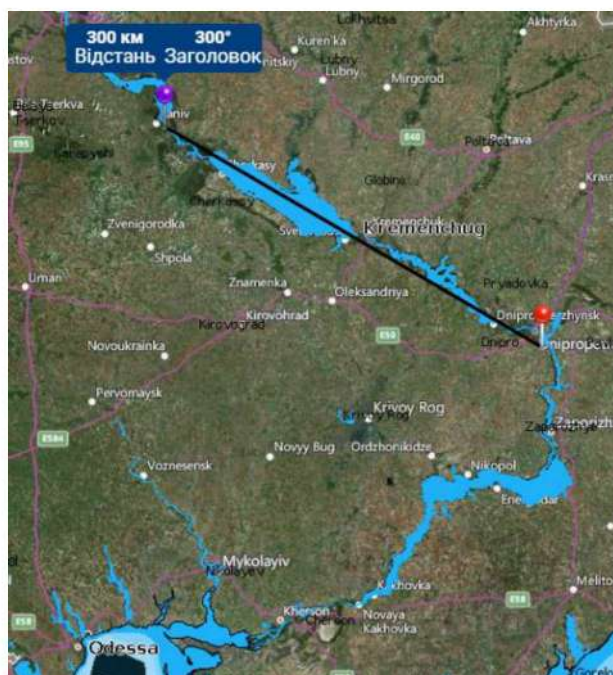
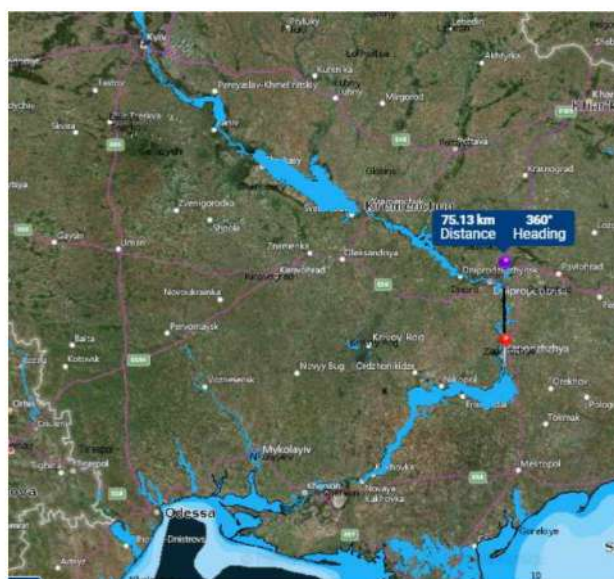
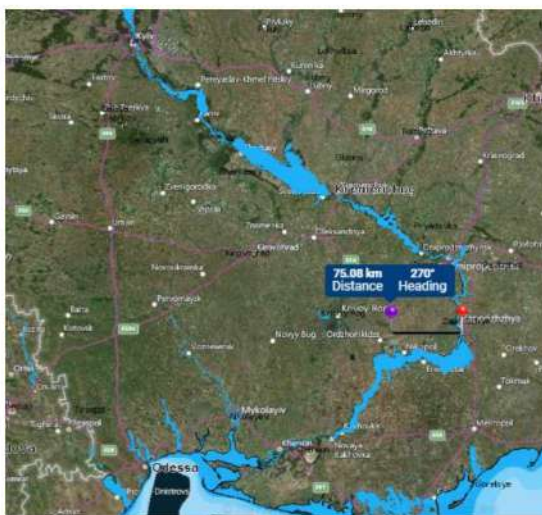


Рисунок 10 – Карта- схема ділянки русла р. Дніпро від Канева до Дніпра [20].

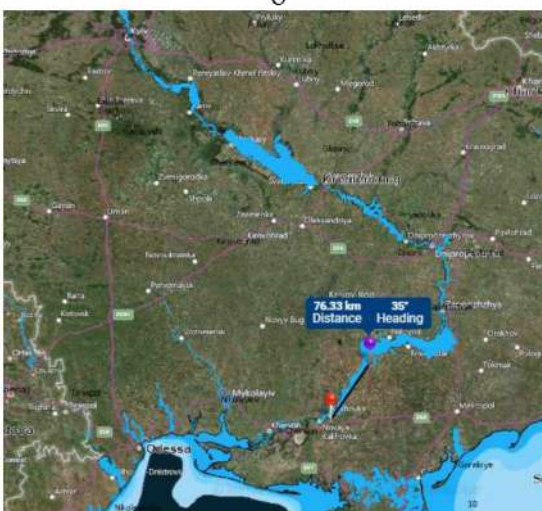
Далі за течією, напрямок русла Дніпра 4 рази різко змінюється і починає рух під кутами простягання  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $35^\circ$  і  $77^\circ$  (рис.11). Усі прямолінійні ділянки русла Дніпра мають приблизно однакову довжину 75 км, що відповідає фрактальному характеру блокової подільності твердої оболонки нашої планети.



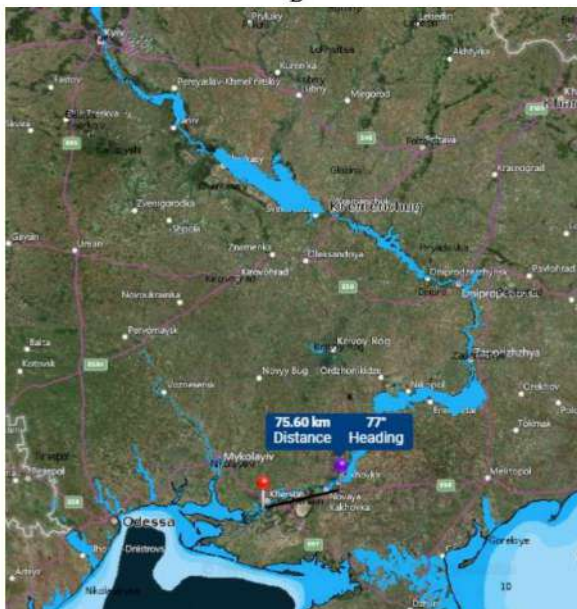
а



б



в



г

Рисунок 11 - Карта-схема ділянки русла р. Дніпро від м. Дніпро до м. Херсон (прямолінійні ділянки русла Дніпра мають приблизно однакову довжину 75 км та кути напрямку: а - 180°, б - 270°, в - 35°, г - 77°) [20].

На рис. 12 показана схема блокової подільності твердої оболонки Землі, яку «використовує» русло річки Дніпро, рухаючись у полі сили тяжіння до Чорного моря, тобто, від м. Дніпро до м. Херсон.

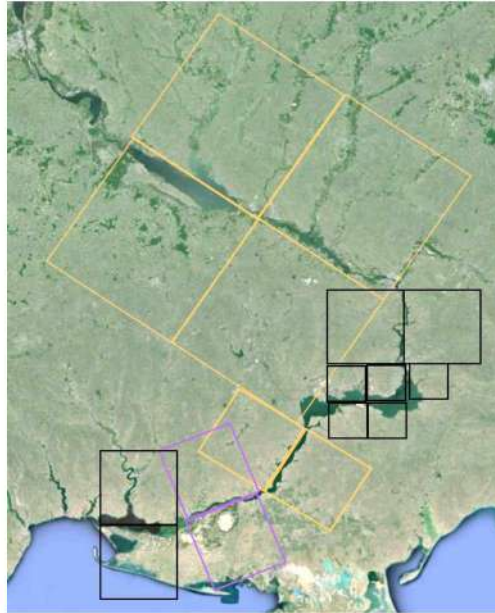


Рисунок 12 – Карта-схема блокової подільності твердої оболонки Землі, які «використовує» русло річки Дніпро від Канева до Херсону (чорний –  $0^\circ$  і  $270^\circ$ ); жовтий –  $35^\circ$  і  $305^\circ$ ; фіолетовий –  $77^\circ$  і  $347^\circ$ ).

На рис. 12 можна побачити певну закономірність. Центральна частина Українського кристалічного щита є тектонічно найменш розщільненою і складається з фрагментів базового масштабу  $140 \times 140$  км, що логічно. За таких флюїдодинамічних умов скорочення русла Дніпра у напрямку Чорного моря теоретично можливе лише від м. Кременчук за азимутом  $210^\circ$  на відстань 140 км.

На південному кордоні Українського кристалічного щита блокова подільність вдвічі більша і значно більша тектонічна розщільненість.

Головним висновком ми вважаємо наявність прояву формування блокової подільності сучасної геологічної епохи відповідно системи  $0^\circ$  і  $270^\circ$ , що проявлена на південь від м. Дніпро. Аналіз карти схеми, що наведена на рисунку 12, дає підстави для формування уяви про те, що тектонічні структури азимутом простягання  $305^\circ$  «старіші» за структури, що зорієнтовані під кутом  $77^\circ$  і  $347^\circ$ .

З метою підтвердження того, що ротаційна теорія рельєфоутворення К.Ф.Тяпкіна має глобальний характер і може бути використана для будь-якої річкової системи Землі, нами виконано районування суходолу в кордонах русла р.Ніл (рис. 13).

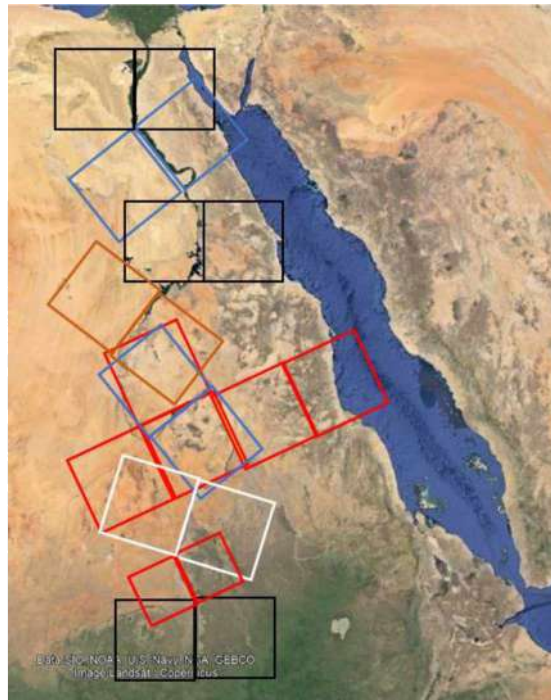


Рисунок 13 - Схема блокової подільності твердої оболонки Землі для русла Нілу: чорний – ( $0^\circ$  і  $270^\circ$ ); білий – ( $17^\circ$  і  $287^\circ$ ); коричневий – ( $35^\circ$  і  $305^\circ$ ); синій – ( $45^\circ$  і  $315^\circ$ ), червоний – ( $62^\circ$  і  $332^\circ$ ).

Річка Ніл обрана не випадково. На відміну від інших річок, ця річка немає водозбору і тому напрямок її русла формується виключно підземним живленням, яке відбувається виключно у зонах підвищеної проникності земної кори, тобто, у зонах геофлюїдодинамічних структур [9]. Слід зауважити, що карта - схема охоплює значний простір і не відповідає Меркаторській проекції, тому значення кутів є дещо штучно викривленими.

На карті-схемі показано блокову подільність твердої оболонки Землі, яку «використовує» русло найдовшої річки у світі - Нілу. Води Нілу, рухаючись у полі сили тяжіння до Середземного моря, тобто від Асуану до Александрії, 9 разів змінюють свій напрямок руху. У тектонічному плані, регіон північно-східної Африки та Аравійського півострова знаходиться в умовах формування Червономорського рифту, що простягається під кутом  $332^\circ$  (виділено червоними квадратами). Незважаючи на те, що рифтові зони є найпотужнішими, тобто мають найвищий ранг у геотектонічній класифікації, основний напрямок течії Нілу - з півдня на північ. На схемі червоними квадратами підтверджено, що у районі, де русло повертає на південний-захід (азимут  $215^\circ$ ), напрямком блокової подільності контролюється геофлюїдодинамічними процесами Червономорського рифту.

Що стосується азимуту блокової подільності ( $35^\circ$  і  $305^\circ$ ), який формує ділянку русла Дніпра, довжиною 280 км (рис. 12), то відповідно до схеми (рис. 13) цей напрямок був сформований одночасно з формуванням трансформного розлому Мертвого моря, який на схемі проявлений затокою Акаба.

На дистанції 6 тис. км Ніл 10 разів змінює напрямок, використовуючи п'ять з п'яти напрямків блокової подільності літосфери, однак зберігаючи генеральний (сучасний)  $0^\circ$  і  $270^\circ$ , відхиляючись від нього не більше, ніж на 100-200 км. Слід підкреслити, що блоковій подільності  $0^\circ$  і  $270^\circ$  строго відповідає північний, південний фрагменти, та ділянка русла перед Луксором.

Спробуємо застосувати на практиці теоретичні знання, обґрунтовані К.Ф.Тяпкіним у його «Новій ротаційній гіпотезі структуроутворення твердої оболонки нашої планети». У найближчій перспективі може стати актуальною задача забезпечення вантажоперевезень р. Дніпро з порту Генічеськ у Азовському морі. Це пов'язано з ускладненням навігації нижче Запоріжжя, що викликано наслідками підриву греблі Каховської ГЕС (рис. 14) [21].



Рисунок 14 - Карта-схема поточних змін руслових процесів на Дніпрі, пов’язаних з руйнуванням греблі Каховської ГЕС [21].

На карті-схемі (рис. 14) чітко проявлені фрагменти новоутвореного русла Дніпра, які обрали «нові» геофлюїдодинамічні структури азимутом ( $0^{\circ}$  і  $270^{\circ}$ ).

На нашу думку, зазначені проблеми ускладнення навігації можуть бути вирішені шляхом оптимізації русла з урахуванням теоретичних положень флюїдодинамічної теорії формування руслових потоків. Як було доведено, за умов сучасного положення осі обертання Землі, тектонічна подільність флюїдодинамічних структур формується відповідно до блоків, що мають орієнтацію південь-північ та захід-схід. Як альтернативу, пропонується розглянути передпроектне рішення щодо обрання русла каналу, який може з’єднати Дніпро з Азовським морем. Передпроектне рішення ґрунтується на запатентованій технології [22].

Теоретично, науково обґрунтований напрямок каналу повинен використовувати існуючі флюїдодинамічні структури, бажано «нові», тобто азимутом, що відповідає ( $0^{\circ}$  і  $270^{\circ}$ ). Ділянка русла від м. Дніпро до м. Запоріжжя проявлена і далі на південь мережею малих річок, русла яких мають орієнтацію північ-південь (рис. 15).

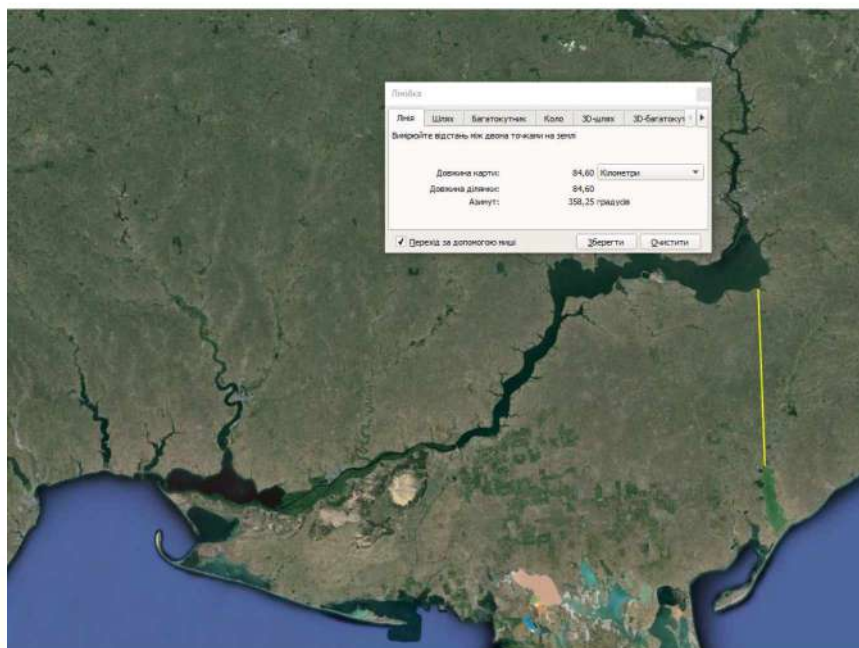


Рисунок 15 – Схема перспективного судноплавного шляху (каналу) Дніпро-Азовське море

Важливо зауважити, що цей варіант є найкоротшим і, відповідно найменш витратним. Додатково довжина судноплавного каналу скорочена на 35 км орографічними особливостями рельєфу суходолу

завдяки тому, що в межах блокової подільності на півдні фдюдодинамічної структури, що починається в районі м. Дніпро, вже сформувався лиман, зорієнтований з півночі на південь довжиною 35 км, яка відповідає масштабу блокової подільності літосфери. Перспективний судноплавний канал (логістичний шлях) може ефективно задіяти логістичні можливості, вже існуючого і захищеного від вітрів та хвиль (косою Бірючий острів), Генічеського морського торговельного порту на Азовському морі.

Підтвердженням коректності обрання напрямку прокладення судноплавного каналу є наявність на тектонічній карті розлому Сумський (№37 на рис. 16).



Рисунок 16 - Схема розташування основних розломів та розломних зон трансконтинентального лінеаментного поясу Карпінського [23].

**Висновки.** Наведені в роботі схеми районування територій, за ознакою блокової подільності твердої оболонки Землі, фактично є складовою частиною науково обгрунтованої методики прогнозування поточних змін русел річок в умовах сучасної епохи структуроутворення нашої планети. Тяпкін К.Ф. запропонував концепцію розвитку блокової подільності планети в різні геологічні епохи, що базується на ротаційній гіпотезі структуроутворення Земної поверхні [24]. Таким чином, у історичному минулому утворювалася мережа розломів різних порядків (рангів), орієнтованих у напрямку, перпендикулярному до напрямку поступального руху полюсів по поверхні Землі. Мережа розломів утворювалася за фрактальним принципом у відповідності до принципу ізостазії. Розподіл напруги завжди призводить до виникнення мережі розломів меридіонального напрямку.

Важко переоцінити теоретичні та практичні наслідки впровадження ротаційної теорії структуроутворення, яка дозволяє з єдиної геодинамічної позиції показати причинно-наслідковий зв'язок між геотектонікою та іншими процесами в тектоносфері, у тому числі з процесом руслоутворення річок, трансформації берегової смуги морів, акумулятивних форм мілководдя, природних жолобів на морському дні. Також потребує уваги вплив нерівномірності обертання Землі на ці процеси.

На сучасному науковому рівні у теорії руслових процесів домінує екзогенна гіпотеза утворення русел річок. Однак, нами були використані, як наукове підґрунтя для підвищення ефективності керування річковими транспортними шляхами, результати досліджень видатного українського вченого К.Ф. Тяпкіна. Він запропонував теорію про те, що блокова подільність Земної кори не хаотична, а характеризується декількома фіксованими просторовими орієнтаціями мереж тектонічних блоків ( $0^\circ$  і  $270^\circ$ ;  $17^\circ$  і  $287^\circ$ ;  $35^\circ$  і  $305^\circ$ ;  $45^\circ$  і  $315^\circ$ ;  $62^\circ$  і  $332^\circ$ ;  $77^\circ$  і  $347^\circ$ ) [24]. Річкові русла формуються вздовж кордонів зазначених мереж тектонічних блоків у полі сили тяжіння (з врахуванням нахилу). Тобто, штучна оптимізація русла річки має бути узгодженою з виявленими законами формування русла.

Нами досліджено вплив блокової подільності на формування дельти Дунаю, русел Дніпра та Ніла. Ротаційна теорія структуроутворення К.Ф. Тяпкіна охоплює до десятка епізодів швидкоплинних змін у структуроутворенні нашої планети. Завдяки цьому, виникла перспектива побудови науково

обґрунтованої методики прогнозування поточних змін русел річок в умовах сучасної епохи у структуроутворенні нашої планети. З цим пов'язані і перспективи підвищення ефективності днопоглиблювальних робіт під час штучної оптимізації русла річки в умовах зменшення її водності. Зазначене є впливовим фактором покращення стратегічного планування вантажоперевезення річковим транспортом.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Науменко А.В., Капочкіна М.Б. Науменко Теоретичні питання підвищення ефективності проектування підхідних та судноплавних каналів з урахуванням флюїдо-гідродинамічних процесів. Збірник тез доповідей XI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих вчених "Проблеми і перспективи розвитку транспорту". 21 квітня 2023 року, с. 106-109 URL: <https://oarp.nau.edu.ua/storage/2023/11/Prohrama-konferentsii.pdf> (дата звернення 01.01.2025).
2. VII international transport corridor. URL: <https://www.icpdr.org/sites/default/files/Olena%20PROSKURA%20Ukraine%20web%20size.pdf> (дата звернення 09.01.2025).
3. Visual Dictionary Online. URL: <https://visualdictionaryonline.com/earth/geology/watercourse.php> (дата звернення 09.01.2025).
4. Тяпкин К.Ф. Блоки земной коры с позиций новой гипотезы структурообразования. Киев: Геологический журнал, №4, 1993. С.10-20.
5. Михайлов В.И., Капочкіна А.Б., Капочкин Б.Б. Взаимодействие в системе "Литосфера - гидросфера" : Монография. Одесса : Астропринт, 2010. 154 с.
6. 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.
7. Перерва В.М., Лялько В.И., Шпак П.Ф. Новые данные о разломно-блоковой структуре северо-западного шельфа Черного моря по данным аэрокосмических исследований (в связи с нефтегазоносностью). Геологический Журнал №4, 1994. С. 78-84.
8. Войтенко С.П., Учитель И.Л., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б. Геодинамика. Основы кинематической геодезии: монография - Одесса: Астропринт, 2007. - 264 с.
9. 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>.
10. Ключева 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. К., Вид-во Київського ун-ту, 1970. Вип. 4. С. 34-39.
11. The Preston Geothermal Resources; Renewed Interest in a Known Geothermal Resource Area. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Extent-and-borders-of-the-Basin-and-Range-province-Red-dot-represents-the-location-of\\_fig7\\_273060246](https://www.researchgate.net/figure/Extent-and-borders-of-the-Basin-and-Range-province-Red-dot-represents-the-location-of_fig7_273060246) (дата звернення 09.02.2025).
12. Михайлов В. И., Дорофеев В. С., Ярошенко В. Н., Капочкин Б. Б., Кучеренко Н. В. Современные изменения уровня Черного моря как основа стратегии строительного освоения прибрежий : монография - О. : Астропринт, 2010. - 165 с.
13. Of The-World URL: <https://www.maps-of-the-world.org/maps/europe/ukraine/large-relief-map-of-ukraine.jpg> (дата звернення 10.01.2025).
14. Перерва В.М., Лялько В.И. Об эндогенной составляющей в температурной дифференциации поверхности Черного моря. Геологический журнал. 1996. №3/4. С. 123-128.
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. February 2014. 2(2), p. 43-48 DOI: <https://doi.org/10.26491/mhwm/36422>.

16. Из Дуная в Черное море по Быстрому или как-то иначе. URL: <https://topor.od.ua/ru/iz-dunaya-v-tchernoe-more-v-po-bstromu-ili-kak-to-inatche/> (дата звернення 12.12.2024).
17. Науменко А.В., Капочкіна М.Б. теорія і практика оптимізації проектування морських днопоглиблювальних робіт. Водний транспорт: Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2025. Випуск 1 (42). С. 210-226 с. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42>
18. Стале судноплавство в Україні альтернативні судноплавні шляхи в українській дельті Дунаю. URL: [https://awsassets.panda.org/downloads/sustainable\\_navigation\\_on\\_the\\_danube\\_study\\_summary.pdf](https://awsassets.panda.org/downloads/sustainable_navigation_on_the_danube_study_summary.pdf) (дата звернення 10.02.2025).
19. Фізична карта України. URL: <https://abal.com.ua/ru/fizicheskaya-karta-ukraini.html> (дата звернення 10.01.2025).
20. Планета Земля. URL: <https://www.google.com.ua/earth/> (дата звернення 15.12.2025).
21. Каховське водосховище перетворюється на річку — НАН України. URL: <https://kherson rayon.in.ua/news/611300-kakhovske-vodoskhovishche-peretvoryuetsya-na-richku-nan-ukraini> (дата звернення 15.01.2025).
22. Науменко А.В., Капочкіна М.Б., Калініченко Є.В. Спосіб визначення місця прокладання траси підхідного каналу. Патент на корисну модель від 08.01.2025 № 158155.
23. Ломакин И.Э., Покалюк В.В., Кочелаб В.В., Ломакин И.Э. Линеамент Карпинского – структурный элемент древнего регматогенного тектонолинеаментного каркаса Евразии. Геохимия техногенезу. С. 5-17. URL: <http://znp.igns.gov.ua/wp-content/uploads/2019/10/302.1-1.pdf> (дата звернення 15.01.2025).
24. Довбнич М.М., Тяпкин К.Ф. Новая ротационная гипотеза структурообразования и ее роль в развитии наук о Земле: учебник. Донецк. Издание: 2009., 339 с.

## REFERENCES

1. Naumenko A.V., Kapochkina M.B. Naumenko Theoretical issues of increasing the efficiency of designing approach and navigation channels taking into account fluid-hydrodynamic processes. Collection of abstracts of the reports of the XI All-Ukrainian scientific and practical conference of students and young scientists "Problems and prospects of transport development". April 21, 2023, pp. 106-109 URL: <https://oarp.nau.edu.ua/storage/2023/11/Prohrama-konferentsii.pdf> (access date 01.01.2025).
2. VII international transport corridor. URL: <https://www.icpdr.org/sites/default/files/Olena%20PROSKURA%20Ukraine%20web%20size.pdf> (access date 09.01.2025).
3. Visual Dictionary Online. URL: <https://visualdictionaryonline.com/earth/geology/watercourse.php> (access date 09.01.2025).
4. Тяпкин К.Ф. Blocks of the earth's crust from the standpoint of the new hypothesis of structural formation. Kyiv: Geological Journal, No. 4, 1993. P.10-20.
5. Mykhailov V.Y., Kapochkina A.B., Kapochkin B.B. Interaction in the system "Lithosphere - Hydrosphere": Monograph. Odesa: Astroprint, 2010. 154 с.
6. Gladkikh I.I., Kapochkina M.B., Kucherenko N.V. Kapochkin B.B. A new paradigm of the formation of accumulative relief of shallow-water 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.
7. Pererva V.M., Lyalko V.I., Shpak P.F. New data on the fault-block structure of the north-western shelf of the Black Sea according to the data of aerospace studies (in connection with oil and gas capacity). Geological Journal No. 4, 1994. P. 78-84.
8. Voitenko S.P., Uchitel I.L., Yaroshenko V.N., Kapochkin B.B. Geodynamics. Fundamentals of kinematic geodesy: monograph - Odesa: Astroprint, 2007. 264 p.

9. 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>.
10. 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*. K., Kyiv University Publishing House, 1970. Issue 4. Pp. 34-39.
11. The Preston Geothermal Resources; Renewed Interest in a Known Geothermal Resource Area. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Extent-and-borders-of-the-Basin-and-Range-Province-Red-dot-represents-the-location-of\\_fig7\\_273060246](https://www.researchgate.net/figure/Extent-and-borders-of-the-Basin-and-Range-Province-Red-dot-represents-the-location-of_fig7_273060246) (access date 09.02.2025).
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 - O.: Astroprint, 2010. - 165 p.
13. Of The-World URL: <https://www.maps-of-the-world.org/maps/europe/ukraine/large-relief-map-of-ukraine.jpg> (access date 10.01.2025).
14. Pererva V.M., Lyalko V.I. On the endogenous component in the temperature differentiation of the Black Sea surface. *Geological journal*. 1996. №3/4. P. 123-128.
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*. February 2014. 2(2), p. 43-48 DOI: <https://doi.org/10.26491/mhwm/36422>.
16. From the Danube to the Black Sea via the Bystroy or some other way. URL: <https://topor.od.ua/ru/iz-dunaya-v-tchernoe-more-v-po-bstromu-ili-kak-to-inatche/> (access date 12.12.2024).
17. Naumenko A.V., Kapochkina M.B. Theory and practice of optimization of marine dredging design. *Water transport. Collection of scientific papers of the State University of Infrastructure and Technologies*. – K.: DUIT, 2025. Issue 1 (42). P. 210-226 <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42>
18. Sustainable Navigation in Ukraine: Alternative Navigation Routes in the Ukrainian Danube Delta. URL: [https://awsassets.panda.org/downloads/sustainable\\_navigation\\_on\\_the\\_danube\\_\\_study\\_summary\\_.pdf](https://awsassets.panda.org/downloads/sustainable_navigation_on_the_danube__study_summary_.pdf) (access date 10.02.2025).
19. Physical map of Ukraine. URL: <https://abal.com.ua/ru/fizicheskaya-karta-ukraini.html> (access date 10.01.2025).
20. Planet Earth. URL: <https://www.google.com.ua/earth/> (access date 12.15.2025).
21. Kakhovske reservoir turns into a river — NAS of Ukraine. URL: <https://kherson.rayon.in.ua/news/611300-kakhovske-vodoskhovishche-peretvoryuetsya-na-richku-nan-ukraini> (access date 15.01.2025).
22. Naumenko A.V., Kapochkina M.B., Kalinichenko E.V. A method for determining the location of laying the route leading to the canal. Patent for the corysna model dated 01/08/2025 No. 158155.
23. Lomakin I.E., Pokalyuk V.V., Kochelab V.V., Lomakin I.E. Karpinsky Lineament – a structural element of the ancient regmatogenous tectonic-lineament framework of Eurasia. *Geochemistry of technogenesis*. pp. 5-17. URL: <http://znp.igns.gov.ua/wp-content/uploads/2019/10/302.1-1.pdf> (access date 15.01.2025).
24. Dovbnich M.M., Tyapkin K.F. New rotational hypothesis of structure formation and its role in the development of Earth sciences: textbook. Donetsk. Edition., 2009., 339 p.

*Naumenko A.V., Kapochkina M.B.*

## **THEORY AND PRACTICE OF OPTIMIZATION OF DESIGN OF DREDGING ROBOTS IN THE CHANNELS OF THE RIVER**

*Optimization of dredging design in river beds is achieved by harmonizing with the physical laws of bed formation. It is well known that river beds are formed under the influence of gravity, i.e. in accordance with the slope of the earth's surface. It was also taken into account that natural river beds are laid along the boundaries of tectonic blocks, so we investigated the influence of the block divisibility of the Earth's solid shell on the formation of bed processes. The basic principles of the block structure of the lithosphere were determined within the framework of the rotational theory of structure formation, developed by K.F. Tyapkin. This theory covers up to a dozen episodes of rapid changes in the process of structure formation of our planet, according to which networks of block divisibility of the lithosphere were formed. Due to this, prospects have arisen for increasing the efficiency of dredging during artificial optimization of the river bed. The practical application of theoretical knowledge regarding natural channel formation processes is an influential factor in improving the planning strategy for freight transportation by river transport.*

**Keywords:** *river transport corridors, navigation safety, dredging, channel formation processes, geomorphology, rotational theory of structure formation, maritime navigation.*

*Стаття прийнята 15.03.2025*

© Гусак І. Л., Боріна М. В.

## МЕТОД ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ РУХУ СУДНА

Метою даної роботи є необхідність розроблення методу формування моделей руху судна, а також принципів управління спеціальним математичним і програмним забезпеченням рухом судна в різних умовах. Поставлена мета досягається шляхом визначення основних функцій та особливостей варіантів побудови вимірювального комплексу, виявлення, опису і перетворення первинної (вихідної) інформації вимірювального комплексу як параметрів вектору стану судна і вектору, що визначає зовнішні впливи, для вибору поточної моделі руху судна і перевірки ступеня унікальності поточного режиму руху і необхідності його запису в базу варіантів стану судна. Найсуттєвішим результатом є розробка методу формування моделей руху судна, структурованого за його станами та умовами плавання, вимірними під час рейсів. Запропоновані підходи дозволяють підвищити безпеку судноплавства під час експлуатації на річках.

**Ключові слова:** судно, судноводіння, безпека судноплавства, безпека судноводіння, система управління рухом, система керування судном, модель руху судна, база даних, параметри моделі, стан судна, прийняття рішень, морський транспорт, внутрішній водний транспорт.

**Вступ.** Забезпечення безпеки плавання у внутрішніх водах є одним із найактуальніших і найскладніших завдань сучасного судноводіння. Складність завдання зумовлена його багатофакторністю, а актуальність – важкими наслідками аварійних випадків. Найнебезпечнішими для плавання вважаються обмежені акваторії річок [1], на які припадає найбільша кількість аварійних випадків, що мали місце. Під час плавання в цих акваторіях керування судном, як правило, здійснюється в ручному режимі, завдяки чому його результати виявляються значною мірою залежними від людини, її кваліфікації, досвіду та інформованості [2, 3].

Для підвищення безпеки руху у внутрішніх водах вже стало не тільки необхідним, але й нормою впровадження на судах електронних картографічних навігаційно-інформаційних систем (ЕКНІС) [4]. Дані системи суттєво розвантажують судноводія від рутинної роботи, пов'язаної з розв'язуванням формальних навігаційних задач, розширюють склад його інформаційної бази, полегшують доступ до необхідної інформації та у разі її наявності надають її у зручному для оцінювання ситуації вигляді. Усе це сприяє концентрації зусиль судноводіїв безпосередньо на оцінці поточної ситуації та прийнятті рішень щодо управління судном.

Успішне впровадження ЕКНІС можливе за умови розроблення методів автоматизованого розроблення підходів до обробки інформації про стан судна і даних про навколишнє оточення.

Формування моделі може здійснюватися безпосередньо перед її використанням [10, 11, 12]. Однак під час плавання в обмежених акваторіях це здійснити практично складно через те, що для ідентифікації параметрів потрібен досить великий обсяг вихідної інформації, який складно сформувати в обмежених часових і просторових рамках. Використання судна на внутрішніх водах, зокрема на р. Дніпро дозволяє провести попереднє формування необхідної бази даних (БД), використовуючи яку можна синтезувати оптимальну модель без додаткових вимірювань. Цю базу можна формувати на підставі наявних БД, лоцій, навігаційної та гідрографічної інформації, а також постійного автоматичного моніторингу параметрів руху судна та умов плавання у процесі виконання звичайних рейсів й обробки отриманих даних за спеціально розробленими алгоритмами.

Зазначений підхід скоротить час, що витрачається на формування самої моделі, практично до нуля і повністю виключить необхідність виконання додаткових маневрів для збирання даних під час плавання в обмежених акваторіях. Однак цілісної методики, що охоплює і процес формування баз вихідних даних,

і синтез моделі, використовуючи ці дані, наразі не існує. Це визначає необхідність проведених досліджень і дозволяє сформулювати актуальне наукове завдання з розробки методів і моделей підвищення безпеки руху судна під час плавання у внутрішніх водах на основі прогнозованої інформації стану об'єкта управління та зовнішньої обстановки.

**Метою** дослідження є необхідність розроблення методу формування моделей руху судна, а також принципів управління спеціальним математичним і програмним забезпеченням рухом судна в різних умовах.

#### **Основна частина.**

Розробку методу побудови моделі руху судна почнемо з розроблення та визначення основних функцій вимірювального комплексу (ВК).

Вимірювальний комплекс є джерелом первинної (вихідної) інформації, а також забезпечує формування параметрів вектора  $X$  [13] стану судна і вектора  $W$ , що визначає зовнішні впливи, зумовлені його умовами плавання. За необхідності до ВК можуть бути додані функції, пов'язані з перетворенням зазначених параметрів до вигляду, зручного для їх подальшого використання. Отримані параметри використовуються для вибору поточної моделі руху судна, а також для перевірки ступеня унікальності поточного режиму руху і необхідності його запису в базу варіантів стану судна.

Розглядаються два варіанти ВК. Один призначений для використання на судні для прогнозування його руху, інший – для налагодження системи і наукового моделювання процесів плавання в стаціонарних умовах. У своїй основі ці комплекси збігаються, а їхня відмінність зумовлена, в основному, можливістю отримання початкової інформації. У суднових умовах інформація про поточний стан судна надходить від відповідних бортових вимірювачів параметрів руху судна, у процесі наукового моделювання – від формувачів вихідних даних. Тому в останньому випадку до складу ВК будуть входити зазначені формувачі.

Поточний стан судна визначатимемо такими основними параметрами, значення яких використовуються за будь-якого підходу до формування моделі судна:

$V_x, V_y, \dot{V}_x, \dot{V}_y$  – складові лінійної швидкості та прискорення за осями, пов'язаними із судном;

$\omega_z, \dot{\omega}_z$  – кутова швидкість і прискорення повороту судна;

$n$  – число обертів гвинта;

$\beta$  – кут перекладки керма.

У свою чергу, для характеристики умов плавання використовуються:

$H$  – глибина під кілем судна;

$T$  – осадка судна;

$V_k$  – швидкість уявного вітру;

$K_{вет}$  – курсовий кут удаваного вітру;

$\alpha_B$  – кут хвильового схилу;

$K_B$  – кут набігу хвилі.

З огляду на те, що під час виконання конкретного переходу осадка судна  $T$  залишається практично постійною, під час моделювання на вхід ВК часто зручніше подавати відношення  $H/T$  поточної глибини до осадки.

У реальних умовах плавання інформація про перелічені вище параметри надходить від відповідних вимірювачів у вигляді їхніх миттєвих значень або значень, осереднених на відносно невеликих часових інтервалах. Унаслідок цього інформація може містити досить велику випадкову складову вимірюваного параметра (заваду), яка породжуватиме випадкові варіації значень ідентифікованих параметрів, що може зумовити невиправдані операції зі зміни моделі та, тим самим, надмірно завантажувати систему практично марними операціями. Для запобігання цьому явищу вихідна інформація вимірювального блоку має ґрунтуватися на систематичних складових (математичних сподіваннях) вимірюваних параметрів, що можуть бути отримані шляхом усереднення достатньої кількості даних кожного з первинних джерел інформації, отриманих через певні проміжки часу в рамках ситуації руху судна, що розглядається. Необхідна кількість усереднених параметрів і

дискретність отримання їхніх миттєвих значень визначається характером і умовами руху судна. У суднових системах операції усереднення можуть виконуватися вимірювальним комплексом.

Формування бази вихідних даних здійснюється модулем вихідних даних, використовуючи виміряні значення вектора  $X$  стану судна і керівних органів, а також вектора  $W$  умов плавання.

Значення зазначених параметрів надходять у модуль із вимірювального комплексу у вигляді результатів деякого  $i$ -го вимірювання оброблених параметрів. Відбір інформації, що записується, здійснює блок оцінювання новизни стану. Зазначені вимірювання проводяться дискретно з інтервалом  $\Delta t$ , величина якого залежить від інерційних характеристик судна. У загальному випадку база вихідних даних дозволить формувати як структуру моделі судна, що відповідає режиму його плавання, так і оцінку параметрів синтезованої структури. Із цієї метою в автоматичному режимі мають виконуватися такі операції:

- визначення моменту формування нової команди, що керує режимом руху судна, або змін умов плавання, внаслідок чого виникає новий його стан;
- визначення режиму руху судна відповідно до прийнятих параметрів кластеризації режимів;
- запис на відрізьку часу, що перевищує час перехідного процесу, закону зміни параметрів стану судна та умов його плавання;
- порівняння отриманих даних з уже наявними в базі;
- запис отриманих даних у базу, якщо вони несуть нову інформацію.

Під час вирішення першого завдання особливу увагу слід приділити фільтрації випадкових відхилень параметрів, що реєструються, які не пов'язані зі зміною режиму плавання або його умов. До них можна віднести короточасні незначні переключення керма з метою утримання судна на заданій траєкторії, короточасні зміни параметрів вітру тощо. Параметри відповідних фільтрів можуть бути синтезовані й уточнені шляхом використання даних формованої бази.

Перехід судна в новий стан слід розглядати як два самостійні процеси: безпосередньо перехідний відрізок часу і плавання в новому стані. Аналіз параметрів, записаних протягом перехідного процесу з одного стійкого стану судна в інший, дає змогу визначити або уточнити структуру й динамічні параметри моделі судна.

Створювана база вихідних даних структурується відповідно до поточних станів судна й умов його плавання. Запропонований підхід може бути реалізовано з використанням агентного підходу. За його допомогою можливо структурувати процес оброблення даних і провести декомпозицію комплексу накопичення і структурування вихідних даних.

Усю область  $R$  визначення вектора  $X$  розбивають на кінцеву кількість підобластей  $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )  $r_i \in R$ , кожній з яких відповідає певна структура моделі. Аналізатор режиму руху судна співвідносить поточний режим  $X$ , що надходить із вимірювального комплексу, з одним із  $m$  можливих режимів, у межах яких структура моделі вважається незмінною, і вибирає його як кластер для запису поточних умов плавання.

Основою для диференціації режимів руху судна і розбиття області  $R$  на кластери, у межах яких структури моделей залишаються незмінними, можуть стати параметри роботи гвинто-кермового комплексу, що визначають характер обтікання корпусу судна і, як наслідок, значення гідродинамічних сил і моментів, що діють на нього.

З огляду на сказане, виділимо із загального випадку руху судна такі режими плавання:

- стаціонарний (за відсутності маневру) рух судна;
- маневр швидкістю:
  - режим гальмування при швидкості обертання гвинта  $n \geq 0$ ;
  - режим гальмування при  $n \leq 0$ ;
  - розгін уперед;
  - розгін назад;
- маневр курсом:
  - при  $n \geq 0$ ;
  - при  $n \leq 0$ ;
- маневр швидкістю і курсом:

при  $n \geq 0$ ;

$S$  за умови  $n < 0$ .

Зазначену селекцію можна здійснити, аналізуючи поточні значення п'яти параметрів вектора стану судна: числа  $n$  обертів гвинта, кута  $\beta$  перекладки керма, відносної швидкості судна  $V$  (або її поздовжньої складової  $V_x$ ), прискорення  $\dot{V}_x$  і кутової швидкості  $\omega_z$  повороту судна. Значення зазначених параметрів, співвіднесені визначеним ними підобластям можливих станів судна, наведено в таблиці 1. Як випливає з наведеної таблиці, під час аналізу стану судна враховується напрямок тяги гвинта ( $n > 0$  забезпечує рух судна вперед) і стабільність його обертів. За наявності гвинта регульованого кроку стабільність його обертів замінюється оцінкою стабільності положення його лопатей. Решта параметрів, що розглядаються, також оцінюються трьома факторами – вони більші за нуль, дорівнюють нулю або менші за нуль. Таким чином, код поточного режиму руху судна може являти собою сукупність однієї з трьох ознак п'яти розглянутих параметрів.

Таблиця 1 – Значення параметрів стану судна і визначені ними режими плавання

| Значення параметрів   | Режим плавання  |
|---|---|
| $n > 0, V > 0, \dot{V}_x = \omega_z = \beta = 0$                        | Стаціонарний рух судна вперед   |
| $n > 0, V < 0, \dot{V}_x = \omega_z = \beta = 0$                        | Стаціонарний рух судна назад  |
| $n \geq 0, V > 0, \dot{V}_x < 0, \omega_z = \beta = 0$                  | Маневр швидкістю.<br>Гальмування при $n \geq 0$                       |
| $n < 0, V > 0, \dot{V}_x < 0, \omega_z = \beta = 0$                     | Маневр швидкістю.<br>Гальмування при $n < 0$                          |
| $n > 0, V > 0, \dot{V}_x > 0, \omega_z = \beta = 0$                     | Маневр швидкістю. Розгін уперед                                       |
| $n < 0, V < 0, \dot{V}_x < 0, \omega_z = \beta = 0$                     | Маневр швидкістю. Розгін назад  |
| $n \geq 0 = const, V > 0, \dot{V}_x < 0, \omega_z \neq 0, \beta \neq 0$ | Маневр курсом при $n \geq 0$  |
| $n < 0 = const, V < 0, \dot{V}_x < 0, \omega_z \neq 0, \beta \neq 0$    | Маневр курсом при $n < 0$   |
| $n > 0, V > 0, \dot{V}_x > 0, \omega_z \neq 0, \beta \neq 0$            | Маневр швидкістю і курсом при $n < 0$ . Розгін з поворотом            |
| $n \geq 0, V > 0, \dot{V}_x < 0, \omega_z \neq 0, \beta \neq 0$         | Маневр швидкістю і курсом при $n \geq 0$ .<br>Гальмування з поворотом |
| $n < 0, V < 0, \dot{V}_x < 0, \omega_z \neq 0, \beta \neq 0$            | Маневр швидкістю і курсом при $n < 0$ . Розгін назад з поворотом      |
| $n < 0, V > 0, \dot{V}_x < 0, \omega_z \neq 0, \beta \neq 0$            | Маневр швидкістю і курсом при $n < 0$ .<br>Гальмування з поворотом    |

Так, наприклад, якщо ознака 0 означає нульове значення розглянутих параметрів, ознака 1 – значення параметрів менші за нуль, а ознака 2 – значення параметрів більші за нуль, і порядок слідування ознак  $n, V, \dot{V}_x, \omega_z, \beta$ , то маневр курсом у бік правого борту можна представити таким кодом: 02122. Слід зазначити, що для розв'язання поставленої задачі аналіз параметра  $\beta$  можна не проводити тому, що відсутність або наявність маневру курсом і напрямок цього маневру визначається кутовою швидкістю  $\omega_z$ . Однак у процесі ідентифікації параметрів моделі може виявитися, що вони значною мірою залежать від положення керма і тоді врахування цього параметра буде доречним.

Аналізатор режиму руху судна використовується як у процесі формування бази вихідних даних, так і у процесі вибору моделі з бібліотеки базових структур.

Оцінку ступеня впливу умов плавання на рух судна здійснюватимемо, використовуючи положення теорії нечітких множин. Використання методології нечітких систем передбачає необхідність виконання трьох операцій:

– фазифікації – переведення чисельних значень використовуваних параметрів у лінгвістичні змінні,

- виконання з лінгвістичними змінними необхідних операцій;
- дефазифікації – переведення результатів проведених операцій із лінгвістичної форми в чисельну.

Для оцінювання впливу аеродинамічних навантажень на рух судна і, як наслідок, на параметри його моделі визначимо функції приналежності (ФП) лінгвістичних змінних "швидкість вітру", "курсний кут вітру" і "рівень аеродинамічного впливу", а також сформуємо структуру блоку оцінювання аеродинамічних впливів.

Поняття "швидкість вітру" визначатимемо трьома лінгвістичними категоріями (термами): "низька" або вітер "слабкий", "середня" або вітер "середній" і "висока" або вітер "сильний". Чітку зону (ядро) ФП  $\mu(V_k)$  (коли її значення дорівнює одиниці) категорії "слабкий" вітер визначимо діапазоном швидкостей від 0 до  $V_{1k}$  м/с. Нечітку область ФП (в якій  $0 \leq \mu(V_k) \leq 1$ ), укладену між чіткими зонами термів "слабкий" вітер і "середній" вітер, обмежимо швидкостями  $V_{1k}$  і  $V_{2k}$ . Чітку область для середньої швидкості вітру визначимо значеннями  $V_{2k}$  і  $V_{3k}$ , а наступну нечітку область – швидкостями  $V_{3k}$  і  $V_{4k}$ .

Кількісні значення зазначених швидкостей можуть бути різними для різних суден, а їхні оцінки, як правило, формують шляхом опитування експертів, які добре знають поведінку цього судна в умовах плавання, що розглядаються, або шляхом опрацювання даних, записаних у базі варіантів станів судна у процесі його плавання за відомими методиками [5, 7], розробленими стосовно нечітких систем, або інших фактичних даних, які дають змогу розв'язати завдання, що розглядається. У цілій низці випадків згадані значення швидкостей можуть бути обрані з нижченаведених міркувань.

Відомо, що аеродинамічний тиск на поверхню судна за незмінного напрямку відносного вітру приблизно пропорційний квадрату швидкості вітру. За цих умов графік залежності відносного тиску  $P/P_{max}$ , де  $P$  – поточне значення тиску, відповідне до швидкості  $V_k$  удаваного вітру, що має місце,  $P_{max}$  – максимальне значення тиску, відповідне до максимально можливої відносної швидкості вітру для судна даного класу в умовах плавання, що розглядаються, від відношення швидкостей  $V_k/V_{max}$  матиме вигляд, наведений на рис. 2. Відповідно до прийнятих термів, що визначають швидкість вітру, весь діапазон відносних тисків також розіб'ємо на три зони, кожна з яких визначається відповідною характеристикою вітру. При вважаємо, що діапазон зміни відносних тисків у кожній зоні має бути однаковим і дорівнювати одній третині загального діапазону. За цих умов нечіткі межі, що розділяють зони, мають проходити близько 0,33 і 0,66.

Відповідні їм нечіткі межі, що розділяють вітер «слабкий» від «середнього» і вітер «середній» від «сильного», мають відповідати визначенням "близько 0,57" і "близько 0,82", відповідно. Ширину нечітких зон можна обумовити у відсотковому відношенні від значень нечітких меж, що розділяють зони відносних тисків. На рис. 2 нижня і верхня межі нечітких зон були відхилені від нечіткого значення межі (червоні лінії), що розділяє відповідні зони, на 20%. У цих умовах згадані вище граничні величини швидкостей матимуть такі значення:  $V_{1k} = 0,57V_{kmax}$ ,  $V_{2k} = 0,62V_{kmax}$ ,  $V_{3k} = 0,73V_{kmax}$ ,  $V_{4k} = 0,9V_{kmax}$ .

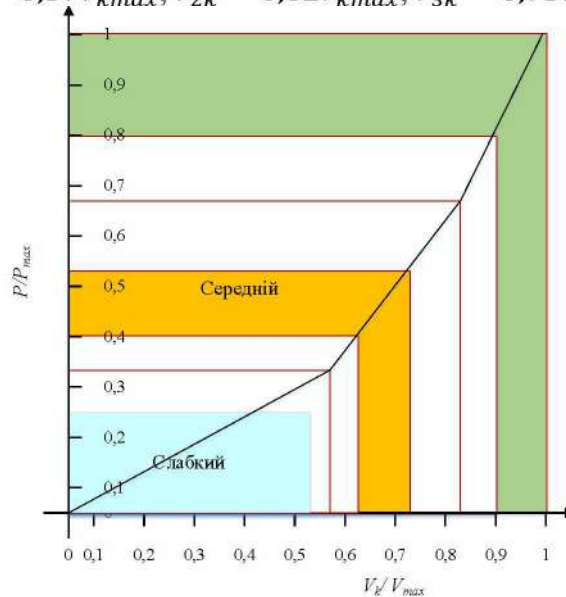


Рисунок 2 – Графік залежності відносного тиску  $P/P_{max}$  від відношення швидкостей  $V_k/V_{max}$

Закон зміни відносного тиску від швидкості уявного вітру в межах нечітких зон досить близький до лінійного, що дає змогу подати шукані ФП у вигляді LR-інтервалів так, як це показано на рис. 3.

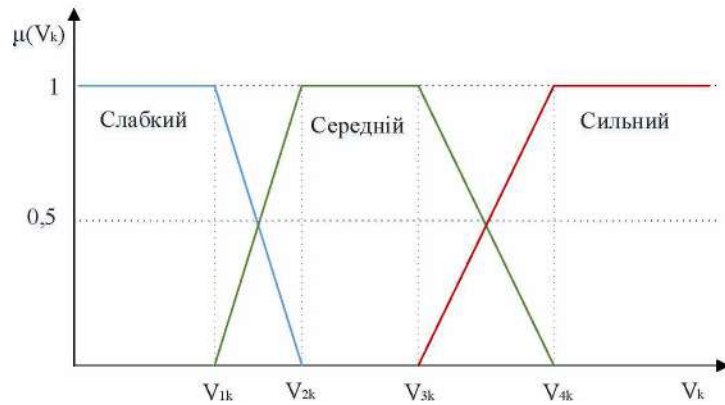


Рисунок 3 – Функції приналежності термів, що визначають швидкість вітру

Таким чином, визначено підходи для формування ФП, що характеризують швидкість (силу) уявного вітру.

Діапазон зміни курсових кутів (КУ) вітру розіб'ємо на зони (рис. 4) і будемо представляти такими логічними змінними: "Зона 1", "Зона 2", "Зона 3", "Зона 4", "Зона 5". Як і раніше, значення курсових кутів у нечітких зонах можна віднести до будь-якої суміжної чіткої зони.

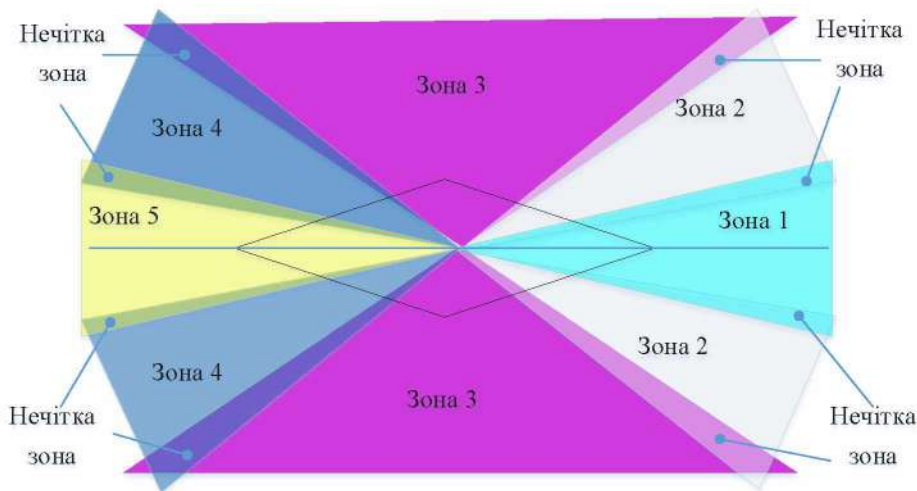


Рисунок 4 – Орієнтація кутів вітру відносно корпусу судна

На рис. 5 показано залежність зміни значень курсового кута відносного вітру, за якого має місце його максимальний вплив на рух судна. Мінімальне значення  $f_a$  має місце за попутного або зустрічного відносного вітру.

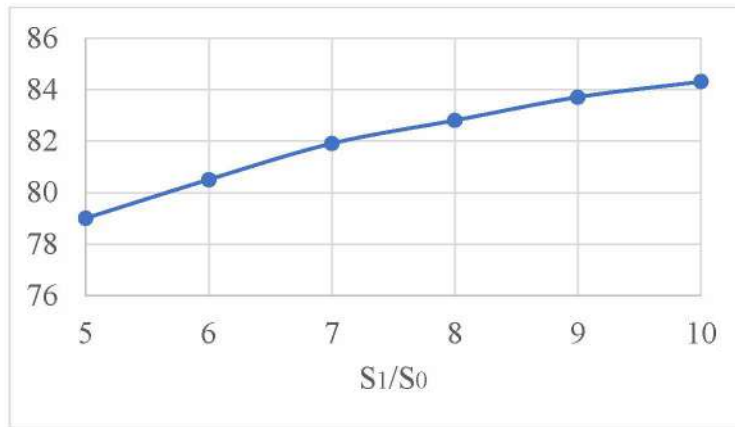


Рисунок 5 – Залежність зміни значень курсового кута відносного вітру, за якого є його максимальний вплив на рух судна

За зазначених умов для кожного борту матимуть місце такі розміри зон: Зона 1 –  $\pm 17^\circ$  симетрично щодо діаметральної площини судна, Зона 2 –  $20^\circ$ , Зона 3 –  $106^\circ$ , Зона 4 –  $20^\circ$ , Зона 5 –  $17^\circ$ . На рис. 2.11 представлено геометричну інтерпретацію ширини зон у діапазоні зміни курсових кутів від 0 до 90 градусів за прийнятих їхніх граничних умов.

Виходячи з отриманих результатів, представлено метод формування і вибору моделі руху судна, наведений на рисунку 6.

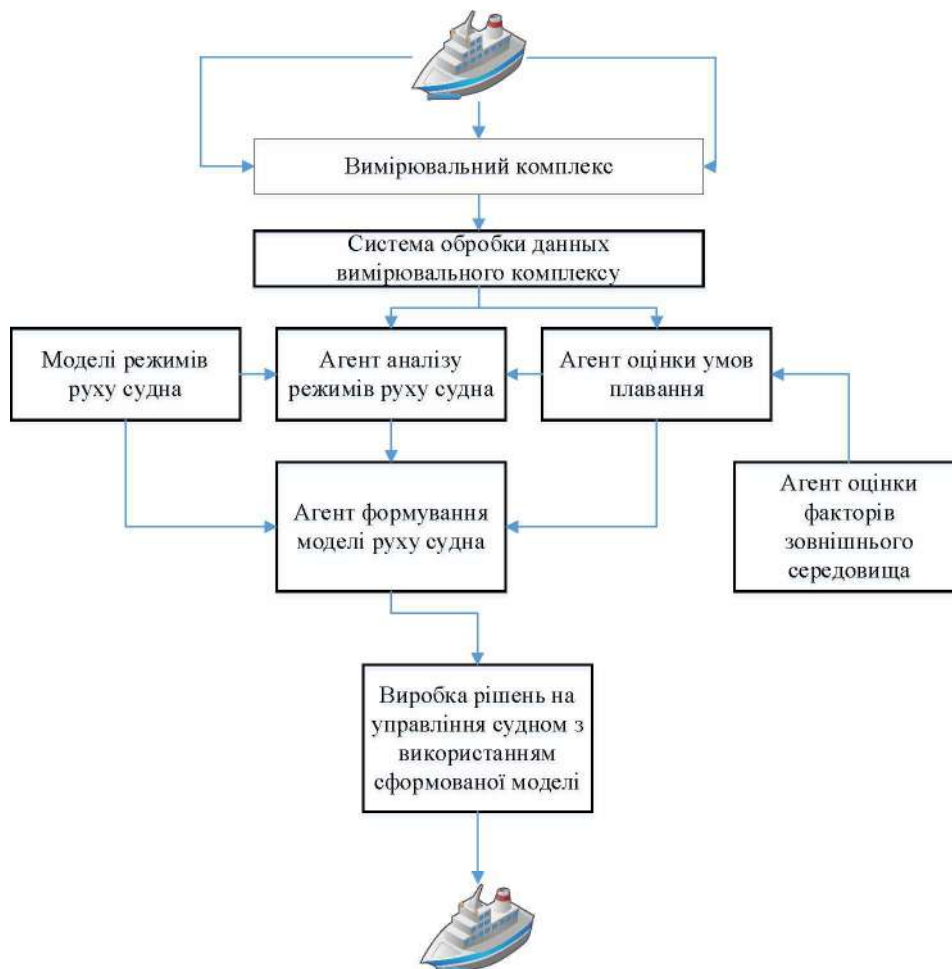


Рисунок 6 – Структура методу формування і вибору моделі управління рухом судна на основі аналізу початкових даних

**Висновки.** Для врахування умов плавання, які використовуються як під час формування бібліотек вихідних даних, так і під час вибору необхідної моделі руху судна, розроблено методику оцінювання ступеня впливу аеродинамічних впливів на рух судна, відмітною особливістю якої стало використання положень теорії нечітких множин, що дало змогу практично виключити необхідність оцінювання різних коефіцієнтів, які визначають якість розв'язання завдань, використовуючи натомість експертні знання та логічні правила, сформовані на основі цих знань.

### Список використаних джерел

1. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. Звіт про аварійність на морському та річковому транспорті за квітень 2024 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/zvit\\_avariynosti\\_4\\_2024.pdf](https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/zvit_avariynosti_4_2024.pdf) (дата звернення: 12.03.2025).
2. Позолотін Л.А., Торський В.Г., Любченко В.І. Система управління безпекою судна – Одеса: Астропринт, 2007. – 288 с.
3. Топалов В. П. Риски в судоходстве / В. П. Топалов, В. Г. Торский. — Одесса: Астропринт, 2007. — 368 с.
4. Kristiansen S. Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis / S. Kristiansen. — Elsevier, 2010. — 508 p.
5. Harel, D. Dynamic logic / D. Harel, D. Kozen, J. Tiuryn // SIGACT News. — 2001. — Vol. 32, no. 1. — Pp. 66–69.
6. Janssen, G. Design of a pointerless BDD package // Proc. IEEE 10th International Workshop on Logic & Synthesis. — Tahoe City (USA): 2001. — June. 247
7. Borgo, S. Coalitions in action logic // Proc. Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence. — Hyderabad (India): 2007. — January. — Pp. 1822–1827.
8. Badler N.I., Reich B.D., Webber B.L. Towards personalities for animated agents with reactive and planning behaviors // Creating Personalities for Synthetic Actors: Towards Autonomous Personality Agents. — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. — С. 43–57. — ISBN 978-3- 540-68501-2.
9. Baeten, J. C. M. A brief history of process algebra / J. C. M. Baeten // Theor. Comput. Sci. — 2005. — Vol. 335, no. 2-3. — Pp. 131–146.
10. Baier, C. Approximate symbolic model checking of continuous-time markov chains // Proc. 10th International Conference on Concurrency Theory. — London (UK): Springer-Verlag, 1999. — Pp. 146–161.
11. Beer R.D., Gallagher J.C. Evolving dynamical neural networks for adaptive behavior // Adaptive behavior. — 1992. — Т. 1, № 1. — С. 91–122.
12. Bel-Enguix G., Jimenez-Lopez M.D. Agent-environment Interaction in a Multiagent System: A Formal Model // Proceedings of the 9th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation. — London, United Kingdom : ACM, 2007. - С. 2607-2612. - (GECCO '07). — ISBN 978-1- 59593-698-1. 107.
13. Замана А. А., Гусак І. Л. Методика визначення критеріїв безпечної швидкості суден при експлуатації суден внутрішнім водним транспортом // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2023. – № 4 (74). – С. 34–42.

*Gusak I. L., Borina M. V.*

## **METHOD OF FORMATION OF SHIP MOTION MODELS**

*The purpose of this work is the need to develop a method for forming vessel motion models, as well as principles for controlling vessel motion in various conditions using special mathematical and software. The goal is achieved by determining the main functions and features of the options for constructing a measuring complex, identifying, describing and transforming the primary (initial) information of the measuring complex as parameters of the vessel state vector and the vector that determines external influences, for selecting the current vessel motion model and checking the degree of uniqueness of the current motion mode and the need to record it in the database of vessel state variants. The most significant result is the development of a method for forming vessel motion models, structured according to its states and sailing conditions measured during voyages. The proposed approaches allow to increase the safety of navigation during operation on rivers.*

**Keywords:** *vessel, navigation, navigation safety, navigation safety, traffic control system, vessel control system, vessel motion model, database, model parameters, vessel state, decision-making, maritime transport, inland waterway transport.*

*Стаття прийнята 20.03.2025*

© Томчаковський Г.Г., Капочкіна М.Б.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН МУСОННОГО ВІТРУ НАД ІНДООКЕАНСЬКОЮ АНОМАЛІЄЮ СИЛИ ТЯЖІННЯ

Тропічна зона Світового океану характеризується практичною відсутністю просторово часових змін інсоляції і, відповідно, відсутністю сезонів, відсутністю баричних градієнтів, а значить, геострофічних вітрів, що створює сприятливі для судноплавства погодно-кліматичні умови. Виключенням є акваторія північної частини Індійського океану з мусонним кліматом, де щороку формується літній сезон з потужними вітрами і хвилями та зливами. Забезпечення безпеки мореплавства в регіонах з мусонним типом клімату вимагає визначення причин мусонних вітрів для подальшої розробки чисельних прогнозів несприятливих погодних умов. Проаналізовано причини щорічного припинення пасатної циркуляції у Індійському регіоні. На чисельному рівні перевірена гіпотеза впливу на мусонний клімат Індійського регіону позитивної аномалії прискорення вільного падіння, що виникає у червні-серпні за умов збільшення кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі.

**Ключові слова:** безпека судноплавства, навігаційна гідрометеорологія, мусонний клімат, гравіметрія, ротаційний ефект, фізико-статистичне моделювання.

**Вступ.** Тропічна зона Світового океану характеризується практичною відсутністю просторово часових змін інсоляції, тобто, відсутністю сезонів, відсутністю баричних градієнтів і, відповідно, геострофічних вітрів, що створює сприятливі для судноплавства погодно-кліматичні умови. Виключенням є акваторія північної частини Індійського океану з мусонним кліматом, де щороку формується літній сезон з потужними вітрами, хвилями, зливами.

У тропічній зоні Світового океану існує небезпека тропічних циклонів. Виключенням є, знову ж таки, акваторія північної частини Індійського океану, де з червня до вересня, незважаючи на екстремально високу температуру морської поверхні, тропічні циклони не генеруються. Причиною цієї «приємної» для судноплавства аномалії вважаються мусонні вітри, що формують вертикальний зсув швидкості вітру, який не сприяє утворенню вихрових депресій, як початкової фази тропічного циклону [1].

Забезпечення безпеки мореплавства в регіонах з мусонним типом клімату вимагає визначення причин мусонних вітрів, тобто, розуміння фізичної суті цього явища для подальшої розробки чисельних прогнозів несприятливих погодних умов.

**Стан вивченості проблеми.** Протягом тривалого часу існують термічна [2-5], динамічна гіпотези [6] мусонної циркуляції, але жодна з зазначених гіпотез самостійно не може обґрунтувати природу мусонних вітрів. В монографії [7] узагальнено сучасні уявлення про тропічний мусон Індійського регіону.

Окремо розвивається нова гіпотеза формування мусонів під впливом просторово-часової мінливості гравітаційного поля Землі. Стартовим науковим дослідженням у цьому напрямі слід вважати публікацію [8], в якій вперше теоретично обґрунтовано можливість формування вертикальних рухів повітря в атмосфері під впливом зміни прискорення вільного падіння ( $\Delta g$ ). Назва публікації “Про реакцію атмосфери на локальні зміни густини мантії Землі” повною мірою збігається із темою нашого дослідження. Цитована наукова робота [8] підвела необхідний науковий фундамент під відкриття раніше невідомого природного явища (відкриття у СРСР диплом № 273), один із авторів Бороздич Є.В., який написав роботу під назвою “Вплив короткоживучих підкоркових локальних збурень на літо-, гідро- та атмосферу” [9]. Як розвиток цього наукового напрямку нами було розроблено монографію [10] (ухвалена

Бороздичем Є. В., особисто). Далі були опубліковані результати наукових досліджень про вплив варіацій гравітаційного поля Землі на атмосферні процеси [11-18]. У цьому науковому напрямі було також розроблено та запатентовано технічні рішення, одне з яких “Спосіб виявлення змін гравітаційного поля Землі” [19]. В роботі [20] досліджено глобальну мусонну циркуляцію. Доведено, що синхронно з мусонами Північна півкуля в лютому стискається, а в серпні розтягується [21], що генерує обмін мас між півкулями  $1 \pm 0,2 \cdot 10^{16}$  кг.

Безпосередньо впливу гравітаційного чинника формування мусонних вітрів присвячені публікації [22-24]. В публікації [24] нами розглянуто екстремальну негативну аномалію форми геоїду Індійського океану, як одну з причин формування мусонного типу атмосферної циркуляції у Індоокеанському регіоні. В роботах [10,23,24] виконано узагальнення результатів досліджень багатьох авторів про вплив змін гравітаційного поля у просторі та часі на атмосферну циркуляцію.

У роботі [25] для отримання оцінки часової мінливості форми геоїду та сили тяжіння, яка тотожна зміні  $\Delta g$ , у Аравійському морі, були використані дані AVISO+ - супутникової альтиметрії [26] та GRACE - супутникової гравіметрії [27]. 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 зазначених сайтів (AVISO+ і GRACE). За результатами осереднених за місяць вимірювань рівня моря та  $\Delta g$  побудовані відповідні часові ряди довжиною 15 років. Критерієм порівняльного аналізу даних супутникової альтиметрії та гравіметрії обрано кореляційний та взаємний спектральний аналіз.

Були виконані відповідні розрахунки (оцінка коефіцієнту кореляції склала  $R=0,73$ ), встановлено наявність періодичної складової у мінливості форми геоїду та  $\Delta g$ . За даними розрахунку (AVISO+ і GRACE у Аравійському морі) амплітудних спектрів виділяється періодична складова - період 1 рік. В результаті виконаних досліджень вперше зафіксовано високий рівень когерентності (0,96) річних гармонік змін гравітаційного поля і змін форми геоїду в районі найбільшої аномалії  $\Delta g$ , де щорічно виникають найпотужніші мусони. Встановлено також наявність прямо пропорційної залежності між змінами сили тяжіння та рівня океану в районі Аравійського моря. Визначено, що гравітаційне поле і форма геоїду змінюються у часі виключно з річними циклами. І останнє, встановлено, що так звані, «сезонні» зміни зазначених полів когерентні, але мають незначний зсув за фазою. Таким чином, на кількісному рівні вперше було підтверджено, що у районі Індоокеанської гравітаційної аномалії з мусонним типом клімату рідка (рухома) оболонка Землі коливається синхронізовано зі змінами  $\Delta g$ .

В продовження досліджень, опублікованих у роботі [25], нами проведено порівняння даних AVISO+ і Gracе біля західного берега Індії (провінція Гоа) і визначено, що зміни рівня моря відбуваються з запізненням у відношенні до змін гравітаційного поля. З застосуванням кореляційного аналізу була перевірена гіпотеза стосовно того, що у зазначеному регіоні зміни гравітаційного поля (дані GRACE) є причиною, а зміни форми геоїду (дані AVISO+) наслідком у ланці змін погодних умов, що щорічно відбуваються у червні-серпні.

У таблиці 1 наведені результати визначення чисельної оцінки регіонального масштабу запізнення реакції океану на зміни гравітаційного поля.

Таблиця 1. - Результати визначення чисельної оцінки регіонального масштабу запізнення реакції океану на зміни гравітаційного поля.

| Зсув даних | Коефіцієнт кореляції GRACE - AVISO | Граденти з Gracе є причиною, а граденти з AVISO – наслідком |
|------------|------------------------------------|---|
| 0 місяць   | -0,3                               | -0,29   |
| 1 місяць   | -0.67                              | -0,04   |
| 2 місяць   | <b>-0.82</b>                       | -0.31   |
| 3 місяць   | -0.67                              | -0.46   |
| 4 місяць   | -0.27                              | <b>-0.49</b>  |
| 5 місяць   | -                                  | -0.47   |
| 6 місяць   | -                                  | -0.40   |

В результаті виконаних розрахунків було визначено, що реакція океану на зміни гравітаційного поля відбувається з запізненням на 1-2 місяці, а реакція нахилу морської поверхні на зміну просторових тенденцій гравітаційного поля відбувається з запізненням на 3-4 місяці.

На рисунку 1 наведена карта-схема гравітаційного поля Землі [28].

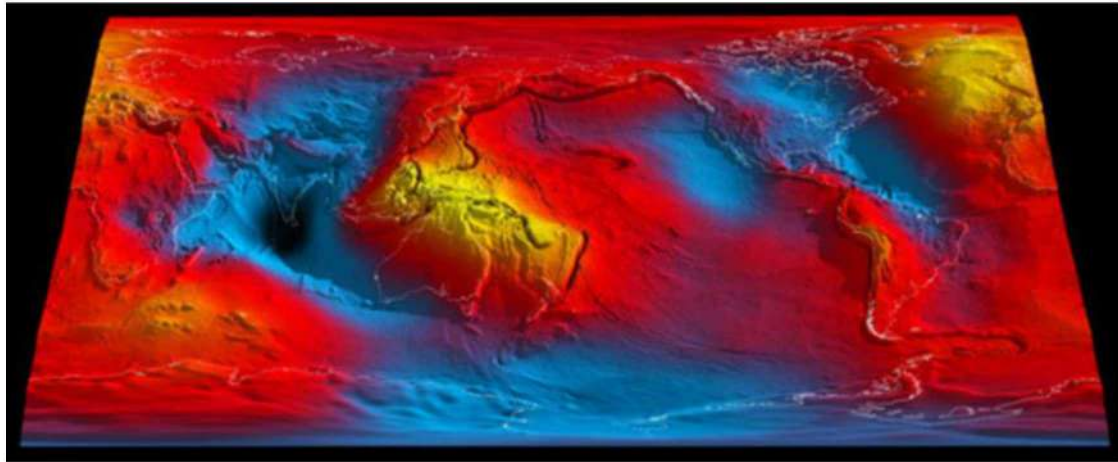


Рисунок 1 – Карта-схема гравітаційного поля Землі [28].

В Індійському океані у районі о. Шрі Ланка зафіксовано від'ємну аномалію  $\Delta g$ , а на півночі Австралії - позитивну аномалію гравітаційного поля Землі. Розглянемо, як зазначені регіональні зміни гравітаційного поля Землі задіяні у відповідних регіональних кліматичних моделях. У роботі [29] розглядається система формування кліматичних умов у тропічній зоні від західної Африки до західної Австралії. Зазначена регіональна кліматична система отримала назву Індоеокеанський диполь (ІОД) і була спрямована на вирішення питання моделювання змін клімату у Індоеокеанському регіоні. Автором зазначеної регіональної системи кліматоутворення є Бюро метеорології влади Австралії [30], яке досліджує взаємодію між океаном і атмосферою. ІОД розраховується шляхом порівняння різниці температури морської поверхні (ТМО) в районі ( $50^{\circ}$ – $70^{\circ}$  сх. д. та  $10^{\circ}$  пд. ш. –  $10^{\circ}$  пн. ш.) і у районі ( $90^{\circ}$ – $110^{\circ}$  сх. д. та  $10^{\circ}$  пд. ш. –  $0^{\circ}$  пн. ш.), довжини критичного шару та індексу Ніно 3.4. Вважається, що ІОД визначається фазовою швидкістю планетарних хвиль у екваторіально-тропічній зоні Індійського океану і виділяються позитивна та негативна фази ІОД, як просторово-часові зміни стану екваторіального термокліну в Індійському океані (рис. 2).

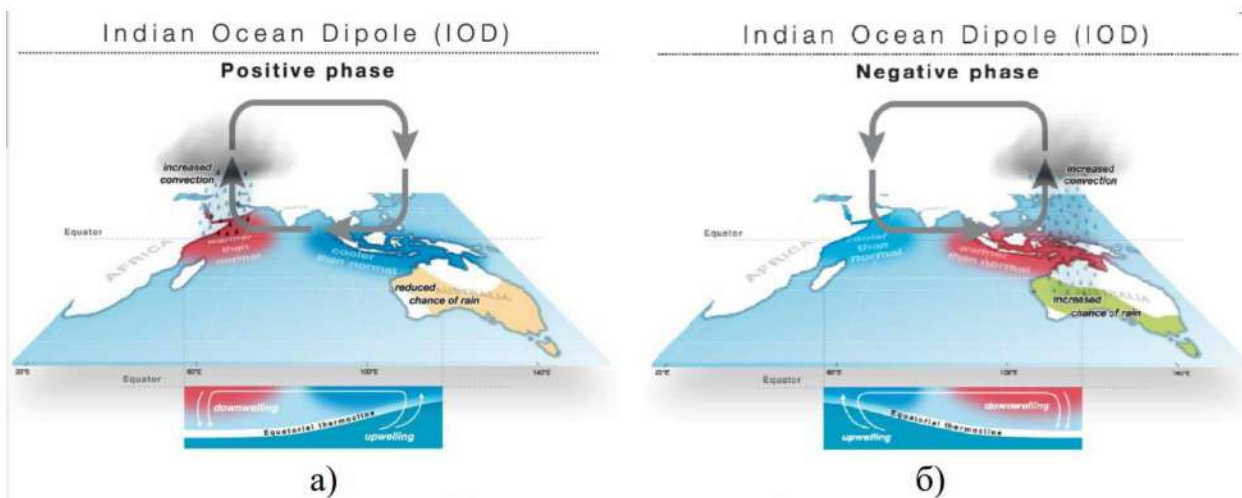


Рисунок 2 – Позитивна (а) та негативна (б) фази Індоеокеанського диполя та стан екваторіального термокліну в Індійському океані під час цієї фази (червоним відзначені області Індійського океану, в яких температура аномально вища за середню, синім – аномально нижча) [30].

Авторами роботи [24] наведені дані розрахунку просторово-часових змін Сомалійського апвелінгу в Аравійському морі. Встановлено, що кожного року у другій частині вересня негативна аномалія ТПО має максимальну площу, що не враховується моделлю ІОД. Тобто щорічно, влітку завжди формується потужна позитивна фаза ІОД.

Відповідно до схеми (рис. 2) за умов опускання термоклину в районі Західної Африки у приводному шарі виникатиме східний рух повітря, а за умов підйому термоклину виникає західний рух повітря, який у районі Аравійського моря у червні-серпні співпадає з напрямком мусонного вітру.

На нашу думку, ІОД є аналогом ENSO, бо також пов'язує просторово-часові флуктуації температури поверхневих вод тропічної зони з кліматичними змінами. У монографії [1] показано, що ENSO, яке контрастно проявлено аномалією температури поверхні екваторіальної зони Тихого океану, насправді проявлено у цій зоні і у Атлантичному океані. Акцентовано також увагу на тому, що ENSO може бути викликане ротаційними ефектами, бо виключно вони формують екваторіальний апвелінг та регулюють його активність. Під ротаційними ефектами маються на увазі зміни швидкості обертання Землі з часом, які щорічно генерують серпневі позитивні екстремуми довжини екваторіальних аномалій низької температури води у Тихому та Атлантичному океанах.

Спочатку вважалось, що характерний часовий масштаб ІОД тісно пов'язаний з подіями ENSO, але сучасні дослідження [29,31] констатують, що тільки 35-50% подій ІОД відбуваються одночасно з ENSO (таблиця 2).

Таблиця 2 - Роки сильних позитивних/від'ємних подій ІОД, які співпадають/не співпадають з подіями ENSO.

| Фаза ІОД       | Роки   |
|----------------|--|
| Від'ємна фаза  | 1884 1889 1893 1899 1901 1906 1910 1917 1920 1954 1958<br>1964 1975 1984 1989 1975 1992 1996 |
| Позитивна фаза | 1887 1902 1923 1926 1935 1944 1946 1953 1961 1963 1972<br>1982 1994 1997                     |

*Примітки:* синім виділені роки Ла-Ніньо; червоним – Ель-Ніньо (за модельними даними [31]) за період 1884 – 1997 рр.

В роботі [32], присвяченій Індоекеанському диполу, в 1997-1998 рр. були зафіксовані незвичайні аномалії ТПО. У східній частині Індійського океану в липні 1997 р. виникли від'ємні аномалії, які досягли максимуму (-2 °С) в листопаді 1997 р. В західній частині Індійського океану в червні 1997 р. з'явилися позитивні аномалії ТПО з максимумом (+2 °С) в лютому 1998 р. За звичай зміни поля ТПО в Індійському океані, в роки Ель-Ніньо, мають інший характер та значно менші величини аномалій температури (біля 0,5 °С). Вказані аномалії ТПО в 1997 р. сформували позитивну фазу ІОД, під час якої літній мусон був придушений.

Нами очікується, що дослідження причини виникнення аномалії ІОД у 1997 році може дати відповідь на низку питань, що стосуються причин формування мусонного клімату у Аравійському морі над Індоекеанською аномалією сили тяжіння.

**Невирішені проблеми.** У Індійському океані зимовий північно-східний мусон в Аравійському морі співпадає з пасатами і повинен посилювати їх, а літній південно-західний мусон – не співпадає за напрямком з пасатами, тому повинен послаблювати їх. Фактично ж, все навпаки. В Аравійському морі в період літнього мусону біля берегів Сомалі повинні формуються згінні течії, коли температура поверхні океану може знижуватися на 10°С. Внаслідок градієнтів температури повітря 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, саме коли прояви апвелінгу в температурі поверхні океану максимальні.

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 з відповідним хвилеутворюванням - 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.

**Постановка задачі.** В роботі [33] було науково обґрунтовано виникнення від'ємної аномалії гравітаційного поля Індоекеанського регіону, обумовлене глибинними процесами під Африканською тектонічною плитою. Важливо розуміти, що причина виникнення від'ємної аномалії гравітаційного поля Індоекеанського регіону (процеси у мантиї Землі) не може автоматично переноситися на умови генерації мусонного типу атмосферної циркуляції, яка у Індоекеанському регіоні у червні-серпні щорічно руйнує пасатну циркуляцію атмосфери. Тобто, вплив геодинамічних процесів, що відбуваються у мантиї Землі, на виникнення мусонної циркуляції у Індоекеанському регіоні не є доведеним. Тому метою дослідження є отримання якісних та кількісних підтверджень впливу швидкоплинної глобальної зміни гравітаційного поля Землі на мусонну циркуляцію у північній частині Індійського океану.

Загальновідомо, що у травні 1997 р. під час проходження комети Хейла - Боппа через площину екліптики Сонячної системи, раптово відбулося швидкоплинне руйнування балансу сил планетарного масштабу.

Так роботі [34], де розглядаються переміщення мас у тілі Землі, було вказано на аномалію зазначених рухів в напрямку  $\pm Y$  в 1997 р. У іншій роботі [35] визначено раптові швидкоплинні зміни параметру сплюсненості форми Землі  $J_2$  (рис.3).

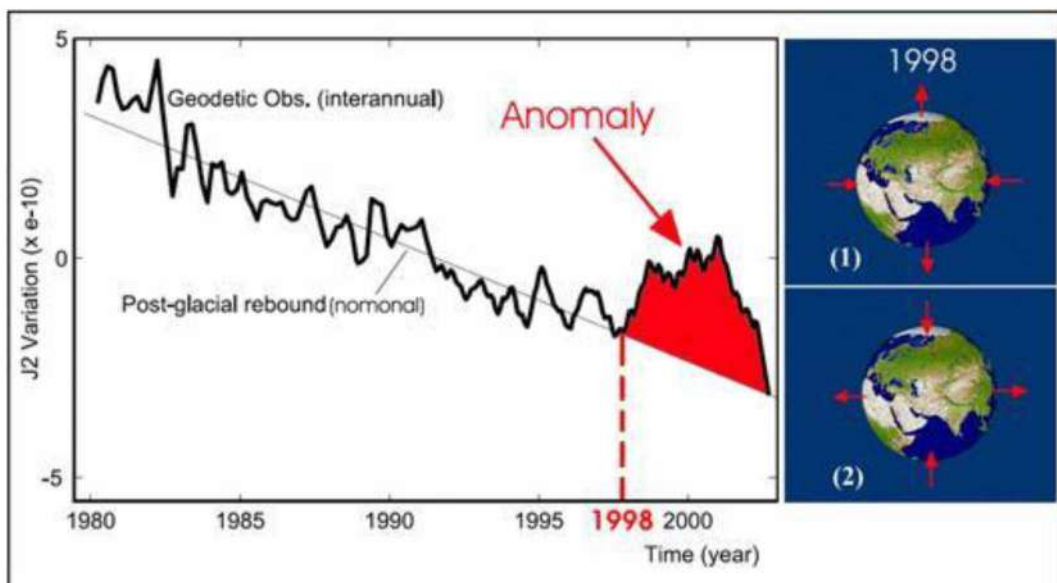


Рисунок 3 - Зміни значень коефіцієнта  $J_2$  за даними [36].

В результаті виконаних досліджень [37], було зроблено висновок про те, що «стрибок» коефіцієнту  $J_2$  у 1997 р. може бути пояснений глобальними змінами гравітаційного поля Землі. Коефіцієнт  $J_2$  відображає динаміку співвідношення екваторіального та полюсного радіусів Землі. До 1997 р. величина коефіцієнта  $J_2$  залишалась практично постійною, але у 1997 році неочікувано відбулось збільшення коефіцієнта  $J_2$ .

Зміни гравітаційного поля проявляються у змінах форми геоїду [25]. На рис. 4 показані швидкоплинні зміни форми геоїду Землі у 1997 р. [38], які у Індоекеанському регіоні проявилися з максимальною амплітудою.

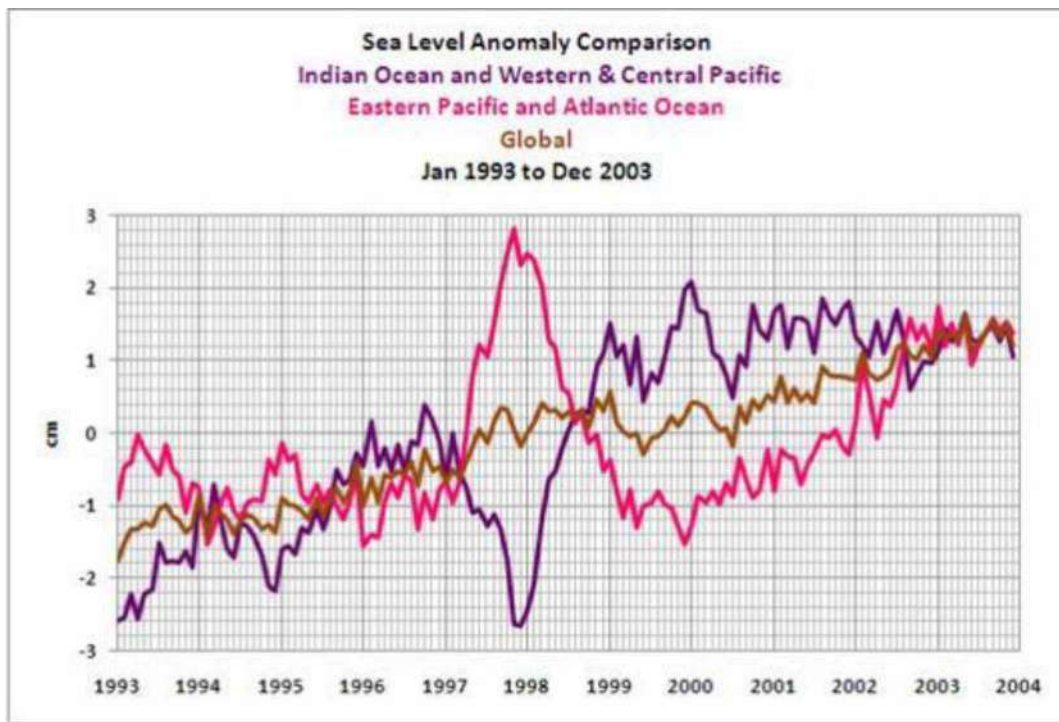
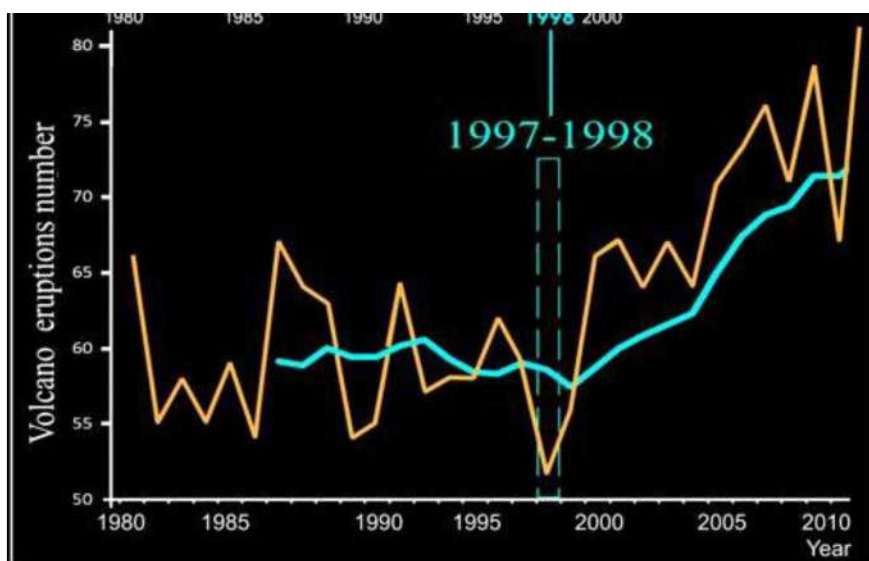


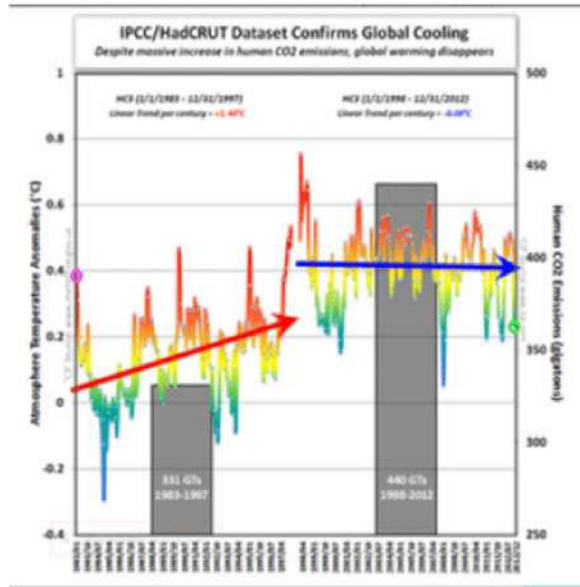
Рисунок 4 – Графіки зміни рівня Світового океану (Індійського океану та західного сектору Тихого океану (бузковий), Атлантичного океану та східного сектору Тихого океану (рожевий) Світового океану (коричневий) [38].

За інформацією [38], у 1997 році зафіксовані непрогнозовані зміни форми геоїда Землі. Рівень східної частини Тихого океану та Атлантичного океану в цілому, різко піднявся за рахунок зниження рівня Індійського океану и західної частини Тихого океану. Зазначене спостереження свідчить про те, що у травні 1997 року раптово відбувся зсув мас Землі від Індії у напрямку Центральної Америки.

Слід зазначити, що саме у цей час на глобальному рівні призупинився активний вулканізм (зменшилась напруга в твердому тілі Землі ) і, за рахунок різкого збільшення надходження гідротермальної енергії через розривлені зони розломів, відбулося швидке зростання середньої глобальної температури Землі (рис. 5).



а



б

Рисунок 5 – Графіки змін у часі: а) чисельності вулканічних вивержень (жовтий) і тренду (голубий); б) середньоглобальної температури тропосфери [39].

Аналіз наведених даних свідчить про те, що у 1997 році, вірогідно, під впливом гравітаційного поля комети Хейлпа Боппа, раптово відбулися швидкоплинні зміни глобального гравітаційного поля нашої планети, які у Індійському океані призвели до зменшення сили тяжіння, що проявилось збільшенням глибини депресії в топографії океану в районі о. Шрі ланка (див рис. 1).

Важливо відмітити, що у роботі [35] було вказано, що у 1997 р. аномальний зсув мас у тілі Землі нібито призвів до виникнення явища Ель-Ніньо 1997/1998 років, що спричинило аномалію мусонного клімату в Індокоеанському регіоні у 1997 р. На рис. 6 зазначена аномалія 1997 року проявлена раптовим призупиненням виникнення у цей період як аномальних злив (червоні трикутники над лінією 2 СКВ), так і тенденції підвищення кількості опадів у дощовий період 1994 - 2000 років.

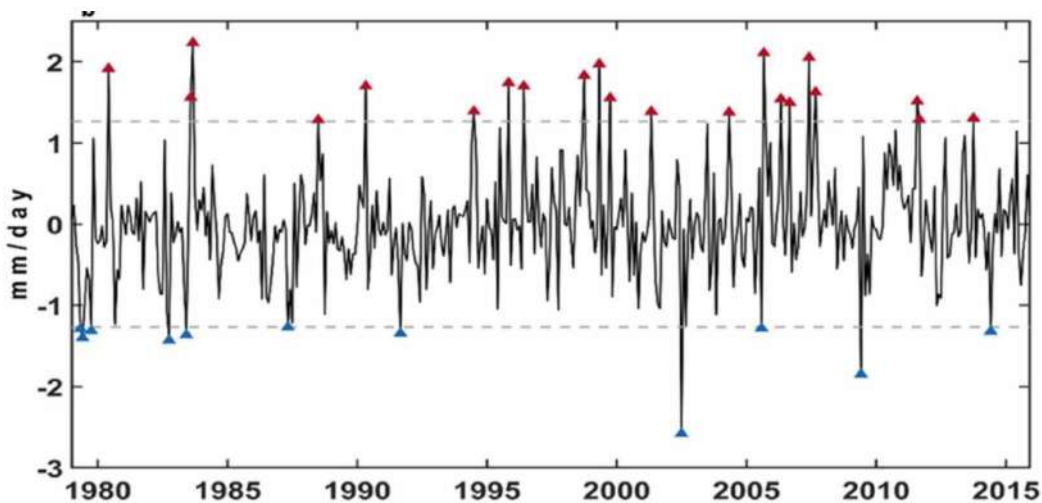


Рисунок 6 – Графік часових змін кількості атмосферних опадів в Індії у зоні прямокутника 10°N–30°N та 60°E–95°E (осереднені за місяць добові показники опадів, а пунктирні лінії - позначають 2 середньокліматичні відхилення (СКВ) [40].

Іншим важливим компонентом мусонної циркуляції є формування у червні- серпні, так званого, “мусонного хребта” на рівні 200 гПа, який зазвичай простягається від Близького Сходу на схід до пд.-сх. Азії приблизно на 27,5° пн.ш. (рис. 7).

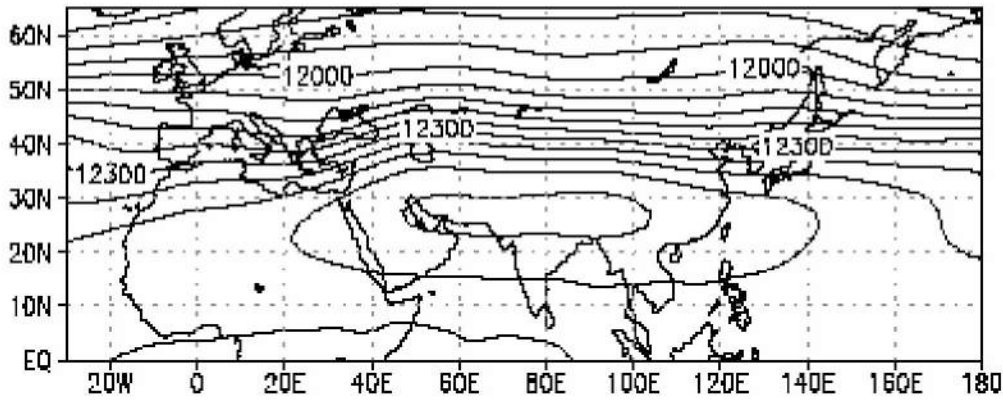


Рисунок 7 - Середнє кліматологічне поле геопотенціальних висот 200 гПа (м) (червень-серпень), розраховане за період 1979-1995 рр. [41].

Формування зазначеної аномалії поля геопотенціалу на висоті 200 гПа призводить до зміщення на північ західних вітрів середньої широти.

На початку червня 1997 року аномалія мусонної циркуляції характеризувалася практичною відсутністю “мусонного хребта” над регіоном Аравійського моря, що призвело до зсуву на південь західних вітрів середніх широт (рис. 8).

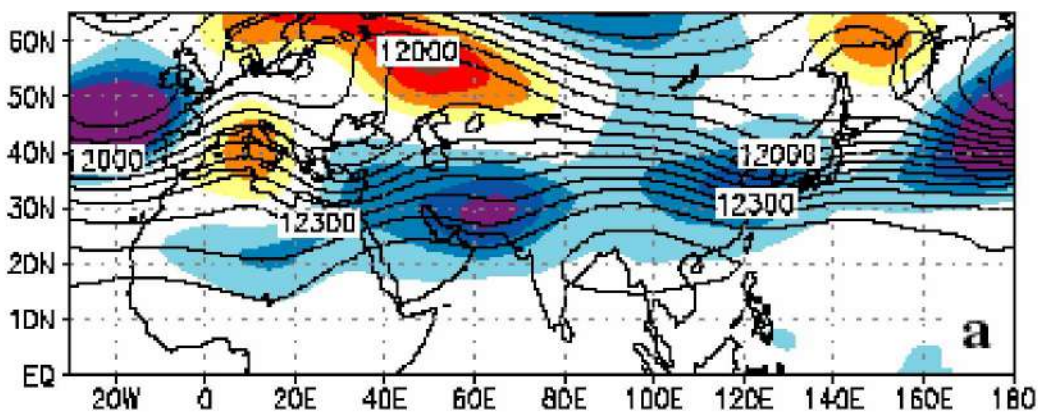


Рисунок 8. – Приклад (за червень-серпень 1997 року) середнього кліматологічного геопотенціалу на висоті 200 гПа (контури, одиниці вимірювання в м) та аномалії (заштриховані). Аномалії є відхиленнями від середньодобових базових періодів 1979-1995 рр. [41]

Це ймовірно, й заблокувало процеси, що генерують літній мусон. У середині липня аномалія почала зникати.

Як вже говорилось [34], в липні 1997 р. у східній частині Індійського океану почала формуватися від’ємна аномалія ТПО, а у західній частині - позитивні аномалії, що класифікуються як позитивна фаза ІОД, під час якої літній мусон пригнічується.

Для підтвердження на кількісному рівні відмінності умов формування мусонного клімату у 1997-1998 роках, нами виконано кількісний аналіз змін форми геоїду (рівня моря) у 1994-1998 роках у районі гравітаційної аномалії (район півострова Індостан). За даними ГІС AVISO+ були сформовані відповідні часові ряди висоти геоїду. Зазначені часові ряди були застосовані для розрахунку змін у часі просторового нахилу форми геоїду.

Відмінності умов формування мусонного клімату у 1997-1998 роках визначено методом факторного аналізу за t-критерієм Ст’юдента. Для забезпечення вимоги нормального типу розподілу випадкових величин для вхідних даних, з часових рядів ГІС AVISO+ було:

- вилучено довготривалі тенденції, що не пов’язані з сезонним мусонним циклом;
- застосована опція визначення даних за абсолютною величиною;

- застосована процедура накопиченого інтегрування з подальшим вилученням лінійного тренду. Результати розрахунку t-критерію Ст'юдента наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 - t-критерій Ст'юдента сформованих часових рядів (дані ГІС AVISO+ )

| Характеристика вхідних даних                          | Розрахований t-критерій Ст'юдента | Оцінка часового ряду 1997-1998 рр. у порівнянні з 1994-1996 рр.       |
|---|-----------------------------------|---|
| 15 ° пн. ш. та 73 ° сх. ш.<br>(прибережна зона Індії) | 3,66                              | У 1997-1998 роках форма геоїду знизилася (вірогідність 99%)           |
| 6 ° пн. ш. та 58 ° сх. ш.<br>(Аравійське море)        | 2,29                              | У 1997-1998 роках форма геоїду загалом підвищилася (вірогідність 95%) |
| нахил форми геоїду                                    | 2,51                              | У 1997-1998 роках нахил форми геоїду змінив знак (вірогідність 95%)   |

Таким чином, на кількісному рівні визначено, що на відміну від попередніх років, у 1997-1998 році в Аравійському морі в період літнього мусону, тобто в умовах дії західного вітру біля західного берега Індії, рівень моря не підвищувався, а знижувався.

**Отримані результати.** Дослідження причин мусонного вітру над Індокоеанською аномалією сили тяжіння виконано з застосуванням факторного, кореляційного та спектрального аналізу. У попередніх публікаціях [25] нами на кількісному рівні було обґрунтовано тезу про те, що часові зміни гравітаційного поля Землі мають достатню амплітуду для того, щоб впливати на динаміку океану, що вперше доведено у роботі [8] для умов атмосфери. Особливості такого впливу нами досліджені додатково і наведені у таблицях 1 та 3.

Нами було акцентовано увагу на тому, що зміни  $\Delta g$  можуть відбуватися з різних причин, у тому числі і за умов зміни відцентрової сили. Така постановка задачі науково обґрунтована роботами Сидоренкова Н.С. [42-44] у тому числі у монографії "Атмосферні процеси та обертання Землі" [45].

У роботі [25] було вказано на існуючу циклічність змін кутової швидкості обертання Землі, яка впливає на  $\Delta g$ . Загальновідомо, що максимальна амплітуда змін  $\Delta g$  відбувається у тропічній зоні Земної кулі. У роботі [25] нами також було акцентовано увагу на тому, що позитивні екстремуми  $\Delta g$  фіксуються виключно під час літнього (червень-вересень) і зимового (січень-березень) мусону. Таке співпадіння заслуговує перевірки на чисельному рівні.

На рисунку 9, у якості прикладу, показано графік змін у часі кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі.

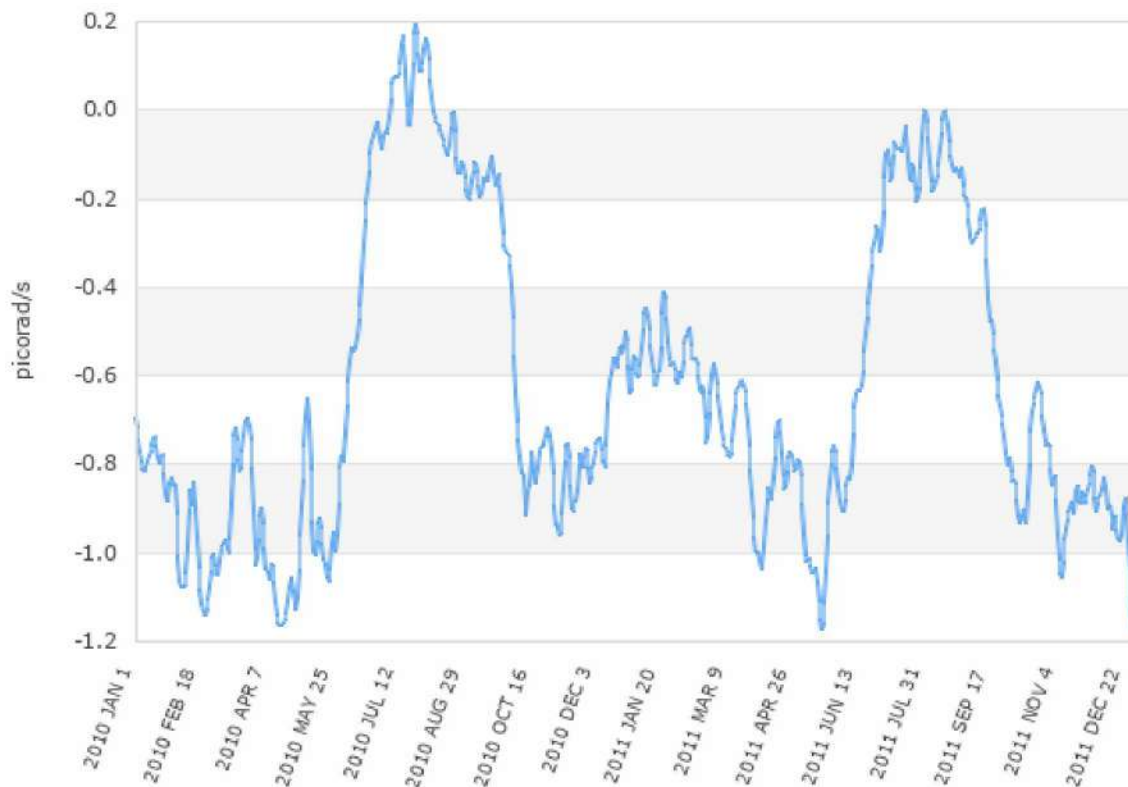


Рисунок 9 - Графік зміни у часі аномалії кутової швидкості обертання Землі (2010-2011 рр.) [46].

Як вже було згадано, максимальний вплив на зміни  $\Delta g$  відбуваються у приекваторіальній зоні, де відцентрова сила має найбільше значення. Зменшення сили тяжіння у червні- серпні повинно призводити у тропічній зоні до підйому повітряних мас. Нам важливо з'ясувати особливості впливу ротаційних процесів на атмосферну циркуляцію над Індокоеанською аномалією прискорення вільного падіння  $\Delta g$ .

Відповідно до схеми, що показана на рис. 2 така ситуація відповідає негативній фазі ІОД, коли в умовах збільшення швидкості обертання Землі, водні маси накопичуються біля східного берега Африканського континенту. На відміну від Тихого та Атлантичного океанів, де надлишки водних мас витікають такими течіями як Куросіо та Гольфстрім, у Індійському океані специфічні географічні умови призводять до накопичення маси біля східного берега Африки. На кількісному рівні зазначене питання нами проілюстровано в матеріалах таблиці 3.

Метою нашого дослідження є застосування методів фізико-статистичного моделювання для перевірки тези стосовно того, що ротаційні процеси змін  $\Delta g$  формують зміни  $\Delta g$ , що фіксуються супутниковою гравіметриєю. Були використані дані супутникової гравіметрії [39] для регіону півострова Індостан та дані про зміни кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі. Зразок таких даних з відфільтрованою дводобовою циклічністю наведено на рис. 7.

За результатами осереднених за місяць вимірювань  $\Delta g$  GRACE та швидкості обертання Землі побудовано відповідні часові ряди (рис. 10.).

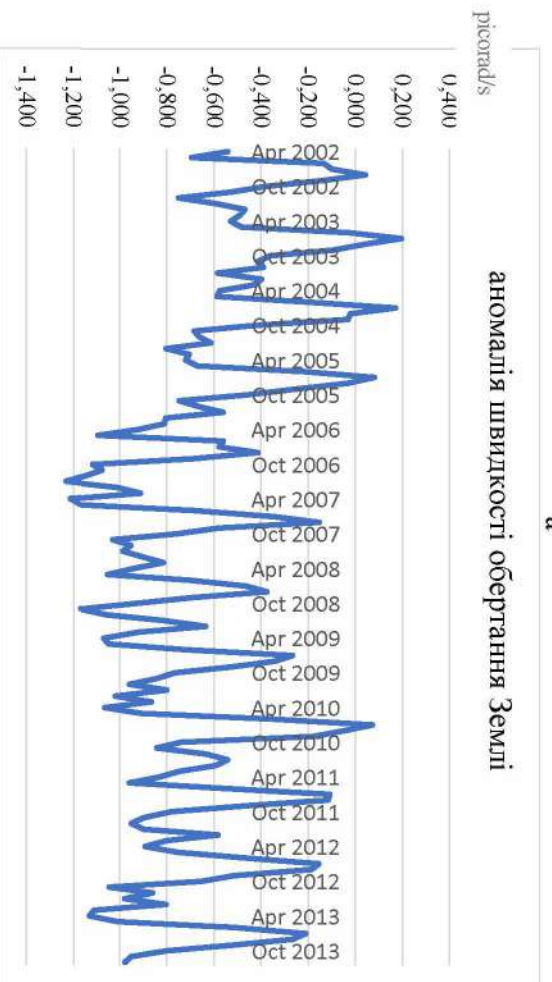


Рисунок 10 - Графік часових змін: а)  $\Delta g$  - в районі півострова Індостан; б) аномалія швидкості обертання Землі.

Критерієм порівняння регіональних даних супутникової гравіметрії та швидкості обертання Землі обрано спектральний аналіз. Були обчислені часові ряди змін  $\Delta g$  та швидкості обертання, в результаті чого підтверджено наявність періодичної складової у мінливості  $\Delta g$  та швидкості обертання Землі з річним циклом. З метою визначення впливу річної мінливості швидкості обертання на зміни гравітаційного поля в обраному регіоні, були виконані розрахунки оцінок крос-спектру, фазового спектру та спектру когерентності (рис. 11).

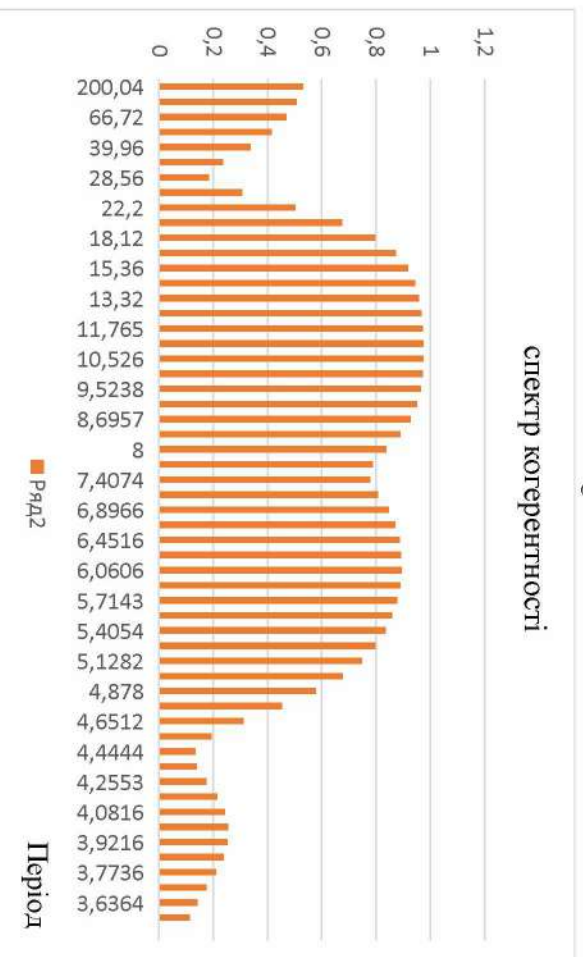
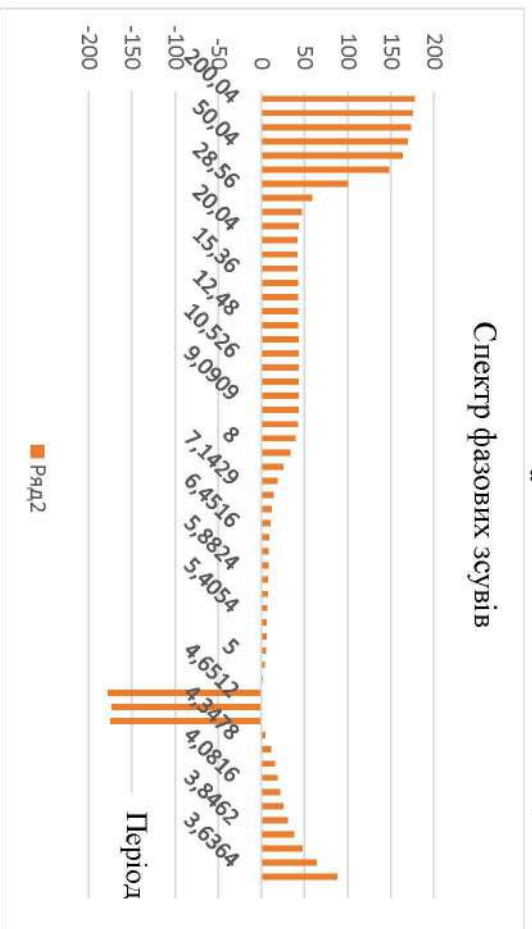
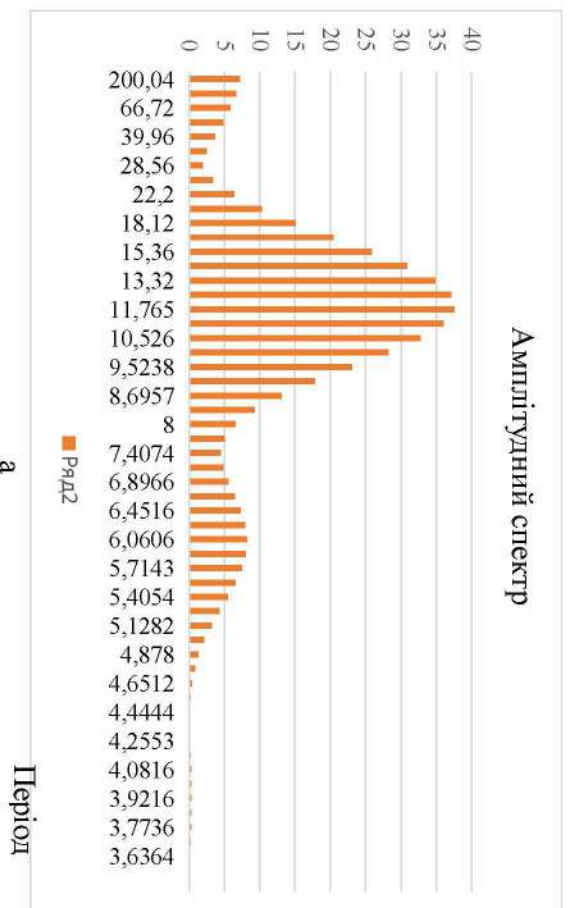


Рисунок 11 - Графіки розрахунку оцінок: а) амплітудного спектру, б) спектру фазових зсувів та в) спектру когерентності в районі півострова Індостан.

В результаті виконаних досліджень вперше зафіксовано високий рівень когерентності річних гармонік змін швидкості обертання Землі і гравітаційного поля в районі найбільшої аномалії  $\Delta g$ , де щорічно виникають найпотужніші мусони. Для річного періоду отримано кількісні характеристики: кроспектру - 37,55; спектру фазових зсувів - 42,52°; спектру когерентності - 0,97. На кількісному рівні отримано підтвердження співпадіння змін  $\Delta g$  в районі Індокоеанської аномалії з динамікою швидкості обертання. По-перше, встановлено наявність прямо пропорційної залежності між змінами швидкості обертання та сили тяжіння в районі індокоеанської аномалії  $\Delta g$ . По-друге, визначено, що швидкість обертання Землі та гравітаційне поле  $\Delta g$  змінюються у часі з річними циклами. По-третє, встановлено, що ротаційні аномалії, як причина зміни  $\Delta g$ , відбуваються раніше самих аномалій  $\Delta g$ , тобто мають незначний зсув за фазою. Таким чином, результатами фізико-статистичного моделювання вперше було підтверджено, що у районі Індокоеанської гравітаційної аномалії з мусонним типом клімату зміни  $\Delta g$  можуть формуватися за рахунок ротаційних ефектів.

**Висновки.** Забезпечення безпеки мореплавства в регіонах з мусонним типом клімату вимагає визначення причин мусонних вітрів для подальшої розробки чисельних прогнозів несприятливих погодних умов. Проаналізовано причини щорічного припинення пасатної циркуляції у Індокоеанському регіоні. На чисельному рівні перевірена гіпотеза впливу на мусонний клімат Індокоеанського регіону позитивної аномалії прискорення вільного падіння, що виникає у червні-серпні за умов збільшення кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі. За результатами розрахунку спектру когерентності часових рядів сили тяжіння в районі півострова Індостан та швидкості обертання Землі встановлено, що процеси відбуваються з однаковою частотою, а за результатами розрахунку спектру фазових зсувів визначено, що причиною зміни сили тяжіння у червні-серпні є зміни кутової швидкості Землі. Показник інерційності, затримання у часі щорічного екстремума сили тяжіння відносно екстремуму швидкості обертання Землі складає 1-2 місяці.

Отримані результати є підставою для висунення гіпотези, стосовно того, що вітер у червні - серпні генерується переважно змінами прискорення вільного падіння ротаційної природи.

## ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Дегтярев А.И. Муссоны в системе глобальной циркуляции атмосферы: диагностика и моделирование: автореф. дис. док. фіз-мат. наук. 2004. URL: <https://www.disscat.com/content/mussony-y-sisteme-globalnoi-tsirkulyatsii-atmosfery-diaagnostika-i-modelirovanie> (дата звернення 10.01.2025).
3. Воейков А.И. и современные проблемы климатологии. Збірник статей ред. Будыко М.И. Л.: Гидрометеорологическое изд-во. 1956. 282 с.
4. 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.
5. Сорочан О.Г. Муссоны Азии. В кн. *Современные проблемы климатологии*. - Л.: Гидрометеиздат. 1966. 450 с.
6. Осмаловская Е.В., Дмитриев А.А., Гутман Л.Н., Монин А.С. Риль Г. Современные проблемы климатологии. Л.: Гидрометеорологическое изд-во. 1966. 450 с.
7. Тропические муссоны. ред. Петросянца М.А., Белова П.Н. ПГЭП, Т. 9. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 338 с.
8. Руткевич, П.Б. О реакции атмосферы на локальные изменения плотности мантии Земли. *Гидродинамика*. Збірник наукових праць. Вип. 11. 1998. С. 241–248.
9. 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.

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Dolia V. D. The gravitational theory of baric formations. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 10, EGU2008-A-11100. 2008.
14. 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.
15. 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.
16. 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.;
17. 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.
18. 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.
19. Спосіб виявлення змін гравітаційного поля Землі: Пат. № 63796 Україна. Опубліковано 25.10.2011. Бюл. N 20.
20. A New Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1065328> (дата звернення 20.01.2025).
21. 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.
22. 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 20.01.2025)
23. 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](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11)] (дата звернення 20.01.2025)
24. 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.
25. Кучеренко Н.В., Томчаковський Г. Г., Капочкіна М.Б., Калініченко Є.В. Умови формування мусонного вітру над Індокіанською аномалією сили тяжіння. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. – К.: ДУІТ, 2025. Випуск 1 (42). С. 115-130 URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42>
26. How precise is Earth's gravity URL: <http://www.calpoly.edu/~gthomcr/ME302/documents/AccuracyofGravity.pdf> (дата звернення 20.01.2025).
27. 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.
28. Войтенко С.П., Учитель И.Л., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б. Геодинамика. Основы кинематической геодезии, Одесса: Астропринт, 2007. — 259 с.

29. Торбинский А. В. Индоокеанский диполь: механизм формирования и влияние на региональные климатические аномалии, 2022 автореферат, URL: <https://www.dissercat.com/content/indookeanskii-dipol-mekhanizm-formirovaniya-i-vliyanie-na-regionalnye-klimaticheskie-anomali> (дата звернения 02.01.2025).
30. Bureau of Meteorology of Australian Government. URL: <http://www.bom.gov.au/climate/about/australian-climate-influences/images/iod-neutral.png> (дата обращения: 20.01.2025).
31. Iizuka, S. The Indian Ocean SST dipole simulated in a coupled general circulation model. *Geophysical Research Letters*. Vol. 27, issue 20. 2000. P. 3369-3372. DOI 10.1029/2000GL01148.
32. Webster, P. J. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-1998. *Nature*. Vol. 401. 1999. P. 356-360. DOI 10.1038/43848.
33. Nasa gravity map of earth URL:<https://mapofsouthwesternontario.pages.dev/posts/nasa-gravity-map-of-earth> (дата звернения 20.10.2024).
34. Blewitt G., Lavallée D., Clarke P., Nurutdinov K. A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected. *Science*. 2001 Dec 14; 294(5550):2342-5. doi: 10.1126/science.1065328.
35. Когда начался “Глобальный энергетический скачок?” URL: <https://studfile.net/preview/7011506/page:19/> (дата звернения 20.01.2025).
36. Cox, C., and B. F. Chao, Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998, *Science*, 2002, pp. 831–833. .
37. A first analysis of the mean motion of CHAMP. URL: <https://adgeo.copernicus.org/articles/1/95/2003/> (дата звернения 20.01.2025).
38. Climate Observations (Notes From Bob Tisdale on Climate Change and Global Warming. URL: <http://bobtisdale.blogspot.com/2009/08/enso-is-major-component-of-sea-level.html> (дата звернения 20.01.2025).
39. Долгосрочный прогноз динамики вулканической активности Земли. URL: <https://studfile.net/preview/7011506/page:26/> (дата звернения 20.01.2025).
40. Капочкина А.Б., Капочкин Б.Б. Влияние газовой составляющей флюидного режима литосферы в районах акваторий на атмосферные процессы. Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. Т. 4. Вып. 1 2013 22 с. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-gazovoy-sostavlyayushey-flyuidnogo-rezhima-litosfery-v-rayonah-akvatoriy-na-atmosfernye-protsessy> (дата звернения 20.01.2025).
41. National Weather Service Сpc: Climate Assessment for 1994-1998 *U.S. Department Of Commerce National Weather Service National Meteorological Center Climate Analysis Center* [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/assessments/assess\\_98/](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/assessments/assess_98/) (дата звернения 10.10.2024).
42. Сидоренков Н.С. Лунно-солнечные приливы и атмосферные процессы. URL: <http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/chteniya/sagit2009/sidorenkov.pdf> (дата звернения 01.02.2025).
43. Сидоренков Н.С. Межгодовые колебания системы атмосфера–океан–Земля. *Физика*. № 25/98 .
44. Сидоренков Н.С., Сумерова К.А. Геодинамические причины декадных изменений климата. *Труды Гидрометцентра*. 2012. Вып. 348, с. 195–214.
45. Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. *Гидрометеиздат*. 2002. 366 с.
46. Earth orientation center. URL: <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=C04&lang> (дата звернения 01.02.2025).

## REFERENCES

1. 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.
2. 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-diagnostika-i-modelirovanie> (date of application 10.09.2024).
3. Voeikov A.I. and modern problems of climatology. Collection of articles edited by Budyko M.I. Hydrometeorological Publishing House. 1956. 282 p.

4. 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.
5. Sorochan O.G. Monsoons of Asia. In the book Modern Problems of Climatology. - L: Gidrometeoizdat. 1966. 450 p.
6. 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.
7. Tropical monsoons. edited by Petrosyants M.A., Belov P.N. T. 9. L.: Gidrometeoizdat. 1988. 338 p.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Dolia V. D. The gravitational theory of baric formations. Geophysical Research Abstracts. Vol. 10, EGU2008-A-11100. 2008.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Method for detecting changes in the Earth's gravitational field: Pat. No. 63796 Ukraine. Published 10/25/2011. Bulletin No. 20.
20. A New Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1065328> (date of application 10.01.2025).
21. 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.
22. 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.uran.ua/sciencerise/article/view/37631> DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.37631> (date of application 10.01.2025)
23. 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](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11) (date of application 12.09.2024)

24. 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 Technical University of Ukraine 04.08.03, No. 105.
25. Kucherenko N.V., Tomchakovskiy G. G., Kapochkina M.B., Kalinichenko E.V. Conditions for the formation of monsoon wind over the Indian Ocean gravity anomaly. Water transport. Collection of scientific papers of the State University of Infrastructure and Technologies. – K.: DUIT, 2025. Issue 1 (42). P. 115-130 URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42>
26. How precise is Earth's gravity URL:<http://www.calpoly.edu/~gthomcr/ME302/documents/AccuracyofGravity.pdf> (date of application 20.01.2025).
27. Gladkikh I.I., Simonenkov S.V., Mikhailov V.I., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B., Bargan O.G., Checha O.P. Prospects for the development of operational oceanography in Ukraine.
28. Voitenko S.P., Uchitel I.L., Yaroshenko V.N., Kapochkin B.B. Geodynamics. Fundamentals of kinematic geodesy, Odessa: Astroprint, 2007. — 259 p.
29. Torbinsky A.V. The Indian Ocean Dipole: Formation Mechanism and Influence on Regional Climate Anomalies, 2022 abstract, URL: <https://www.dissercat.com/content/indookeanskii-dipol-mekhanizm-formirovaniya-i-vliyanie-na-regionalnye-klimatesheskie-anomali> (date of application 20.01.2025).
30. Bureau of Meteorology of Australian Government. URL: <http://www.bom.gov.au/climate/about/australian-climate-influences/images/ioid-neutral.png> (date of application 20.01.2025).
31. Iizuka, S. The Indian Ocean SST dipole simulated in a coupled general circulation model. *Geophysical Research Letters*. Vol. 27, issue 20. 2000. P. 3369-3372. DOI 10.1029/2000GL01148.
32. Webster, P. J. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-1998. *Nature*. Vol. 401. 1999. P. 356-360. DOI 10.1038/43848.
33. Nasa gravity map of earth URL:<https://mapofsouthwesternontario.pages.dev/posts/nasa-gravity-map-of-earth> (date of application 20.01.2025).
34. G., Lavallée D., Clarke P., Nurutdinov K. A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected. *Science*. 2001 Dec 14; 294(5550):2342-5. doi: 10.1126/science.1065328.
35. When did the “Global Energy Leap” begin? URL: <https://studfile.net/preview/7011506/page:19/> (date of application 20.01.2025).
36. Cox, C., and B. F. Chao, Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998, *Science*, 2002, pp. 831–833. .
37. A first analysis of the mean motion of CHAMP. URL: <https://adgeo.copernicus.org/articles/1/95/2003/> (date of application 20.01.2025).
38. Climate Observations (Notes From Bob Tisdale on Climate Change and Global Warming. URL: <http://bobtisdale.blogspot.com/2009/08/enso-is-major-component-of-sea-level.html> (date of application 20.01.2025).
39. Long-term forecast of the dynamics of volcanic activity of the Earth. URL: <https://studfile.net/preview/7011506/page:26/> (date of application 20.01.2025).
40. Kapochkina A.B., Kapochkin B.B. Influence of the gas component of the fluid regime of the lithosphere in water areas on atmospheric processes. Electronic scientific publication Almanac Space and Time. V. 4. Issue. 1 2013 22 p. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-gazovoy-sostavlyayushey-flyuidnogo-rezhima-litosfery-v-rayonah-akvatoriy-na-atmosfernye-protsessy> (date of application 20.01.2025).
41. NATIONAL WEATHER SERVICE CPC: Climate Assessment for 1994-1998 U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE National Weather Service National Meteorological Center Climate Analysis Center [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/assessments/assess\\_98/](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/assessments/assess_98/) (date of application 20.01.2025).
42. Sidorenkov N.S. Lunar-solar tides and atmospheric processes. URL: <http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/chteniya/sagit2009/sidorenkov.pdf> (date of application 01.02.2025).
43. Sidorenkov N.S. Interannual oscillations of the atmosphere-ocean-Earth system. *Physics*. No. 25/98 .
44. Sidorenkov N.S., Sumerova K.A. Geodynamic causes of decadal climate changes. Proceedings of the Hydrometeorological Center. 2012. Issue. 348, pp. 195–214.
45. Sidorenkov N.S. Atmospheric processes and the Earth's rotation. *Gidrometeoizdat*. 2002. 366 p.

46. Earth orientation center. URL: <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=C04&lang> (date of application 01.02.2025).

*Tomchakovsky G. G., Kapochkina M.B.*

### **RESULTS OF THE STUDY OF THE CAUSES OF THE MONSOON WIND OVER THE INDIAN OCEAN GRAVITY ANOMALY**

*The tropical zone of the World Ocean is characterized by the practical absence of spatiotemporal changes in insolation and, accordingly, the absence of seasons, the absence of baric gradients, and therefore, geostrophic winds, which creates favorable weather and climatic conditions for shipping. The exception is the water area of the northern part of the Indian Ocean with a monsoon climate, where a summer season with powerful winds and waves and showers is formed every year. Ensuring the safety of navigation in regions with a monsoon-type climate requires determining the causes of monsoon winds for the further development of numerical forecasts of adverse weather conditions. The reasons for the annual cessation of trade wind circulation in the Indian Ocean region are analyzed. At the numerical level, the hypothesis of the impact on the monsoon climate of the Indian Ocean region of a positive anomaly of free fall acceleration that occurs in June-August under conditions of an increase in the angular velocity of the Earth's rotation around its axis is tested.*

**Keywords:** *shipping safety, navigational hydrometeorology, monsoon climate, gravimetry, rotational effect, physical and statistical modeling.*

*Стаття прийнята 02.03.2025*

© Кириллова О.В., Ларіна І.М.

## КРИТЕРІЇ ТА УМОВИ СТАЛОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМІНАЛУ ПОРТУ

Метою дослідження є розробка критеріїв та умов сталого функціонування контейнерних терміналів порту для забезпечення їх ефективності та конкурентоспроможності, а також для забезпечення сталого функціонування транспортної галузі країни. Результатом дослідження є основні теоретичні положення щодо визначення сутності, критеріїв та умов сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу як основи сталого функціонування терміналу. Встановлено, що під сталим функціонуванням виробничого підприємства розумітимемо практичну відповідність фактичних показників функціонування заданим (плановим) під впливом різних факторів як зовнішнього, так і внутрішнього середовища. Для виробничих підприємств, чия діяльність базується на відповідній виробничій системі, з використанням технічних засобів та обладнання (наприклад, для терміналів морських торгових портів), базисом для сталого функціонування є насамперед забезпечення необхідних виробничих параметрів – продуктивності, пропускної спроможності тощо. Тобто базою задля забезпечення сталого функціонування підприємства, перш за все, є стійке функціонування його техніко-технологічної системи. Визначено основні критерії сталого функціонування: забезпечення з певною ймовірністю показників функціонування в межах коридору стійкості, у разі порушення сталого функціонування – забезпечення з певною ймовірністю повернення до сталого стану у заданий час та наявність доступу до необхідних фінансових ресурсів. Сформульовано умови сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу на базі декомпозиції пропускної спроможності терміналу.

Формалізація умов сталого функціонування техніко-технологічної системи підприємств контейнерного терміналу здійснена з використанням теорії ймовірностей, враховуючи, що продуктивність технологічного обладнання, пропускна спроможність причалів і терміналу в цілому змінюються під впливом множини внутрішніх і зовнішніх факторів, частина з яких має випадковий характер. Викладені результати складають теоретичну базу для подальшої розробки методів та засобів забезпечення сталого функціонування морських контейнерних терміналів.

**Ключові слова:** контейнерні перевезення, контейнерний термінал, ймовірність, пропускна спроможність, технологічне обладнання, експлуатаційна робота, перевантаження, ризик, інфраструктура, технологічні процеси, процес доставки, порт, логістика

**Постановка проблеми.** Щорічне зростання обсягів морських перевезень, у тому числі, вантажів у контейнерах, призводить до зростання навантаження на контейнерні термінали, які є утворюючими елементами у системі морських контейнерних перевезень. Контейнерні термінали являють собою проміжні вузли глобальних ланцюгів поставок, що з'єднують центри виробництва і споживання. Зростання розміру суден-контейнеровозів, розвиток інформаційних технологій призводять до нових вимог до продуктивності терміналів та організації їх роботи. Це обґрунтовує стійкість тенденції автоматизації та цифровізації терміналів, створення SMART портів та терміналів [1-5]. Крім того, глобальний тренд відповідального розвитку вимагає нових технологій в системі морських перевезень [6,7] з метою зменшення екологічного навантаження від морського транспорту на довкілля. Також сучасна система морських контейнерних перевезень характеризується високим рівнем невизначеності контейнеропотоків [8,9], що пояснюється, перш за все, впливом світових політичних подій на систему міжнародної торгівлі та відповідних перевезень.

При цьому життєво важливим для країни є наявність у портів та терміналів виробничих ресурсів достатніх для переробки визначеного обсягу вантажів. Стале функціонування морських контейнерних

терміналів забезпечує ефективність контейнерних перевезень, що сприяє розвитку транспортної галузі країни та підвищенню конкурентоспроможності українських портів. Це дозволить гарантувати безперебійність роботи, якість технологічних процесів, ефективність та безпеку праці.

Після закінчення війни портові термінали країни будуть працювати в складних умовах з урахуванням негативного впливу як можливого дефіциту та збоїв у електропостачанні, так й можливих відмов перевантажувальної техніки з урахуванням неможливості її глобального оновлення. Таким чином, всі ці фактори призведуть до складання умов, до яких необхідно підготуватися та мати ефективний теоретичний базис для організації такої роботи портових контейнерних терміналів, яка забезпечить ефективність в рамках їх сталого функціонування.

**Аналіз літератури.** На функціонування системи можна дивитися з різних точок зору – у сучасній науковій літературі розглядаються поняття «ефективне функціонування», «оптимальне функціонування», «безперебійне функціонування» та т.п. Це відповідає основним характеристикам функціонування системи, до яких відноситься ефективність, надійність, якість управління, перешкодозахищеність, стійкість і ступінь складності тощо [10]. «Стале функціонування» є також одним з варіантів розгляду функціонування та пов'язано з такою характеристикою системи як «стійкість». Слід зазначити, що така властивість системи як «стійкість» розглядається з різних точок зору - узагальнюючи варіанти «стійкості», у [11], наприклад, розглядаються: стійкість економічна, стійкість операційна, стійкість фінансова та т.п.

Згідно загальноприйнятого визначення, стійкість системи – це можливість забезпечувати задані параметри за умов різного негативного впливу внутрішніх і зовнішніх факторів. Такий підхід є універсальним і може бути застосований до систем будь-якої природи. Згідно думок деяких авторів [12] система є стійкою, якщо навіть після «збою» у процесі її функціонування та виходу параметрів системи за певні межі, система здатна у мінімальні терміни повернутися до нормального режиму функціонування.

У сучасній літературі крім терміну «стале функціонування» використовується також термін «функціональна стійкість». Функціональна стійкість – більш комплексне поняття, яке включає в собі поняття надійності, живучості та відмовостійкості [13]. На базі аналізу джерел, можна зробити висновок про те, що термін «стале функціонування» є більш узагальнюючим для систем будь-якої природи, характеризуючи таку характеристику функціонування як «стійкість». «Функціональна стійкість» [11-14] є більш конкретним проявом сталого функціонування для технічних (інформаційних) систем. Також слід зазначити, що «стале функціонування» передбачає будь-який часовий інтервал розгляду та різноманітні впливи; на відміну від «функціональної стійкості», що передбачає майже постійний вплив негативних факторів – наприклад, погодних умов на технічну систему, та більш близько до надійності, як це зазначено у [13]. Для інформаційних систем функціональна стійкість відноситься до властивості системи залишатися працездатною та виконувати свої функції незалежно від різних внутрішніх або зовнішніх впливів, таких як помилки в роботі, несправності обладнання, збоїв в програмах або кібератаки. Вона може бути досягнутою навіть за умови відмови якоїсь частини обладнання чи складової, головне – збереження працездатності системи й виконання задач за призначенням [14].

Для підприємств, які пов'язані з певною виробничою системою та відповідним комплексом технічних засобів та технологічного обладнання, стале функціонування визначається можливістю забезпечення певного рівня виробничої потужності, що для контейнерних терміналів характеризується пропускною спроможністю.

На основі аналізу сучасних публікацій можна стверджувати, що більшість джерел, присвячених «сталому функціонуванню», як правило, розглядають в якості об'єкту дослідження інформаційні системи, зокрема керуючі системи, такі як бортові комплекси літаків і кораблів [15].

У дослідженні [16] подальшого розвитку набули теоретичні основи управління роботою флоту, зокрема уточнено трактування та визначення поняття «сталість» в аспекті управлінської діяльності судноплавного підприємства. Водночас уперше виявлено та систематизовано можливі стани судноплавної компанії внаслідок її взаємодії із зовнішнім середовищем, а також формалізовано феномен рівноваги в її експлуатаційній діяльності з точки зору статички та динаміки. Це сприяє

вирішенню питань, пов'язаних із визначенням закономірностей взаємного впливу транспортних систем і зовнішнього середовища.

Попри те, що концепція сталого функціонування може застосовуватися до всіх видів систем, вона майже не розглядається щодо підприємств портової сфери. Забезпечення необхідного рівня пропускної спроможності терміналів залишається недостатньо дослідженим. Враховуючи практичні потреби та відсутність відповідної теоретичної бази, дослідження сталого функціонування контейнерних терміналів є актуальним.

**Метою дослідження** є розробка критеріїв та умов сталого функціонування контейнерних терміналів порту для забезпечення їх ефективності та конкурентоспроможності, а також для забезпечення сталого функціонування транспортної галузі країни.

#### **Основні результати дослідження.**

**Узагальнене формування критеріїв сталого функціонування виробничого підприємства.** Під сталим функціонуванням підприємства розумітимемо практичну відповідність фактичних показників його функціонування заданим (плановим) при впливі різних факторів як зовнішнього, так і внутрішнього середовища. Практична відповідність означає знаходження показників у так званому «коридорі стійкості», який передбачає допустиме відхилення в гірший бік фактичних показників від заданого рівня на певну допустиму величину:

$$R^f \geq R' - \Delta R', \quad (1)$$

де  $R^f$  - фактичний показник функціонування,  $R'$  - заданий рівень показника функціонування,  $\Delta R'$  - допустиме відхилення від заданого рівня функціонування.

Коли мова йде про стратегічно важливі галузі господарства, наприклад, енергетичний комплекс, металургійні підприємства, то під сталим функціонуванням розуміють спроможність виробляти продукцію в установлених номенклатурі та обсягах (або виконувати свої функції). Якщо слідувати такому підходу, то пріоритетним показником діяльності (функціонування) підприємства є обсяги виробництва або виробничі потужності, виходячи з того, що головна функція підприємства – виробництво певної продукції (надання послуг, наприклад, транспортних) в встановлених обсягах. Для транспортних підприємств головна функція – виконання транспортної роботи, тому специфічні показники виробничих потужностей – «пропускна здатність» для транспортних терміналів та «провізна здатність» для перевізників.

Забезпечення сталого функціонування можливо тільки з певною ймовірністю  $P_\alpha$ , отже:

$$P(R' - R^f \leq \Delta R') \geq p_\alpha. \quad (2)$$

Можна говорити про стійкість функціонування підприємства, якщо  $p_\alpha \geq p^*$ , де  $p^*$  - ймовірність, прийнята як «значна» для даної ситуації, як правило, у подібних дослідженнях (наприклад, [8 ]) приймається на рівні  $p^* = 0,85 - 0,95$ .

На рис.1. в момент часу  $t = T^m$  значення показника діяльності  $R^f$  виходить за межі «коридору стійкості», порушається умова (1) та маємо  $R^f < R' - \Delta R'$ , отже відхилення необхідного значення показника функціонування від встановленого  $R'$  складає більш, ніж припустиме значення  $\Delta R'$ . Але за період часу  $\Delta T^r$  показник сталого функціонування повернувся до припустимого рівня. Отже, можна говорити про стале функціонування підприємства, якщо  $\Delta T^r$  відповідає умові:

$$\Delta T^r \leq T^*, \quad (3)$$

де  $T^*$  - допустимий час для повернення в сталий стан, задається для кожного підприємства з урахуванням його специфіки та стану зовнішнього середовища.

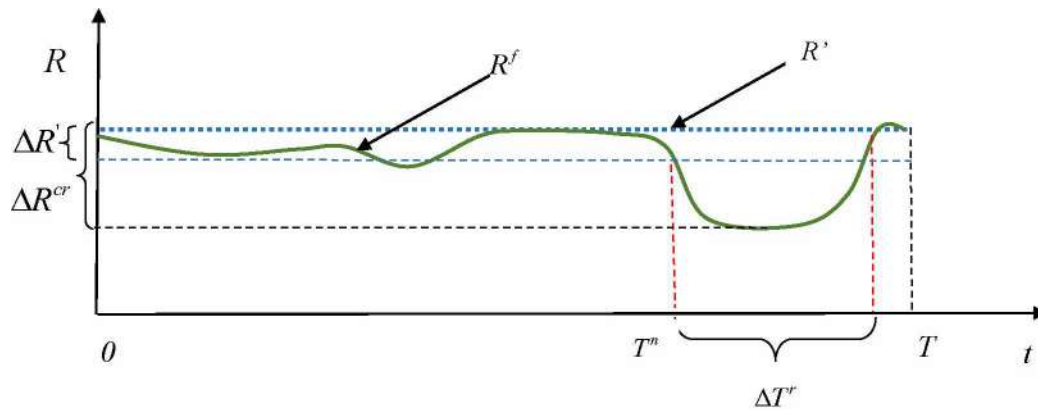


Рисунок 1 – Динаміка показника функціонування виробничого підприємства

Слід зазначити, що в контексті розгляду сталого функціонування підприємства важливим є не тільки сам факт повернення до певних показників, а й час  $\Delta T^r$ , за який підприємство може повернутися до цього показника, як це показано на прикладі на рис.1. Тому порівнюючи з точки зору сталого функціонування задане підприємство з іншими подібними, більш сталим можна вважати підприємство, якому потрібен менший час для повернення до певного рівня результатів функціонування при тих самих факторів, що впливають.

З урахуванням ймовірнісної природи часу повернення до сталого стану, за аналогією з (2) можна сформулювати умову:

$$P(\Delta T^r \leq T^*) = p_\beta, \quad (4)$$

де  $p_\beta \geq p^*$  - ймовірність того, що час повернення в стан сталого функціонування не перевищує заданий рівень  $T^*$ .

Необхідно звернути увагу на те, що час повернення до сталого функціонування  $\Delta T^r$  залежить від багатьох факторів, перш за все, розміру відхилення показників сталого функціонування  $R^f$  від встановленого  $R'$  - чим більше  $\Delta R = R' - R^f$ , тим більше часу, як правило, необхідно для повернення у сталий стан.

Отже, під впливом множини факторів негативного характеру сталий стан підприємства може порушуватися, що призводить до виходу показників за межі коридору стійкості, наприклад, до відхилення від необхідного рівня на величину  $\Delta R > \Delta R'$ , що трактується як порушення сталого функціонування. Проте певні заходи можуть вивести підприємство на необхідну траєкторію та повернути до «коридору стійкості». Або негативні фактори довкілля припиняють свій вплив і підприємство також повертається до сталого стану.

Отже, висновок: стає функціонування – це не тільки дотримання певних показників функціонування, а також наявність властивості у системи повертатися у сталий стан за припустимий проміжок часу, якщо цей стан був порушений. У більшості випадків повернення до сталого стану потребує матеріальних витрат.

Фактори впливу на стає функціонування – зовнішні та внутрішні – мають різну природу та основна їх сукупність залежить від специфіки діяльності підприємства. Наприклад, для деяких сфер к основним факторам впливу можна віднести постачальників та матеріали (ресурси), які є предметом постачань, у тому числі, їх обсяг та якість. Наприклад, для транспортної сфери постачання палива та інших енергоресурсів є життєвоважливим, тому що за умов відсутності даних ресурсів, підприємства не можуть функціонувати. Погодні умови та кліматичні колапси також впливають на стан, наприклад, перевантажувальної техніки у порту, або транспортних засобів, що може призвести до такого їх стану, при якому вони не можуть виконувати роботу, отже підприємство не може забезпечити необхідні обсяги виконання робіт. Тем не менш, якщо, наприклад, пошкоджено техніка та обладнання, а підприємство спроможне за стислий час орендувати або придбати нову техніку, чи відремонтувати пошкоджену, то

це дозволяє повернутися підприємству у нормальний стан функціонування, забезпечуючи встановлений та необхідний рівень обсягів виробництва.

Розглядаючи відхилення  $\Delta R$  показника функціонування від встановленого рівня, слід зауважити, що кожному підприємству відповідає певний рівень  $\Delta R^{cr}$ , який можна вважати «критичним відхиленням» від сталого стану, отже при

$$R' - R^f > \Delta R^{cr} \quad (5)$$

повернення до сталого стану 1) практично неможливо взагалі - можливо з ймовірністю  $p_{cr} \rightarrow 0$ ; 2) практично неможливо за припустимий час  $T^*$ .

Витрати матеріальних ресурсів  $E$ , які необхідні для повернення к сталому стану, як правило, залежать від рівня відхилення від сталого стану  $\Delta R = R' - R^f$ , а також від факторів, які призвели до даного відхилення.

Отже,  $E(\Omega_A, \Delta R)$ , де  $\Omega_A \subset \Omega$  - множина факторів - підмножина множини  $\Omega$ , яке визначає вплив певних факторів з множини  $\Omega$  можливих факторів впливу, які привели до порушення сталого функціонування. Слід зазначити, що наявність ресурсів у розмірі  $E(\Omega_A, \Delta R)$  або можливість їх отримання у стислий термін є необхідною умовою для забезпечення повернення у стає функціонування. З іншого боку, наявність даних ресурсів  $E(\Omega_A, \Delta R)$  не є достатньою умовою для повернення у стан сталого функціонування, тому що ресурси потребують адекватного використання у контексті застосування ефективних заходів. Саме тому ресурси є необхідною, але не достатньою умовою.

Таким чином, в якості критеріїв сталого функціонування виробничого підприємства пропонується наступна сукупність, яка наведена на рис. 2.



Рисунок 2 – Критерії сталого функціонування виробничої системи

**Умови сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу.** На пропускну здатність терміналу впливають безліч факторів:

- параметри підхідних каналів;
- кількість, конструкція, технічний стан та глибини причалів терміналу;
- ступінь технічного оснащення (кількість, типи, вантажопідйомність перевантажувальних машин та пристроїв);
- кількість, місткість, конструкція та розташування складів;

- технологія перевантажувальних робіт тощо.

З урахуванням викладеного вище та враховуючи специфіку морських контейнерних терміналів, можна вважати, що основні складові їх сталого функціонування: необхідний стан техніко-технологічної системи; наявність ресурсів необхідної кількості та якості (енергоресурси, людські ресурси); необхідний рівень глибин біля причалів; необхідний технічний стан причалів. Але ж основу для сталого функціонування терміналу забезпечує, перш за все, його техніко-технологічна система, яка складається з сукупності технічних засобів (перевантажувального обладнання різних категорій), що формують технологічні лінії для проведення вантажних робіт.

Декомпозиція пропускної спроможності контейнерного терміналу з урахуванням результатів структурно-функціонального аналізу дозволяє уявити її формування у вигляді наступної схеми (рис.3). Отже, пропускна спроможність терміналу  $R(X, t)$  формується як поєднання продуктивності (пропускної спроможності) технологічного обладнання причалів:

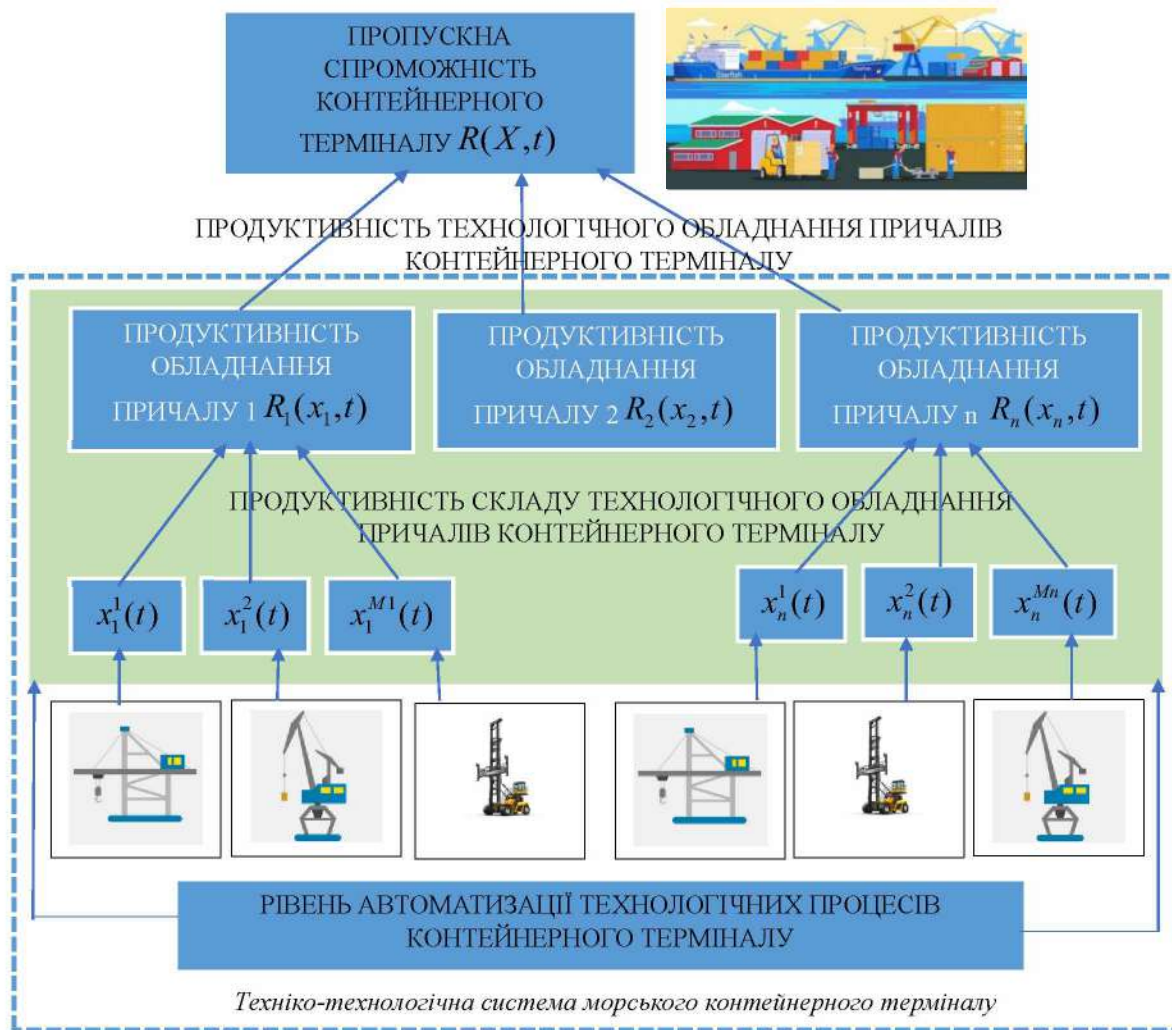


Рисунок 3 – Пропускна спроможність контейнерного терміналу як інтегральна характеристика відповідної техніко-технологічної системи

$$R(X, t) = \sum_{i=1}^n R_i(x_i, t), \tag{6}$$

де  $R_i(x_i, t), i = \overline{1, n}$  - пропускна спроможність (продуктивність технологічного обладнання)  $i$ -го причалу;  $x_i, i = \overline{1, n}$  - параметри, які характеризують продуктивність технологічного обладнання причалу;  $X = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$  - параметри, які характеризують елементи техніко-технологічної системи терміналу – складові технологічного обладнання. В свою чергу, продуктивність технологічного обладнання причалів залежить від продуктивності відповідного технологічного устаткування:

$$R_i(x_i, t) = C_i(x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)), \quad (7)$$

де  $C_i$  - функція, яка описує залежність пропускної спроможності  $i$ -го причалу контейнерного терміналу від продуктивності складу технологічного обладнання та устаткування,  $M_i$  - кількість обладнання на  $i$ -причалі,  $x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)$  - відповідно, продуктивності технологічного устаткування причалу. Таким чином, сукупність параметрів  $U_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}$  визначає пропускну спроможність контейнерного терміналу.

Отже, з урахуванням викладеного вище, шляхом декомпозиції отримуємо наступні умови сталого функціонування портового контейнерного терміналу як техніко-технологічної системи:

$$P((R'_i(x'_i, t) - R^f_i(x^f_i, t) \leq \Delta R'_i(t)) \geq p_{\gamma i}, i = \overline{1, n}, t = 1, 2, 3, \dots, T, \quad (8)$$

де  $R'_i, \Delta R'_i$ , відповідно, планова продуктивність (пропускна спроможність) та її припустиме зменшення для  $i$ -ого причалу,  $R^f_i$  - фактична пропускна спроможність. Умови (8) інтерпретуються наступним чином: у кожний момент часу ймовірність того, що пропускна спроможність причалу терміналу вище, ніж певний рівень  $p_{\gamma i}$ , який можна вважати достатнім для забезпечення сталого функціонування. Отже:

$$P((R'(X', t) - R^f(X^f, t) \leq \Delta R'(t)) = \prod_{i=1}^n P((R'_i(x'_i, t) - R^f_i(x^f_i, t) \leq \Delta R'_i(t)) \geq \prod_{i=1}^n p_{\gamma i} \geq p_{\alpha},$$

$$i = \overline{1, n}, t = 1, 2, 3, \dots, T. \quad (9)$$

В свою чергу, забезпечення виконання (8) та (9) потребує виконання аналогічних умов для параметрів, які характеризують продуктивність кожного елемента зі складу техніко-технологічного обладнання кожного причалу. Слід зазначити, що ключова роль при забезпеченні певного рівня продуктивності технологічних комплексів причалів належить порталним контейнерним перевантажувачам, тому що саме вони здійснюють безпосередньо процес розвантаження/навантаження суден. Інше обладнання та устаткування має більш мобільний характер, тому, якщо для окремих їх елементів порушується стале функціонування, це, як правило, не призводить до порушення сталого функціонування технологічного комплексу причалу та терміналу у цілому. Тому для забезпечення виконання умови (8), перш за все, необхідним є забезпечення сталого функціонування порталних контейнерних перевантажувачів.

З урахуванням даного факту умови сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу слід звужити, не розглядаючи усі елементи, а тільки основні, у даному випадку - причальних контейнерних перевантажувачів. Нехай серед елементів множини  $U_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}$  виділено підмножину параметрів, які характеризують продуктивність порталних контейнерних перевантажувачів. Не обмежуючи загальності, приймаємо:

$$U_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\} \subset U_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}, \quad (10)$$

де  $L_i, i = \overline{1, n}$  - кількість причальних контейнерних перевантажувачів  $i$ -го причалу. До даної множини також можна додати ще тилові контейнерні перевантажувачі, якщо вони для даного терміналу грають також вагомий роль та досить сильно впливають на пропускну спроможність терміналу. У будь-якому випадку, стале функціонування терміналу на практиці залежить не від усіх складових техніко-технологічної системи, а тільки від її підмножини, яку необхідно визначити з урахуванням особливостей терміналу. У такому разі можна сформулювати наступну схему (рис.4) на базі рис.3, яка відображає концепцію формування множини умов сталого функціонування техніко-технологічної системи морського контейнерного терміналу.

Отже, дані умови:

$$P((x_i^k(t) - x_i^f(t) \leq \Delta x_i^k(t)) \geq p_{ik}, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}, t = 1, 2, \dots, T, \quad (11)$$

де  $x_i^k(t)$  - планова продуктивність  $k$ -го устаткування з множини основних;  $x_i^f(t)$  - фактична продуктивність  $k$ -го устаткування з множини основних;  $\Delta x_i^k(t)$  - припустиме відхилення фактичної продуктивності  $k$ -го устаткування з множини основних від запланованого рівня;  $p_{ik}$  - ймовірність забезпечення необхідного рівня продуктивності.

Наприкінці слід зазначити, що поняття «стале функціонування» не тотожно поняттю «надійність», яке характеризує здатність до безвідмовної роботи протягом заданого проміжку часу у визначених умовах. Стале функціонування передбачає, перш за все, забезпечення певного рівня параметрів виробництва. Тому якщо навіть відбудеться «відмова» окремих елементів транспортно-технологічної системи, то у системи є можливість продовжувати виконання функції у певних обсягах завдяки наявним резервам, або можливості повертатися протягом певного періоду часу до необхідного стану (подолання відмови). Саме тому, при формуванні умов сталого функціонування прийнято, що відповідні параметри можуть відрізнятися від планованих, але на певну величину. Слід також зауважити, що коли визначається продуктивність устаткування  $x_i^k(t)$  (наприклад, портальних перевантажувачів), то, як правило, не розглядається їх використання протягом 24 годин за добу, отже приймається коефіцієнт використання на рівні 0,7-0,8, що також формує певний запас продуктивності та, як наслідок, запас пропускну здатності технологічних комплексів причалу та терміналу у цілому.

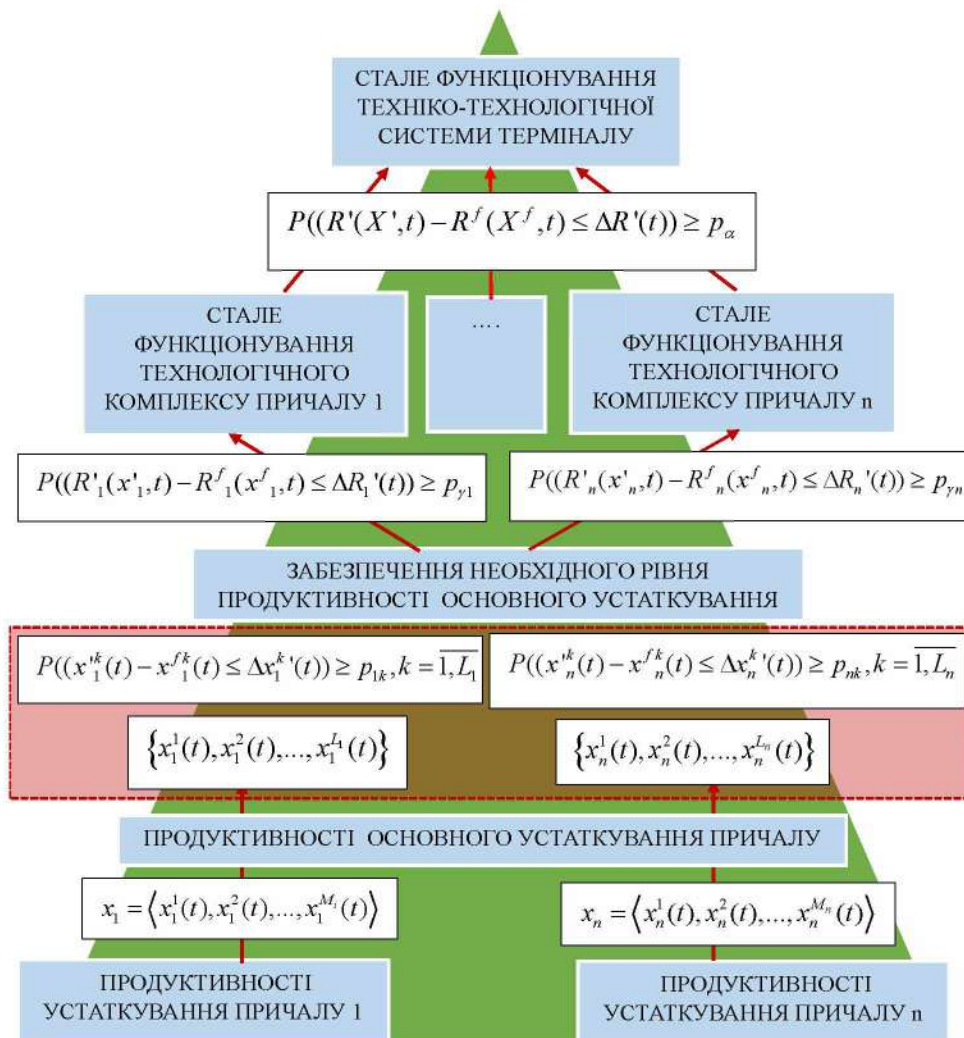


Рисунок 4 – Концепція формування множини умов сталого функціонування техніко-технологічної системи морського контейнерного терміналу

Для виробничих підприємств, чия діяльність базується на відповідній виробничій системі, з використанням технічних засобів та обладнання (наприклад, для терміналів морських торгових портів), базисом для сталого функціонування є насамперед забезпечення необхідних виробничих параметрів – наприклад, продуктивності, пропускної спроможності тощо. Тобто базою задля забезпечення сталого функціонування підприємства, перш за все, є стійке функціонування його техніко-технологічної системи.

Визначено основні критерії сталого функціонування: забезпечення з певною ймовірністю показника (показників) функціонування в рамках коридору стійкості, у разі порушення сталого функціонування забезпечення з певною ймовірністю повернення до сталого стану у заданий час та наявність доступу до необхідних фінансових ресурсів.

Сформульовано умови сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу на базі декомпозиції пропускної спроможності терміналу. Формалізація умов сталого функціонування техніко-технологічної системи підприємств контейнерного терміналу здійснена з використанням теорії ймовірностей при припущенні, що продуктивність технологічного обладнання, пропускна спроможність причалів та терміналу в цілому є випадковими величинами, на рівень яких впливає множина факторів як внутрішніх, так й зовнішніх. Викладені результати складають теоретичну базу для подальшої розробки методів та засобів забезпечення сталого функціонування морських контейнерних терміналів.

**Висновки.** В рамках даного дослідження сформульовані основні теоретичні положення щодо визначення сутності, критеріїв та умов сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу як основи сталого функціонування терміналу. Під сталим функціонуванням виробничого підприємства розумітимемо практичну відповідність фактичних показників функціонування заданим (плановим) під впливом різних факторів як зовнішнього, так і внутрішнього середовища.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Kyryllova O., Kyryllova V. The theoretical foundations of spatial and functional evolution of ports. *Транспортні системи і технології*. 2022. 1. 170-189. DOI: 10.32703/2617-9040-2022-40-15.
2. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. «Smart Ports» як інноваційний вектор технологічної трансформації та цифровізації портів: від ідеї до концепції та практичної реалізації. *Розвиток транспорту*. 2024. № 4(23). 77-95. DOI: [10.33082/td.2024.4-23.07](https://doi.org/10.33082/td.2024.4-23.07).
3. Решетков Д.М., Онищенко С.П., Павлова Н.Л., Кириллова В.Ю. Сутність, переваги та проблеми автоматизації контейнерних терміналів морських портів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73) № 2. С. 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/33
4. Kon W.K., Rahman N.S., Hanafiah R.M. Hamid S.A. The global trends of automated container terminal: A systematic literature review. *Maritime Business Review*. 2020. 6. P. 206–233
5. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Діджиталізація як шлях до забезпечення екологічності, безпеки і сталого функціонування морської галузі. 2-а міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології», Харків, 27-9 квітня 2021 р.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 21-23.
6. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю., Магамадов О.Р. Поняття «Smart Port» у контексті глобальних тенденцій інтеграції інтелектуальних транспортних та інформаційних технологій у портовій індустрії. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 35(74), № 5, 2024. 81-87. DOI: [10.32782/2663-5941/2024.5.2/14](https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/14).
7. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю., Магамадов О.Р., Ромах В.Л. (2024). Smart port: новітні технології і міжнародний досвід їх упровадження. *Transport development*. 2024. С.62-74. DOI: 10.33082/td.2024.2-21.06.
8. Бондаренко Ю.А., Онищенко С.П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, Том 35 2024. (74), № 1. С. 139-146.
9. Берестенко В., Онищенко С. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. Vol. 1(12), P. 118-128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10

10. Гнатієнко О., Дружинін В. Сучасні тенденції забезпечення функціональної стійкості складних організаційних систем. *Управління розвитком складних систем*. 2025. (60), 13–17. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.13-17
11. Висоцька І.Б. Теоретичні підходи до поняття «стійкість системи». *Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ. Серія економічна*. 2017. Випуск 2. С. 13-23.
12. Mogylevych D., Sboiev R. Analysis of functional safety of electronic communication system equipment. *Collection Information technology and security*. 2023. N11. 96-105. DOI: 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283816.
13. Барабаш О., Макачук А., Саланда І. Дослідження ймовірнісного показника функціональної стійкості розподілених інформаційних систем. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. N1. С. 45–50. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-6
14. Собчук В.В. Основи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем підприємств в умовах впливу дестабілізуючих факторів: монографія / В.В. Собчук, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко. К: Міленіум. 2022. 272 с.
15. Калашник Г., Калашник-Рибалко М. Ознаки та критерії функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання сучасного повітряного судна та перспективні напрямки його розвитку. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. С. 7-15. DOI: 10.30748/zhups.2021.68.01.
16. Мелешенко Катерина Сергіївна. Забезпечення сталого функціонування вантажокопасажирських поромів: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.01. - Одеса, 2018. 236 с.

#### REFERENCES

1. Kyryllova O., Kyryllova V. The oretical foundations of spatial and functional evolution of ports. *Transport systems and technologies*. 2022. 1. 170-189. DOI: 10.32703/2617-9040-2022-40-15.
2. Kyryllova O.V., Kyryllova V.Y. "Smart Ports" as an innovative vector of technological transformation and digitalization of ports: from idea to concept and practical implementation [«Smart Ports» yak innovatsiynnyy vektor tekhnolohichnoyi transformatsiyi ta tsyfrovizatsiyi portiv]. *Transport Development*. 2024. No. 4(23). 77-95. DOI: 10.33082/td.2024.4-23.07. [in Ukrainian]
3. Reshetkov D.M., Onyshchenko S. P., Pavlova N. L., Kyryllova V. Y . The essence, advantages and problems of automation of container terminals of sea ports. [Sutnist', perevahy ta problemy avtomatyzatsiyi konteynerykh terminaliv mors'kykh portiv]. *Scientific notes of the Tavria National University V.I. Vernadsky [Vcheni zapysky Tavriys'koho natsional'noho universytetu imeni V.I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky]*. 2023. 34 (73) № 2. P. 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/3[in Ukrainian]
4. Kon W.K., Rahman N.S., Hanafiah R.M. Hamid S.A. The global trends of automated container terminal: A systematic literature review. *Maritime Business Review*. 2020. 6. P. 206–233
5. Kirillova O.V., Kirillova V.Yu., Magamadov O.R., Romakh V.L. Smart port: latest technologies and international experience of their implementation. [Smart port: novitni tekhnolohiyi i mizhnarodnyy dosvid yikh uprovdzhennya] *Transport development*. 2024. P.62-74. DOI: 10.33082/td.2024.2-21.06. [in Ukrainian]
6. Kyryllova O.V., Kyryllova V.Yu., Magamadov O.R. The concept of "Smart Port" in the context of global trends in the integration of intelligent transport and information technologies in the port industry [Ponyattya «Smart Port» u konteksti hlobal'nykh tendentsiy intehratsiyi intelektual'nykh transportnykh ta informatsiynykh tekhnolohiy u portoviy industriyi]. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences. Volume 35(74), No. 5, 2024. 81-87. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.5.2/14. [in Ukrainian]*
7. Kyryllova O.V., Kyryllova V.Yu., Magamadov O.R., Romakh V.L. Smart port: new technologies and international experience in their implementation [Smart port: novitni tekhnolohiyi i mizhnarodnyy dosvid yikh uprovdzhennya.]. *Transport development*. 2024. C.62-74. DOI: 10.33082/td.2024.2-21.06. [in Ukrainian]

8. Bondarenko Yu. A., Onyshchenko S. P. Structure and uncertainty of container flows in the maritime transport system [Struktura ta nevyznachenist' konteyneropotokiv u systemi mors'kykh perevezen'] Academic notes of the Tavri National University V.I. Vernadskyi, Series: Technical Sciences, Volume 35 (74), No. 1, 2024, pp. 139-146. [in Ukrainian]
9. Berestenko V., Onyshchenko S. Probability characteristics of multimodal delivery [Ymovirnisni kharakterystyky mul'tymodal'noyi dostavky]. Transport development. 2021. Vol. 1(12), P. 118-128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10 [in Ukrainian]
10. Hnatienko O., Druzhynin V. Modern trends in ensuring the functional stability of complex organizational systems [Suchasni tendentsiyi zabezpechennya funktsional'noyi stiykosti skladnykh orhanizatsiynykh system]. Management of the development of complex systems. 2025. (60), 13–17. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.13-17 [in Ukrainian]
11. Vysotska I.B. Theoretical approaches to the concept of "system stability" [Teoretychni pidkhody do ponyattya «stiykist' systemy»] []. Scientific Bulletin of the Lviv State University of Internal Affairs. Economic Series. 2017. Issue 2. P. 13-23 [in Ukrainian]
12. Mogylevych D. , Sboiev R. Analysis of functional safety of electronic communication system equipment. Collection Information technology and security. 2023. N11. 96-105. DOI: 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283816.
13. Barabash O., Makarchuk A., Salanda I. Research of the probabilistic indicator of the functional stability of distributed information systems [Doslidzhennya ymovirnisnoho pokaznyka funktsional'noyi stiykosti rozpodilenykh informatsiynykh system]. Measuring and computing devices in technological processes. 2024. N1. C. 45–50. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-6 [in Ukrainian]
14. Sobchuk V.V. Fundamentals of ensuring the functional stability of information systems of enterprises under the influence of destabilizing factors: monograph [Osnovy zabezpechennya funktsional'noyi stiykosti informatsiynykh system pidpryyemstv v umovakh vplyvu destabilizuyuchykh faktoriv:] / V.V. Sobchuk, O.V. Barabash, A.P. Musienko. K: Millennium. 2022. 272 p. [in Ukrainian]
15. Kalashnik G., Kalashnik-Rybalko M. Signs and criteria of functional stability of the integrated complex of on-board equipment of a modern aircraft and promising directions of its development [Oznaky ta kryteriyi funktsional'noyi stiykosti intehrovanoho kompleksu bortovoho obladnannya suchasnoho povitryanoho sudna ta perspektyvni napryamky yoho rozvytku.]. Collection of scientific papers of the Kharkiv National University of the Air Force. 2021. S. 7-15. DOI: 10.30748/zhups.2021.68.01 [in Ukrainian]

**Kyrylova O.V., Larina I.M.**

## **CRITERIA AND CONDITIONS OF PORT CONTAINER TERMINAL SUSTAINABLE OPERATION**

*The purpose of the study is to develop criteria and conditions for the sustainable operation of container terminals of the port to ensure their efficiency and competitiveness, as well as to ensure the sustainable operation of the country's transport industry. The result of the study is the main theoretical provisions on determining the essence, criteria and conditions for the sustainable operation of the technical and technological system of the container terminal as the basis for the sustainable operation of the terminal. It has been established that under the sustainable operation of a production enterprise we will understand the practical compliance of the actual indicators of operation with the specified (planned) under the influence of various factors of both the external and internal environment. For production enterprises whose activities are based on the corresponding production system, using technical means and equipment (for example, for terminals of sea commercial ports), the basis for sustainable operation is primarily ensuring the necessary production parameters - productivity, throughput, etc. p. That is, the basis for ensuring the sustainable operation of the enterprise, first of all, is the sustainable operation of its technical and technological system. The main criteria for sustainable operation are determined: ensuring with a certain probability the indicator (indicators) of operation within the stability corridor, in case of a violation of sustainable operation, ensuring with a certain probability a return to a stable*

*state at a given time and having access to the necessary financial resources. The conditions for the sustainable operation of the technical and technological system of the container terminal are formulated on the basis of the decomposition of the terminal's throughput capacity. The formalization of the conditions for the sustainable operation of the technical and technological system of container terminal enterprises is carried out using probability theory under the assumption that the productivity of technological equipment, the throughput capacity of berths and the terminal as a whole are random variables, the level of which is influenced by a set of factors, both internal and external. The presented results constitute a theoretical basis for further development of methods and means of ensuring the sustainable operation of marine container terminals.*

**Keywords:** *container transportation, container terminal, probability, throughput, technological equipment, operational work, overloading, risk, infrastructure, technological processes, delivery process, port, logistics*

*Стаття прийнята 10.03.2025*

© Монюшко М.М., Васалатій Н.В., Черой Л.І.

## АНАЛІЗ ШВИДКОСТЕЙ ТЕЧІЙ В ОКРЕМИХ РАЙОНАХ СЕРЕДЗЕМНОГО МОРЯ: РОЗРАХУНКИ ТА ЇХ ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО СУДНОВОДІННЯ

**Анотація.** Проведені дослідження, пов'язані з системою циркуляції вод та водообміном Середземного моря з океаном. На основі даних натурних експедиційних досліджень (температури та солоності морської води) Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) на різних розрізах розраховані та побудовані карти просторового розподілу швидкостей течій в акваторії Гібралтарської протоки та окремих районах Середземного моря. За допомогою рівняння водного балансу, використовуючи дані з атмосферного реаналізу ERA5 за опадами і випаровуванням, проведена оцінка об'ємів водних мас, які надходять з Північної Атлантики в море та витікають в океан з моря. Показано, що така двошарова система течій впливає на інтенсивність поверхневих течій в Гібралтарській протоці. Розглянута дія траверсної течії на судно у самій вузькій частині Гібралтарської протоки, де швидкості течії досягають максимальних значень.

**Ключові слова.** Середземне море, Гібралтарська протока, швидкості течій, водний баланс, океан, водні маси.

**Вступ.** Середземне море являє собою не тільки унікальний за гідрологічними властивостями басейн, а також має дуже важливе стратегічне значення, оскільки об'єднує Європу, Азію та Африку. Через Середземне море проходять найважливіші морські канали та протоки, такі як Суецький канал, Гібралтарська протока, Босфор та Дарданелли. Ці водні шляхи поєднують Атлантичний океан з Індійським і Тихим океанами. Це робить його ключовим регіоном для міжнародної торгівлі та морського судноплавства. Вивчення морських шляхів, зокрема гідрологічного режиму окремих районів Середземного моря є важливим для забезпечення безпечного та ефективного руху суден. Дана стаття присвячена дослідженню циркуляції вод в Гібралтарській протоці та окремих районах Середземного моря, а саме аналізу розрахунків швидкостей течій, що має важливе значення для оцінки впливу течії на маневрені характеристики судна. Також течії можуть відігравати важливу роль у поширенні забруднюючих речовин. Такі дослідження течій дозволяють мінімізувати негативний вплив судноплавства для запобігання або мінімізації екологічних збитків екосистеми моря. Дослідження гідрологічного режиму Середземного моря, зокрема течій мають ключове значення для забезпечення безпеки, ефективності та стійкості судноплавства.

**Аналіз останніх досліджень.** Сучасний аналіз літератури гідрологічного режиму Середземного моря включає вивчення різних аспектів гідрофізичних, гідрохімічних процесів, включаючи динаміку течій, температурні зміни, солоність морської води та інші параметри, які впливають на екосистему моря. Існує велика кількість досліджень, присвячених цим питанням, у тому числі роботи, засновані на даних з 60-х років, коли розпочалася активна розробка гідрологічних досліджень у Середземному морі, основну роль цих досліджень відігравали іноземні вчені. Сьогодні активно вивчають вплив глобального потепління на екосистему моря. Сучасні роботи в цій галузі активно використовують дані супутникового моніторингу, моделі течій та екологічні дослідження, що дозволяє отримувати більш точні та актуальні результати. Однак, незважаючи на велику кількість досліджень, існує необхідність подальшого вивчення більш вузьких аспектів гідрологічного режиму Середземного моря, таких як локальні течії, вплив погодних умов, судноплавства на екологію моря з метою забезпечення безпеки, ефективності та економічності судноплавної діяльності, а також для прогнозування та управління екологічними ризиками.

**Мета роботи** – на різних розрізах розрахувати на основі даних натурних експедиційних досліджень (температури та солоності морської води) швидкості течій та побудувати карти просторового розподілу швидкостей течій в акваторії Гібралтарської протоки та окремих районах Середземного моря. На підставі рівняння водного балансу Середземного моря оцінити водообмін моря з океаном крізь Гібралтарську протоку. Розрахунки об'ємів води, що надходять в поверхневу шарі з Атлантики в Середземне море та витікають в придонному шарі Гібралтарської протоки з моря в океан є невід'ємною частиною безпечного, ефективного та екологічно збалансованого судноплавства, що дозволяє оптимізувати маршрути, враховувати вплив течій на маневрування суден та мінімізувати ризики для навколишнього середовища та морських екосистем.

**Основна частина.** Відомо, що течія впливає на швидкість судна, поворотливість, викликає бічний знос. Взагалі, слід пам'ятати про те, що маса води, яка рухається, у 800-1000 разів щільніша за повітря і, отже, вона може генерувати сили величезної величини. Тому дуже важливо враховувати швидкість і напрямок течії на кожному курсі судна, та пам'ятати, що елементи течії – напрям і швидкість – схильні до значних змін. При плаванні на течії слід контролювати своє місце всіма доступними способами, оскільки на течії значно змінюються інерційні характеристики судна та спотворюється крива циркуляції на поворотах.

У якості вихідних матеріалів для розрахунку швидкостей течій в Гібралтарській протоці та окремих районах Середземного моря використані дані Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) [6]. Вихідними матеріалами є дані натурних експедиційних досліджень розподілу температури та солоності морської води на різних розрізах в окремих акваторіях Середземного моря (рис.1). В якості альтернативного джерела інформації для оцінки обміну водними масами між Середземним морем та Атлантичним океаном використані дані з атмосферного реаналізу ERA5 [7] за опадами і випаровуванням за період 2002-2020 роки.

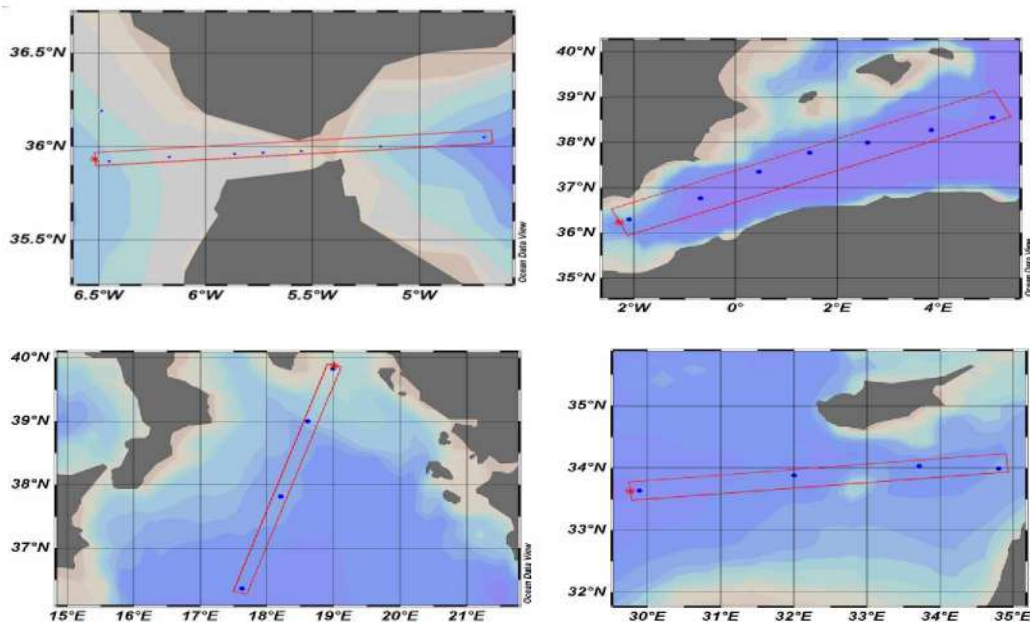


Рисунок 1 – Розташування розрізів в акваторії Середземного моря.

Середземне море з'єднане з Атлантичним океаном через вузьку Гібралтарську протоку. Гідрологічний режим системи обумовлений обміном прісною водою між атмосферою, континентами та океанами, а також обміном солоною водною масою між океанічними басейнами. У протоці, яка з'єднує море з океаном утворюється двохшарова система течій, з яких придонна є термохалінною, а поверхнева - стічною, тобто існує певний водообмін між морем та океаном [1,2]. Моніторинг таких потоків води, необхідний для розуміння водного циклу в регіоні, який дуже чутливий до глобальних кліматичних змін і впливає на мінливість Атлантичної меридіональної

циркуляції, яка у свою чергу, впливає на глобальний клімат [3,4]. Крім того така двохшарова система течій впливає на структуру та інтенсивність поверхневих течій в Гібралтарській протоці, що чинить дію на судноплавство, оскільки така система створює особливості руху води, які можуть бути як корисними так і складними для суден, тобто впливати на маневреність судна, особливо при підході до протоки.

Середземне море – напівзамкнене море площею  $2,5 \times 10^6$  км<sup>2</sup>, де випаровування ( $V_{вип}$ ) перевищує опади ( $V_{оп}$ ) та надходження річкового стоку ( $V_{р.с.}$ ), а дефіцит водної маси повинен заповнюватися горизонтальними потоками води, а саме, надходженням континентальних прісних вод та припливом солоних вод з Атлантичного океану та Чорного моря. Зв'язок з Атлантикою здійснюється через Гібралтарську протоку (ширина у найвужчому місці – 14 км, глибина на фарватері 338м). Рівняння водного балансу для Середземного моря можна записати як:

$$V_{вип} \cdot S_{вип} = V_{вт} \cdot S_{вт} \quad (1),$$

де  $V_{вип}$  - об'єм води, який витікає з моря крізь протоку;

$V_{вт}$  - об'єм води, який поступає в море крізь протоку;

$S$  – солоність води, яка витікає та поступає крізь протоку.

$$V_{вип} = V_{вт} + V_{оп} + V_{р.с.} - V_{вип} \quad (2),$$

де  $V_{оп}$  - об'єм вод, що надходить від опадів за рік,

$V_{р.с.}$  - об'єм річкового стоку, що надходить за рік,

$V_{вип}$  - об'єм води, що випаровується за рік.

Середньорічна кількість опадів у Середземному морі за період 1991-2020 рр. становить у середньому від 337 до 480 мм на рік. Випаровування оцінюється в діапазоні від 920 до 1190 мм на рік. Перевищення випаровування над опадами дає середньорічну втрату води Середземним морем, що варіюється в межах від 583 до 710 мм на рік. Середньорічний річковий стік становить  $502 \pm 27$  км<sup>3</sup>/рік. Розрахунки обчислених річних об'ємів водообміну крізь Гібралтарську протоку на підставі використаних рівнянь (1,2) показали, що об'єми води, які витікають з Середземного моря в Атлантику в придонному шарі Гібралтарської протоки складають від 12400 до 16549 км<sup>3</sup>/рік. Оскільки придонна течія посилює падіння рівня в морі, з цієї причини у верхньому шарі протоки утворюється течія з океану в море (внаслідок нахилу рівня). Середньорічний потік води, що потрапляє з океану в поверхневому шарі протоки в Середземне море коливається в межах від 13355,5 до 17822 км<sup>3</sup>/рік. Таким чином річковий стік і приплив атлантичних вод відновлюють водний баланс в Середземному морі, але цей баланс не досягається миттєво, і вносить сезонну мінливість у всіх потоках. Зокрема, надходження води з Атлантичного океану збільшується до  $4200 \pm 200$  км<sup>3</sup>/рік у серпні/вересні місяці та зменшується у квітні/травні. Така двохшарова система течій впливає на інтенсивність поверхневих течій в Гібралтарській протоці. Потужний потік води (до 17822 км<sup>3</sup>/рік), що надходить з північної частини Атлантичного океану в Середземне море проходить по середині протоки. Тому при плаванні по протоці в західному напрямку, судна повинні триматися ближче до його берегів, але при цьому потрібно мати на увазі, що біля берегів багато небезпек, а у мисів, що виступають у протоку, бистрини і суло. Виходячи з вище зазначеного доцільно було розрахувати швидкості течій та побудувати карти просторового розподілу швидкостей течій в акваторії Гібралтарської протоки та окремих районах Середземного моря (рис. 2,3,4,5). Швидкості течій розраховані за даними натурних експедиційних досліджень температури та солоності морської води на розрізах (рис.1) за допомогою програмного продукту OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017). На рис. 2 показано, що поверхнева течія транспортує води з Атлантичного океану в Середземне море, в найвужчій частині Гібралтарської протоки охоплюючи шар води до 150-175 м. Швидкості течії у найвужчій ділянці протоки досягають максимальних значень і складають 100-120 см/с.

Нижче розглянута дія бічної течії на судно у Гібралтарській протоці, у самій вузькій її частині, де швидкості течії досягають максимальних значень (рис.2), і дорівнює 1,9 вузлів (100 см/с) і траверзного вітру 12 вузлів на танкер дедвейтом 90 тис.т.

$$C = f \cdot L \cdot d \cdot v_T^2 \quad (3)$$

де  $C$  – навантаження, що створюється течією, виражене в "коротких" тонах (907,2 кг);

$f$  – фактор, що залежить від запасу води під кілем, який змінюється від 0,0015, коли глибина в 3 рази більше осадки, до 0,0036, коли глибина дорівнює 1,1 осадки, якщо глибина в 2 рази більша за осадку, фактор дорівнює 0,0018;

$L$  – довжина судна по ватерлінії, фути;

$d$  – середня осадка, фути;

$v_T$  – швидкість течії, у вузлах.

На судно в порожньому стані із середнім осадом 20 фут (довжина судна по ватерлінії 810 фут) при глибині моря, що більше осадки в три рази, течія в 1,9 вузлів розвиває навантаження 88 тс, а 12-вузловий вітер створює навантаження 9 тс, що в сумі становить поперечне зусилля, що дорівнює 97 тс. У випадку, якщо танкер підійде з частиною вантажу, що дорівнює 35000 т, із середнім осадом 35 фут (глибина в два рази більше за осадку), течія докладатиме силу 105 тс, а вітер - 6 тс, внаслідок чого поперечна сила збільшиться до 111 тс. Таким чином, при таких високих значень швидкостей течій особливо необхідно враховувати бічний знос судна при плаванні фарватерами. Особливо небезпечний бічний знос на крутих поворотах фарватера під час руху судна за течією. Бічне знесення посилюється відцентровою силою інерції, що виникає при повороті судна, що може призвести до різкого закидання корми судна на зовнішній бік повороту.

По мірі просування від Гібралтарської протоки до західної частини Середземного моря швидкість поверхневих течій зменшується від 50 до 10 см/с (рис. 2,3). У східному районі Середземного моря переважає односпрямований по глибині рух вод. Величини швидкостей течій у поверхневому шарі досягають в середньому 5-10 см/с, а на глибинах 200- 300 м 2-5 см/с (рис.5).

Карти просторового розподілу швидкостей течій у Середземному морі показують, що течії не проникають глибше 400 м на всіх чотирьох розрізах (рис. 2, 3, 4, 5) при найбільшій глибині моря 5267 м.

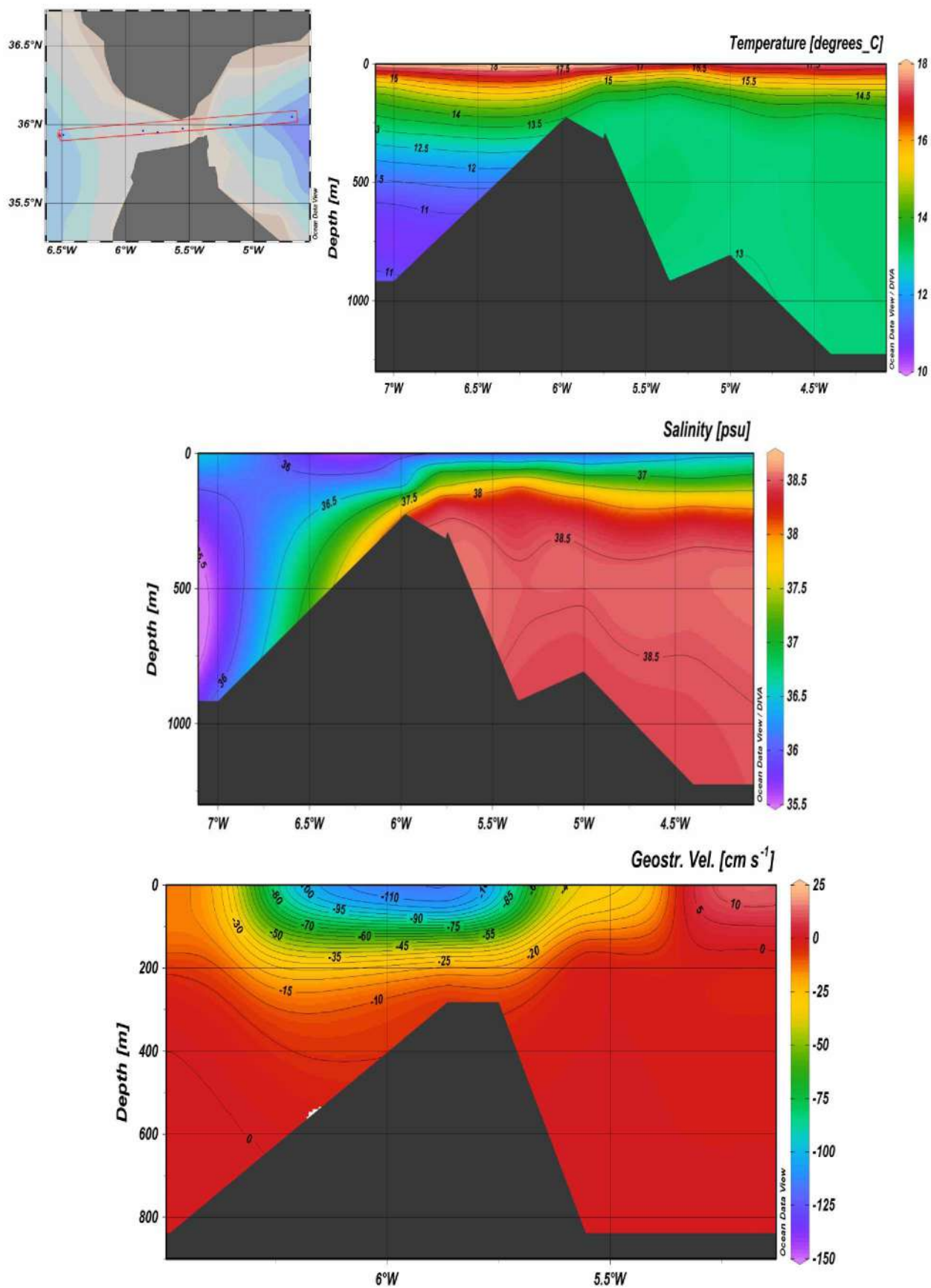


Рисунок 2 – Карта просторового розподілу температури, солоності морської води та швидкостей течій на розрізі в Гібралтарській протоці (травень 2011 р)

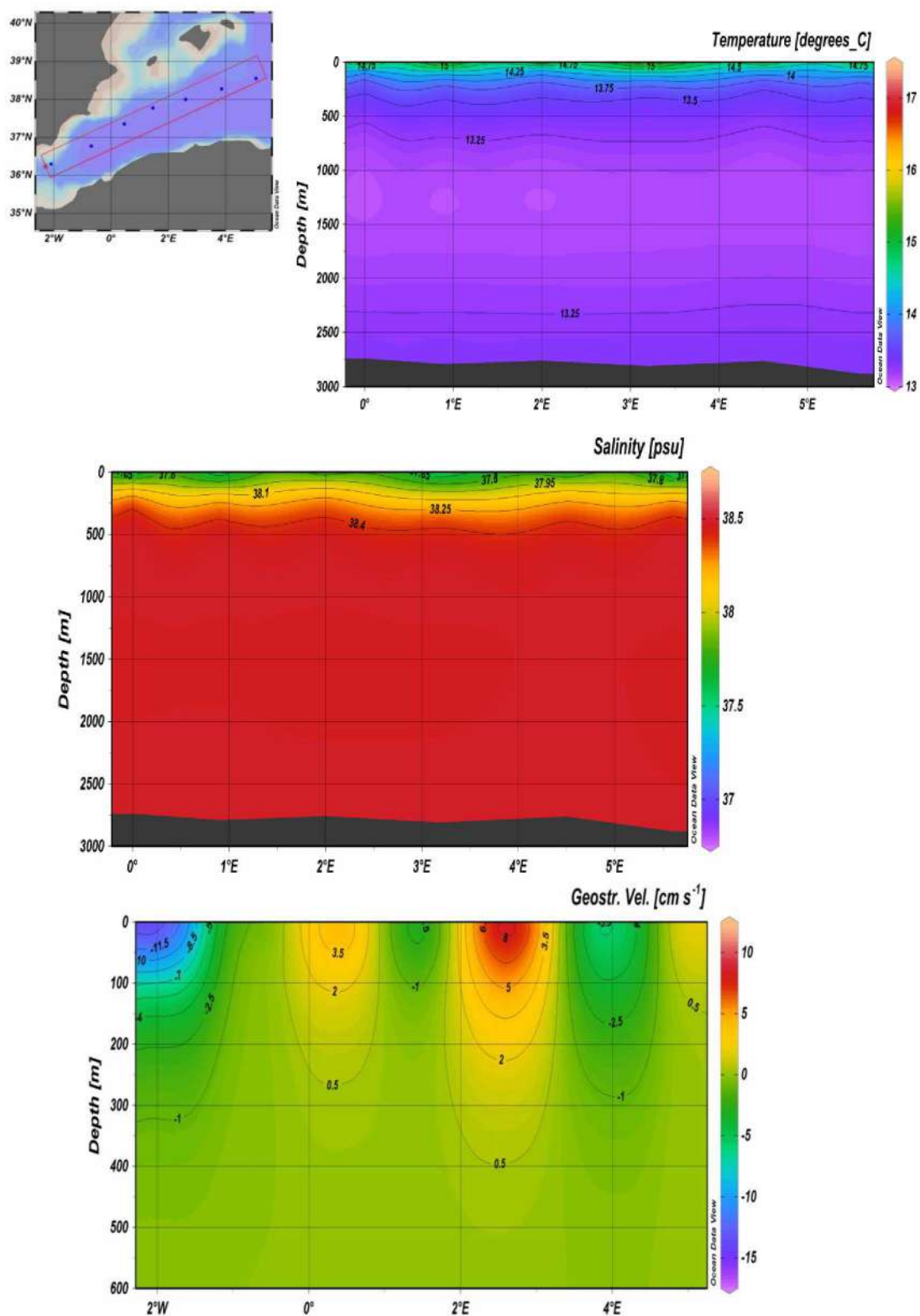


Рисунок 3 – Карта просторового розподілу температури, солоності морської води та швидкостей течій на розрізі в західній частині Середземного моря (квітень 2011 р)

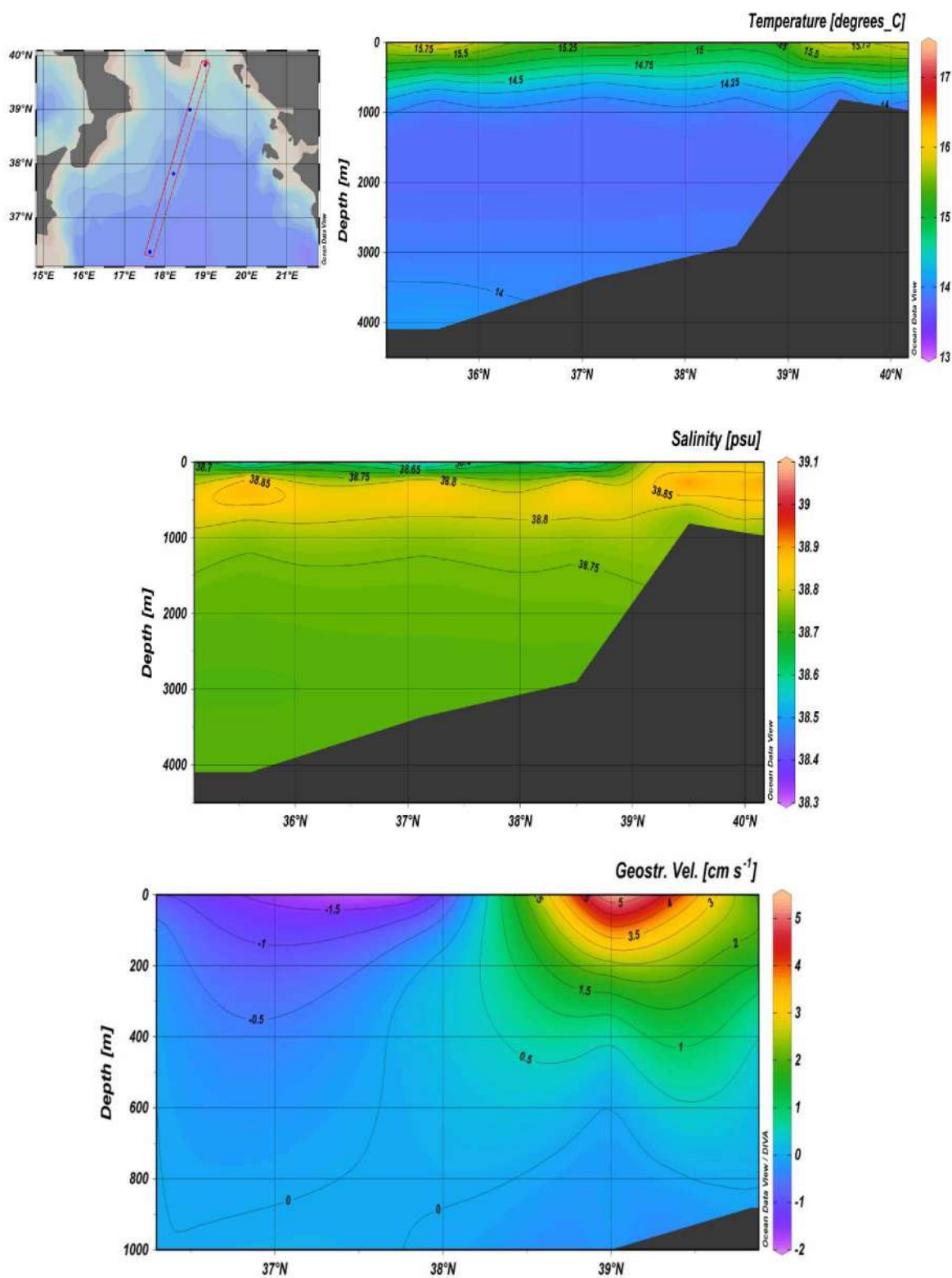


Рисунок 4 – Карта просторового розподілу температури, солоності морської води та швидкостей течій на розрізі в акваторії Іонічного моря (квітень 2011 р)

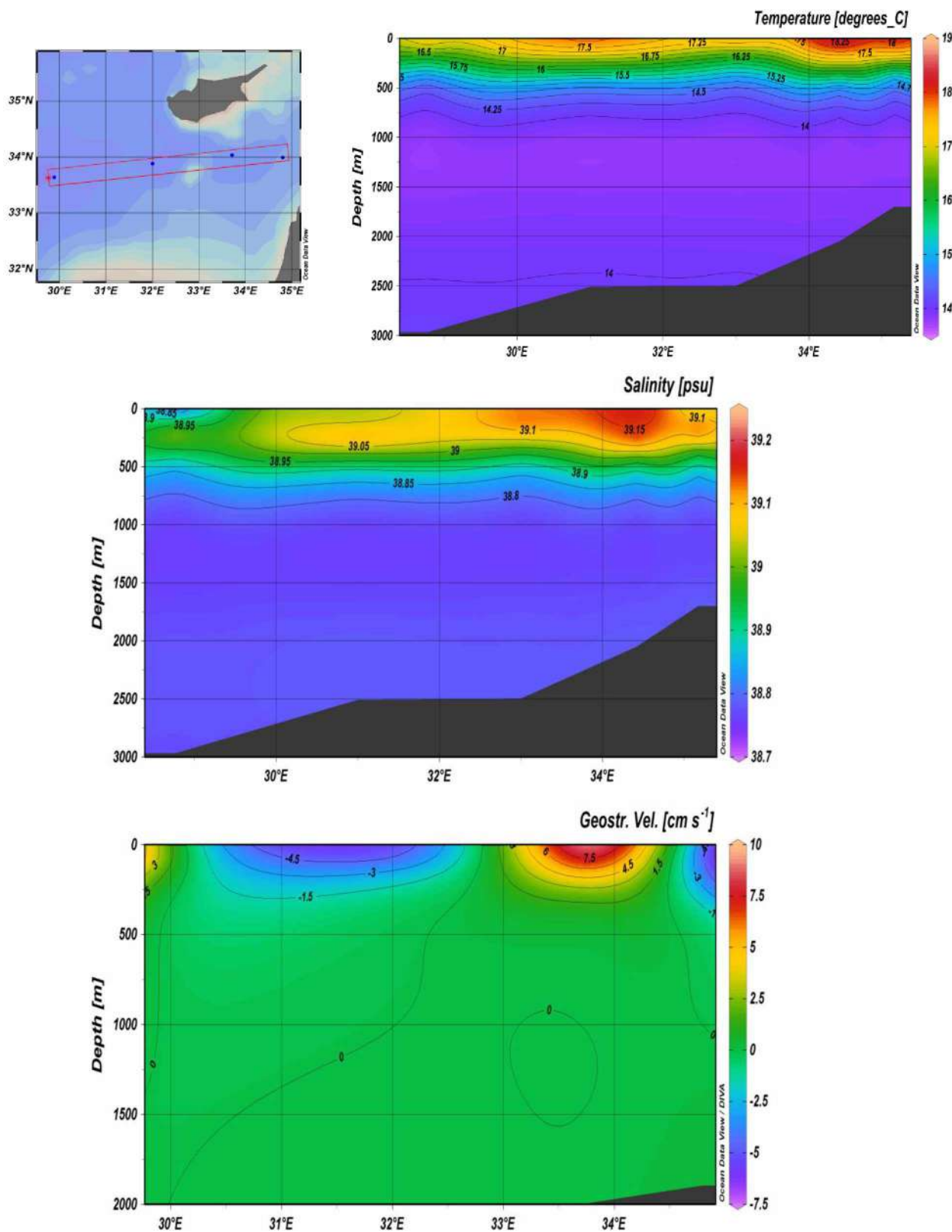


Рисунок 5 – Карта просторового розподілу температури, солоності морської води та швидкостей течій на розрізі в східній частині Середземного моря (квітень 2011 р)

**Висновки.**

1. Розраховані швидкості та побудовані карти просторового розподілу швидкостей течій, температури і солоності морської води в акваторії Гібралтарської протоки та окремих районах Середземного моря. Визначено, що швидкості течії зростають у самій вузькій частині протоки і досягають максимальних значень, що дорівнюють 100-120 см/с. По мірі просування від Гібралтарської протоки до західного басейну Середземного моря швидкості течій на поверхні зменшуються від 50 до 10 см/с. У східному басейні Середземного моря домінує односторонній по глибині рух вод. Величини швидкостей течій у поверхневому шарі досягають в середньому 5-10 см/с, а на горизонтах 200-300 м 2-5 см/с. Побудовані карти просторового розподілу швидкостей течій у Середземному морі показують, що течії не проникають глибше 400 м на всіх досліджуваних розрізах при глибині моря 5267 м.

2. Розглянута дія траверсної течії на судно у самій вузькій частині Гібралтарської протоки, де швидкості течії досягають максимальних значень (100-120 см/с): розраховане навантаження, що створюється течією на судно у порожньому стані із середнім осадом 20 фут становить 97 тс., якщо танкер підійде з частиною вантажу, що дорівнює 35000 т, поперечна сила збільшиться до 111 тс.

3. За допомогою рівняння водного балансу для Середземного моря розраховані об'єми водних мас, які надходять з Північної Атлантики в море та витікають з моря в океан: об'єм водної маси, що поступає з Північної Атлантики в Середземне море у поверхневому шарі протоки коливається в межах від 13355,5 до 17822 км<sup>3</sup>/рік; середньорічний потік води, який витікає з моря в океан в придонному шарі Гібралтарської протоки складає від 12400 до 16549 км<sup>3</sup>/рік. Така двохшарова система течій впливає на інтенсивність поверхневих течій в Гібралтарській протоці.

Проведені в роботі дослідження, пов'язані з системою циркуляції вод та водообміном моря з океаном мають важливе значення для оцінки впливу течії на маневрені характеристики судна. Отримані результати швидкостей течій можуть бути використані при управлінні судами та при дослідженнях пов'язаних з переносом системою течій розливів нафти, хімічних речовин та інших забруднювачів з метою мінімізувати негативний вплив судноплавства на екосистему моря.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. В.І. Михайлов, Н.В. Кучеренко. Спеціальні розділи фізичної океанології. Одеса: Екологія, 2011. - 238 с.
2. Суховій В.Ф. Фізична океанологія. Одеса: АО БАХВА, 2001. – 315 с.
3. Bouraoui F, Grizzetti B, Aloe A. Estimation of water fluxes into the Mediterranean Sea. Journal of Geophysical Research, Volume 115, D21116, 2010.
4. Katrin Schroeder, Jacopo Chiggiato. Oceanography of the Mediterranean Sea. An Introductory Guide. Elsevier, 2023, 561 p.
5. Poulain, P.-M., Menna, M., Mauri, E., 2012. Surface geostrophic circulation of the Mediterranean Sea derived from drifter and satellite altimeter data. Journal of Physical Oceanography, Volume 42 (6), p. 973-990.
6. National Centers for Environmental Information. World Ocean Database [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database-select/dbsearch.html>
7. Copernicus [Climate Data Store](https://cds.climate.copernicus.eu/datasets) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>

**REFERENCES**

1. V.I. Mikhailov, N.V. Kucherenko. *Special sections of physical oceanology*. Odesa: Ecology, 2011. - 238 p.
2. Sukhovii V.F. *Physical oceanology*. Odesa: AO BAKHVA, 2001. – 315 p.
3. Bouraoui F, Grizzetti B, Aloe A. *Estimation of water fluxes into the Mediterranean Sea*. Journal of Geophysical Research, Volume 115, D21116, 2010.

4. Katrin Schroeder, Jacopo Chiggiato. *Oceanography of the Mediterranean Sea. An Introductory Guide*. Elsevier, 2023, 561 p.
5. Poulain, P.-M., Menna, M., Mauri, E., 2012. *Surface geostrophic circulation of the Mediterranean Sea derived from drifter and satellite altimeter data*. Journal of Physical Oceanography, Volume 42 (6), p. 973-990.
6. National Centers for Environmental Information. World Ocean Database [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database-select/dbsearch.html>
7. Copernicus [Climate Data Store](https://cds.climate.copernicus.eu/datasets) [Electronic resource]. – Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>

***Monyushko M.M., Vasalatiy N.V., Cheroi L.I.***

**ANALYSIS OF CURRENTS' VELOCITIES IN CERTAIN AREAS OF THE MEDITERRANEAN SEA: CALCULATIONS AND THEIR SIGNIFICANCE FOR EFFICIENT NAVIGATION**

*Studies related to the water circulation system and water exchange of the Mediterranean Sea with the ocean were conducted. Based on data from field expedition studies (temperature and salinity of seawater) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) at different sections, maps of the spatial distribution of current velocities in the Strait of Gibraltar and certain areas of the Mediterranean Sea were calculated and constructed. Using the water budget equation, using data from the ERA5 atmospheric reanalysis for precipitation and evaporation, the volumes of water masses entering the sea from the North Atlantic and flowing into the ocean from the sea were estimated. It was shown that such a two-layer current system affects the intensity of surface currents in the Strait of Gibraltar. The effect of the transverse current on a ship in the narrowest part of the Strait of Gibraltar, where the current velocities reach maximum values, was considered.*

**Keywords:** *Mediterranean Sea, Strait of Gibraltar, current velocities, water budget, ocean, water masses.*

*Стаття прийнята 28.02.2025*

© *Калініченко Є.В.*

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА БЕЗПЕКА СУДНОПЛАВСТВА: ТОЧКИ ПОЄДНАННЯ ТА РОЗБІЖНОСТІ

*У статті розглядаються основні аспекти підвищення енергоефективності судноплавства та її вплив на безпеку морських перевезень. Аналізуються міжнародні регуляторні стандарти, ключові точки поєднання та розбіжності між енергоефективністю та безпекою, а також визначаються порогові значення, за якими переваги енергоефективності можуть негативно впливати на безпеку судноплавства. Представлені статистичні дані щодо зниження викидів парникових газів, економії пального та їхнього зв'язку із безпекою експлуатації суден. Аналіз даних свідчить про значний позитивний вплив міжнародних стандартів на скорочення викидів та підвищення енергоефективності. Водночас впровадження нових технологій потребує значних інвестицій, що може бути фінансово обтяжливим для судновласників. Розглянуто взаємозв'язок між енергоефективністю та безпекою судноплавства, а також критичні моменти, коли підвищення енергоефективності може призводити до небажаних наслідків для експлуатації суден. Виявлено, що хоча заходи з оптимізації витрат пального мають значний позитивний екологічний та економічний ефект, вони можуть створювати додаткові ризики, такі як зниження маневреності, збільшення часу реагування екіпажу на аварійні ситуації та підвищення вразливості до погодних умов. Отримано розуміння, що майбутні дослідження мають бути спрямовані на розробку збалансованих підходів до регулювання швидкості, конструкції корпусів та використання альтернативних джерел енергії, щоб забезпечити не лише економію ресурсів, а й високий рівень безпеки морських перевезень. Підвищення енергоефективності не лише сприяє економії пального та зменшенню викидів парникових газів, але й суттєво покращує рівень безпеки судноплавства. Комплексне впровадження енергоефективних технологій дозволяє знизити ризики технічних відмов, підвищити надійність навігаційних систем та забезпечити більш комфортні умови роботи для екіпажу. Отже, оптимізація енергоефективності не може бути самоціллю, а має враховувати ризики для безпеки, які виникають при перевищенні певних порогових значень.*

*Ключові слова:* енергоефективність, судноплавство, безпека, альтернативні джерела енергії, міжнародні стандарти, викиди CO<sub>2</sub>.

**Постановка проблеми.** Сучасне судноплавство є однією з основних складових світової економіки, забезпечуючи понад 80% міжнародної торгівлі. Водночас галузь є значним споживачем викопного пального та джерелом викидів парникових газів. Згідно зі звітом Міжнародної морської організації (ІМО), судноплавство спричиняє близько 3% глобальних викидів CO<sub>2</sub> [1].

Зменшення енергоспоживання суден є критично важливим не лише для екології, а й для підвищення безпеки морських перевезень. У той же час, досягнення високої енергоефективності може спричинити негативні наслідки для навігації та керованості суден у складних умовах. У цій статті розглядається взаємозв'язок між енергоефективністю та безпекою, а також аналізуються регуляторні норми та порогові значення, які визначають межу між економією пального та безпекою судноплавства.

**Аналіз літературних джерел** У попередніх дослідженнях [2,3] аналізувалися основні підходи до підвищення енергоефективності морського транспорту, зокрема використання альтернативних джерел енергії, оптимізація конструкцій суден та вдосконалення експлуатаційних характеристик. Роботи [4,5] зосереджували увагу на міжнародних регуляторних нормах та впливі ІМО на скорочення викидів парникових газів. Проте взаємозв'язок між енергоефективністю та безпекою судноплавства ще недостатньо вивчений, зокрема відсутні комплексні дослідження порогових значень, за якими

енергоефективні заходи можуть погіршувати безпеку експлуатації суден. Це зумовлює актуальність даного дослідження.

**Мета дослідження** – проаналізувати сучасні міжнародні стандарти енергоефективності, їхній зв'язок із безпекою судноплавства та визначити критичні порогові значення, за якими заходи з підвищення енергоефективності можуть негативно впливати на безпеку суден.

**Викладення основного матеріалу.** Міжнародна морська організація (ІМО) встановлює жорсткі вимоги щодо скорочення викидів і підвищення енергоефективності суден. Основні стандарти включають:

1. Energy Efficiency Design Index (EEDI) – встановлює мінімальні вимоги до паливної ефективності для нових суден.

2. Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) – система управління енергоефективністю для діючих суден.

3. Carbon Intensity Indicator (CII) – показник інтенсивності викидів CO<sub>2</sub> для суден, який визначає необхідність скорочення викидів [1-3].

Аналіз впливу міжнародних стандартів на енергоефективність. Для оцінки ефективності регуляторних стандартів проаналізуємо їхній вплив на скорочення викидів парникових газів та економію пального в реальних умовах експлуатації суден. Нижче наведено порівняльні дані впровадження основних стандартів:

Таблиця 1. Порівняльний аналіз впровадження міжнародних регуляторних стандартів

| Показник                              | До впровадження стандартів | Після впровадження стандартів | Скорочення (%) |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------|
| Викиди CO <sub>2</sub> (г/тонно-милю) | 17.5                       | 14.2                          | 18.9           |
| Споживання пального (тонн/день)       | 50                         | 42                            | 16             |
| Витрати на паливо (\$/рік)            | 5 млн                      | 4.1 млн                       | 18             |
| Частка LNG у світовому флоті (%)      | 5                          | 12                            | 140            |

Дані свідчать про значний позитивний вплив міжнародних стандартів на скорочення викидів та підвищення енергоефективності. Водночас впровадження нових технологій потребує значних інвестицій, що може бути фінансово обтяжливим для судновласників.

**Точки поєднання між енергоефективністю та безпекою.** Одним із найвагоміших аспектів взаємозв'язку між енергоефективністю та безпекою є зменшення витрат пального, що, у свою чергу, знижує ризик займання та вибухів паливних резервуарів. Оскільки судна, що використовують більш ефективні двигуни або альтернативні джерела енергії, споживають менше традиційного викопного пального, ймовірність виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із витокami або загоряннями пального, значно скорочується. Це особливо актуально для суден, що здійснюють перевезення небезпечних вантажів, де ризик пожежі є одним із основних факторів загрози безпеці екіпажу та судна.

Ще одним важливим аспектом є впровадження автоматизованих систем моніторингу витрат пального та роботи суднових механізмів. Такі системи дають змогу екіпажу оперативно реагувати на можливі несправності або неефективну роботу двигунів, що сприяє зниженню ризиків технічних відмов у критичних ситуаціях. Використання сучасних цифрових технологій у суднопластві не лише допомагає оптимізувати енерговитрати, а й суттєво підвищує загальний рівень безпеки.

Покращення обтічності корпусу також відіграє значну роль у підвищенні керованості суден. Завдяки вдосконаленій формі корпусу знижується опір води, що дозволяє не тільки економити паливо, а й забезпечувати більш стабільний рух судна навіть у складних погодних умовах. Це особливо важливо при перетині зон із високими штормовими ризиками, оскільки покращена керованість дозволяє екіпажу ефективніше маневрувати та уникати небезпечних ситуацій.

Окремо слід відзначити роль альтернативних джерел енергії у забезпеченні безпеки судноплавства. Наприклад, перехід на зріджений природний газ (LNG) або гібридні енергетичні системи дозволяє не лише скоротити рівень шкідливих викидів, але й знизити навантаження на головні енергетичні установки, що, у свою чергу, зменшує ймовірність технічних збоїв під час експлуатації.

Крім того, використання комбінованих джерел живлення (наприклад, сонячних батарей або вітрових генераторів) може слугувати додатковим резервом енергії у разі відмови основних силових установок.

Нарешті, оптимізація режиму роботи двигуна є ще одним ключовим аспектом, що одночасно впливає як на енергоефективність, так і на безпеку судноплавства. Зменшення навантаження на двигун дозволяє продовжити термін його служби, знизити рівень викидів шкідливих речовин та забезпечити більш плавний хід судна навіть за несприятливих погодних умов. Такий підхід зменшує ризик аварій, пов'язаних із технічними несправностями, та забезпечує стабільну роботу судна на всіх етапах рейсу.

Отже, слід приділяти максимальну увагу наступним аспектам:

1. Зниження споживання пального → зменшення ризику займання пального та вибухів.
2. Автоматизовані системи моніторингу енерговитрат → підвищення контролю над справністю обладнання та швидке виявлення несправностей.
3. Покращена обтічність корпусу → зниження опору та покращення керованості судна в штормових умовах.
4. Використання альтернативних джерел енергії → зниження залежності від традиційного пального, що може підвищити стійкість судна до паливних криз.
5. Оптимізація режиму роботи двигуна → зменшення зношування механізмів та підвищення надійності судна під час тривалих рейсів.

Таким чином, підвищення енергоефективності не лише сприяє економії пального та зменшенню викидів парникових газів, але й суттєво покращує рівень безпеки судноплавства. Комплексне впровадження енергоефективних технологій дозволяє знизити ризики технічних відмов, підвищити надійність навігаційних систем та забезпечити більш комфортні умови роботи для екіпажу.

**Точки розбіжності між енергоефективністю та безпекою.** У той час як підвищення енергоефективності сприяє зменшенню експлуатаційних витрат і зниженню впливу судноплавства на навколишнє середовище, деякі заходи можуть нести ризики для безпечної експлуатації суден. Одним із найважливіших аспектів є зменшення експлуатаційної швидкості суден. Багато компаній запроваджують "повільне судноплавство" (slow steaming), що дозволяє суттєво скоротити витрати пального. Проте надмірне зниження швидкості може збільшити ризики зіткнень у портах та прибережних водах, а також зробити судна вразливими до несприятливих погодних умов. Згідно зі звітом Європейської морської безпекової агенції (EMSA), у 2021 році було зафіксовано 15% збільшення інцидентів, пов'язаних із маневреністю суден, що працювали в режимі низької швидкості [6].

Ще одним критичним аспектом є зміни в конструкції корпусу суден. Оптимізація форми для зменшення опору води дозволяє значно покращити паливну ефективність, проте може вплинути на остійність судна під час штормів. Наприклад, дослідження, проведене Інститутом морської техніки Великобританії, показало, що судна з вузьким корпусом мають на 20% вищу ймовірність втрати остійності та стійкості на курсі під час сильного хвилювання [7]. Це особливо актуально для контейнеровозів, де стабільність відіграє ключову роль у запобіганні втраті вантажу.

Крім того, впровадження альтернативних джерел енергії, таких як зріджений природний газ (LNG) або воднева тяга, має свої ризики. Хоча LNG суттєво знижує викиди CO<sub>2</sub>, зберігання цього пального потребує спеціальних умов і створює додаткові виклики для безпеки екіпажу. Для кращого розуміння компромісу між енергоефективністю та безпекою розглянемо узагальнену залежність між трьома ключовими параметрами: швидкістю, маневреністю та енергоефективністю (рис. 1).

Як видно з моделі, оптимізація енергоефективності через зниження швидкості може негативно впливати на маневреність, що, своєю чергою, збільшує ризики аварій. Таким чином, необхідно ретельно балансувати між енергоефективними рішеннями та експлуатаційною безпекою суден.

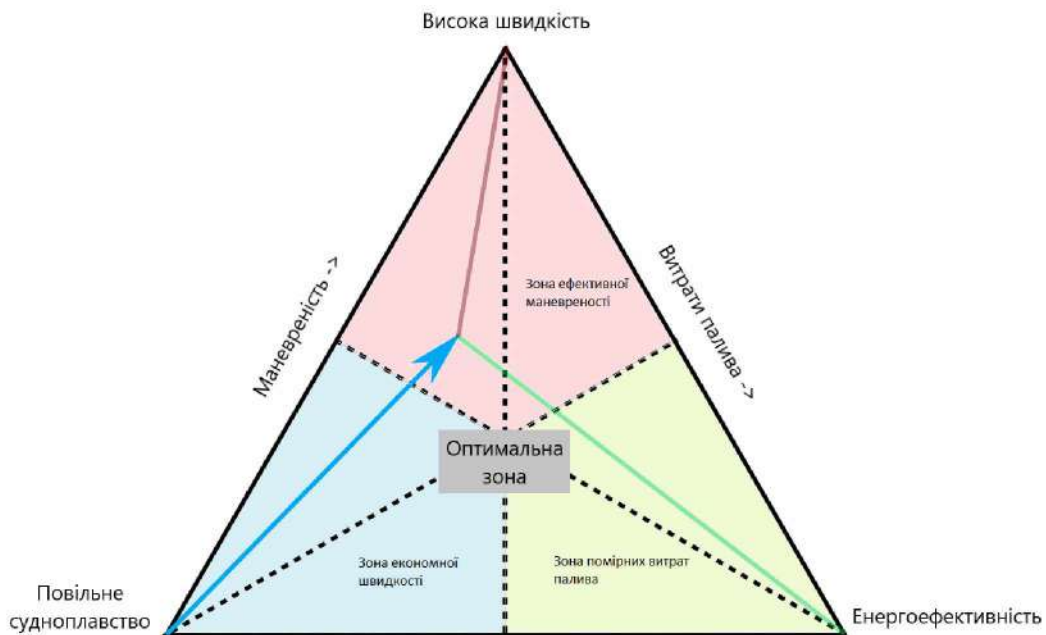


Рисунок 1 – Модель залежності швидкостей та енергоефективності судна

Отже, хоча енергоефективність є важливим чинником розвитку судноплавства, слід враховувати її потенційні загрози. Важливо розробляти технологічні рішення, які не лише підвищують паливну ефективність, але й забезпечують достатній рівень безпеки для екіпажу та вантажів.

**Аналіз порогових значень, де переваги енергоефективності починають шкодити безпеці.** Для визначення межі, за якою заходи з енергоефективності починають впливати на безпеку, необхідно враховувати кілька критичних параметрів: швидкість судна, маневреність та стійкість до погодних умов. Відомо, що зниження швидкості нижче 10 вузлів значно збільшує ризики зіткнень у вузьких проходах і портових акваторіях [7].

Крім того, при оптимізації корпусу суден для зменшення опору води може спостерігатися зниження остійності та стійкості на курсі під час штормів. Наприклад, дослідження показали, що судна з ультратонкими корпусами мають на 15-20% більшу ймовірність втрати остійності та стійкості на курсі при хвилюванні вище 5 балів за шкалою Бофорта [8].

Отже, для визначення критичних точок розбіжності між енергоефективністю та безпекою необхідно враховувати такі аспекти:

1. Критична швидкість для маневрування. За даними ІМО, судна, що йдуть на 30% повільніше від стандартної експлуатаційної швидкості, демонструють зниження ефективності маневреності на 25-40%;
2. Вплив альтернативного пального на стійкість судна. LNG, метанол та батарейні системи мають інші характеристики зберігання та розподілу ваги, що може негативно позначитися на остійності;
3. Залежність безпеки від екіпажу. Автоматизація може зменшити реакцію на нештатні ситуації, якщо кількість обслуговуючого персоналу зведена до мінімуму [9-11].

Графічний аналіз показує, що при швидкості нижче 10 вузлів маневреність судна різко знижується, що може критично вплинути на здатність реагувати на несприятливі навігаційні умови (рис. 2). Подальші дослідження мають зосередитися на побудові аналітичних моделей, що дозволять визначити оптимальні параметри для збереження рівноваги між безпекою та енергоефективністю.

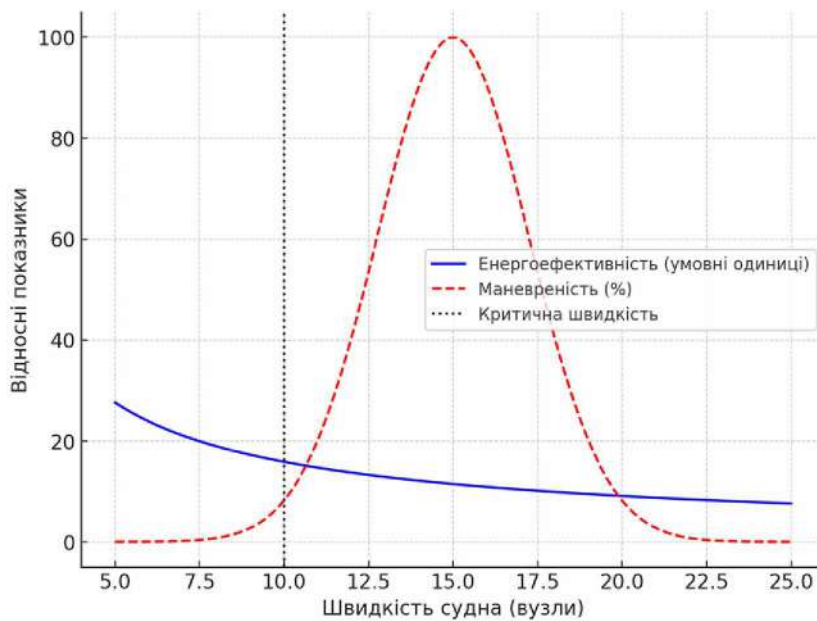


Рисунок 2 – Вплив швидкості судна на енергоефективність та маневреність

Таким чином, оптимізація енергоефективності не може бути самоціллю, а має враховувати ризики для безпеки, які виникають при перевищенні певних порогових значень. Підхід до судноплавства повинен бути комплексним, із чіткими критеріями допустимих змін у конструкції суден та експлуатаційних режимах [12].

**Висновки.** У даній статті було розглянуто взаємозв'язок між енергоефективністю та безпекою судноплавства, а також критичні моменти, коли підвищення енергоефективності може призводити до небажаних наслідків для експлуатації суден. Виявлено, що хоча заходи з оптимізації витрат пального мають значний позитивний екологічний та економічний ефект, вони можуть створювати додаткові ризики, такі як зниження маневреності, збільшення часу реагування екіпажу на аварійні ситуації та підвищення вразливості до погодних умов.

Майбутні дослідження мають бути спрямовані на розробку збалансованих підходів до регулювання швидкості, конструкції корпусів та використання альтернативних джерел енергії, щоб забезпечити не лише економію ресурсів, а й високий рівень безпеки морських перевезень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. International Maritime Organization (IMO). Fourth IMO GHG Study 2020. London, 2020.
2. European Maritime Safety Agency (EMSA). Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2021. Lisbon, 2021.
3. IMO (2023). Guidelines for Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI). URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.1-Circ.684.pdf>
4. Bouman E.A., Lindstad E., Rialland A.I., Strømman A.H. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, vol. 52, pp. 408-421.
5. Калініченко Є.В., Мущенко П.В. (2023). Сучасні методи і технології управління використанням енергоресурсів у судноплавстві. URL: [https://www.researchgate.net/publication/369282542\\_Sucasni\\_metodi\\_i\\_tehnologii\\_upravlinna\\_vikoristanna\\_m\\_energoresursiv\\_u\\_sudnoplavstvi](https://www.researchgate.net/publication/369282542_Sucasni_metodi_i_tehnologii_upravlinna_vikoristanna_m_energoresursiv_u_sudnoplavstvi)

6. Калініченко Є.В., Постніков Є.Є. (2024). Метод оцінювання складності навігаційної ситуації. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2024/06/WORLD-WAYS-AND-METHODS-OF-IMPROVING-OUTDATED-THEORIES-AND-TRENDS.pdf>
7. Калініченко Є.В., Дейкін Д.В. (2021). Розробка елементів інтелектуальної підтримки прийняття рішень судноводієм. URL: <https://kivt.duit.edu.ua/wp-content/uploads/2022/03/zbirnyk-dch-2021.pdf>
8. Kalinichenko Y., Tomchakovsky G., Santana L.O. (2024). Increasing energy efficiency by improving navigation methods. URL: [https://www.researchgate.net/publication/386527749\\_Increasing\\_energy\\_efficiency\\_by\\_improving\\_navigation\\_methods](https://www.researchgate.net/publication/386527749_Increasing_energy_efficiency_by_improving_navigation_methods)
9. Kalinichenko Y. (2020). Theory and methods for calculating the inertial-braking characteristics of a ship. URL: [Theory and methods for calculating the inertial-braking characteristics](https://www.researchgate.net/publication/338173196_Theory_and_methods_for_calculating_the_inertial-braking_characteristics_of_a_ship)
10. Kalinichenko Y., Burmaka I. (2016). Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning. URL: [Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning](https://www.researchgate.net/publication/311959131_Analysis_of_mathematical_models_of_changing_the_vessel's_course_when_turning)
11. Kalinichenko Y. (2017). Calculation of ship's active braking characteristics. DOI: 10.21303/2585-6847.2017.00474
12. Калініченко Є.В. (2023). Енергоефективність на морських судах: стратегічний підхід. URL: [https://www.researchgate.net/publication/372152937\\_ENERGEOEFEKTIVNIST\\_NA\\_MORSKIH\\_SUDNAH\\_STRATEGICNIJ\\_PIDHID](https://www.researchgate.net/publication/372152937_ENERGEOEFEKTIVNIST_NA_MORSKIH_SUDNAH_STRATEGICNIJ_PIDHID)

## REFERENCES

1. International Maritime Organization (IMO). Fourth IMO GHG Study 2020. London, 2020.
2. European Maritime Safety Agency (EMSA). Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2021. Lisbon, 2021.
3. IMO (2023). Guidelines for Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI). URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.1-Circ.684.pdf>
4. Bouman E.A., Lindstad E., Rialland A.I., Strømman A.H. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, vol. 52, pp. 408-421.
5. Kalinichenko Y.V., Mushchenko P.V. (2023). Modern methods and technologies of managing the use of energy resources in shipping. URL: [https://www.researchgate.net/publication/369282542\\_Sucasni\\_metodi\\_i\\_tehnologii\\_upravlinna\\_vikoristanna\\_m\\_energoresursiv\\_u\\_sudnoplavstvi](https://www.researchgate.net/publication/369282542_Sucasni_metodi_i_tehnologii_upravlinna_vikoristanna_m_energoresursiv_u_sudnoplavstvi)
6. Kalinichenko Y.V., Postnikov Y. Y. (2024). Method for assessing the complexity of a navigation situation. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2024/06/WORLD-WAYS-AND-METHODS-OF-IMPROVING-OUTDATED-THEORIES-AND-TRENDS.pdf>
7. Калініченко Є.В., Дейкін Д.В. (2021). Development of elements of intelligent support for ship navigator decision-making. URL: <https://kivt.duit.edu.ua/wp-content/uploads/2022/03/zbirnyk-dch-2021.pdf>
8. Kalinichenko Y., Tomchakovsky G., Santana L.O. (2024). Increasing energy efficiency by improving navigation methods. URL: [https://www.researchgate.net/publication/386527749\\_Increasing\\_energy\\_efficiency\\_by\\_improving\\_navigation\\_methods](https://www.researchgate.net/publication/386527749_Increasing_energy_efficiency_by_improving_navigation_methods)
9. Kalinichenko Y. (2020). Theory and methods for calculating the inertial-braking characteristics of a ship. URL: [https://www.researchgate.net/publication/338173196\\_Theory\\_and\\_methods\\_for\\_calculating\\_the\\_inertial-braking\\_characteristics\\_of\\_a\\_ship](https://www.researchgate.net/publication/338173196_Theory_and_methods_for_calculating_the_inertial-braking_characteristics_of_a_ship)
10. Kalinichenko Y., Burmaka I. (2016). Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning. URL: [https://www.researchgate.net/publication/311959131\\_Analysis\\_of\\_mathematical\\_models\\_of\\_changing\\_the\\_vessel's\\_course\\_when\\_turning](https://www.researchgate.net/publication/311959131_Analysis_of_mathematical_models_of_changing_the_vessel's_course_when_turning)

11. Kalinichenko Y. (2017). Calculation of ship's active braking characteristics. DOI: 10.21303/2585-6847.2017.00474
12. Kalinichenko Y. V. (2023). Energy efficiency on seagoing vessels: a strategic approach. URL: [https://www.researchgate.net/publication/372152937\\_ENERGEOEFEKTIVNIST\\_NA\\_MORSKIH\\_SUDNAH\\_STRATEGICNIJ\\_PIDHID](https://www.researchgate.net/publication/372152937_ENERGEOEFEKTIVNIST_NA_MORSKIH_SUDNAH_STRATEGICNIJ_PIDHID)

*Kalinichenko Ye. V*

## **ENERGY EFFICIENCY AND SHIPPING SAFETY: POINTS OF CONSISTENCY AND DIVERGENCE**

*The article examines the main aspects of improving the energy efficiency of shipping and its impact on the safety of maritime transport. It analyzes international regulatory standards, key points of convergence and divergence between energy efficiency and safety, and determines the threshold values at which the benefits of energy efficiency can negatively affect the safety of shipping. It presents statistical data on the reduction of greenhouse gas emissions, fuel economy and their relationship with the safety of ship operation. The analysis of the data indicates a significant positive impact of international standards on reducing emissions and increasing energy efficiency. At the same time, the implementation of new technologies requires significant investments, which can be financially burdensome for shipowners. The relationship between energy efficiency and shipping safety is considered, as well as critical points when increasing energy efficiency can lead to undesirable consequences for ship operation. It was found that although measures to optimize fuel consumption have a significant positive environmental and economic effect, they can create additional risks, such as reduced maneuverability, increased crew response time to emergencies, and increased vulnerability to weather conditions. It was understood that future research should be aimed at developing balanced approaches to speed control, hull design, and the use of alternative energy sources to ensure not only resource savings but also a high level of maritime safety. Increasing energy efficiency not only contributes to fuel savings and greenhouse gas emissions, but also significantly improves the level of shipping safety. The comprehensive implementation of energy-efficient technologies allows reducing the risks of technical failures, increasing the reliability of navigation systems, and providing more comfortable working conditions for the crew. Therefore, optimizing energy efficiency cannot be an end in itself, but must take into account the safety risks that arise when certain threshold values are exceeded.*

**Keywords:** energy efficiency, shipping, safety, alternative energy sources, international standards, CO<sub>2</sub> emissions

*Стаття прийнята 20.03.2025*

© Гончарук І.П., Головань А.І.

## ІННОВАЦІЙНА СИСТЕМА МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СУДНОВОГО ОБЛАДНАННЯ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

У цій статті представлено інноваційну систему онлайн-моніторингу стану. Вона складається з нової об'єктно-орієнтованої бази даних, алгоритму машинного навчання та детальної моделі для прогнозування відмов обладнання. База даних моніторингу стану, яка є об'єктно-орієнтованою базою даних, створеною на мові Python, була розроблена для того, щоб уникнути будь-якої реляційно-об'єктної невідповідності проблем, які часто виникають при використанні реляційних баз даних у складних додатках з використанням методів машинного навчання. База даних інтелектуально зберігає дані з різних датчиків, а потім впорядковує дані в конвеєр до системи діагностики та прогнозування, пропонуючи постійну оцінку стану судових механізмів з високою швидкістю і точністю. Запропонована система технічного обслуговування на основі стану, базується на виявленні змін стану обладнання в режимі реального часу, використовуючи алгоритм локального фактору відхилення для виявлення новизни. Навчання, валідація та тестування алгоритму були виконані з використанням даних про деградацію енергетичної установки. Результати показують що після налаштування алгоритму він з високою точністю визначив, коли механічна системи змінює стан як для турбіни і компресора, так і для інших судових технічних засобів.

**Ключові слова:** технічний стан, моніторинг, прогнозування, реальний час, об'єктно-орієнтована база даних, машинне навчання, штучний інтелект, локальний фактор відхилення, судові технічні засоби, механізми, судно.

**Постановка проблеми.** У сучасному судноплавстві моніторинг стану судових механізмів традиційно здійснюється вручну або за допомогою простих автоматизованих діагностичних і прогнозуючих систем. Однак такі системи є частиною першого покоління підходів до технічного обслуговування за станом (обслуговування на основі стану), які базуються на фіксованих інтервалах обслуговування або обмеженому аналізі поточного стану обладнання. Основною проблемою є те, що традиційні методи аналізу стану механізмів базуються на статистичному аналізі вибіркового даних, що не завжди дозволяє точно прогнозувати відмови через випадковий характер зношування обладнання. До того ж, більшість методів обслуговування на основі стану у морському секторі потребують значного обсягу даних, які важко отримати, а також великої обчислювальної потужності для обробки алгоритмів машинного навчання. Ще однією проблемою є складність адаптації алгоритмів до різних експлуатаційних режимів судна. Судно працює у змінних умовах – маневрування в порту, хід у відкритому морі, негода тощо, що ускладнює моделювання роботи його механізмів. Крім того, існуючі реляційні бази даних погано взаємодіють із алгоритмами машинного навчання, що створює проблеми сумісності між системами управління та прогнозування технічного стану судового обладнання. З огляду на ці виклики, необхідне впровадження інноваційної системи моніторингу, що використовує об'єктно-орієнтовану базу даних (ООБД) та алгоритми машинного навчання для точного й швидкого аналізу змін у стані судових механізмів. Така система повинна забезпечувати:

1. Автоматизований збір та обробку даних у режимі реального часу з різних сенсорів без необхідності залучення експертів.
2. Виявлення відхилень у роботі обладнання за допомогою алгоритму локального фактору відхилення (ЛФВ) для аналізу нових аномалій.
3. Адаптацію до різних режимів експлуатації судна, з урахуванням змінних навантажень та умов роботи судових механізмів.

4. Оптимізацію використання обчислювальних ресурсів, завдяки застосуванню об'єктно-орієнтованої бази даних, яка усуває проблеми несумісності між алгоритмами машинного навчання та реляційними базами даних.

Таким чином, створення такої системи дозволить підвищити рівень безпеки та ефективності експлуатації суднових механізмів, зменшити кількість непередбачуваних відмов та витрати на ремонт і технічне обслуговування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У морському секторі дані зазвичай використовуються для ручного моніторингу сигналів тривоги та тенденцій на борту з деякими випадками простої автоматизованої діагностики даних і прогностичних процедур. Ці прості системи діагностики та прогнозування в поєднанні з експертними знаннями є частиною першого покоління систем технічного обслуговування на основі стану. Як впливає з назви, обслуговування на основі стану відноситься до процесу планування технічного обслуговування машини не через фіксовані проміжки часу (регламентне технічне обслуговування), а відповідно до фактичного стану обладнання. Моніторинг стану має на меті збір даних про стан техніки, які називаються даними моніторингу стану [1]. Останні дослідження зосереджені на розробці систем на основі машинного навчання для моніторингу в реальному часі та прогнозування технічного обслуговування суднового обладнання. Ці підходи спрямовані на підвищення ефективності технічного обслуговування, скорочення часу простою і поліпшення експлуатаційних характеристик. У дослідженнях вивчалися різні алгоритми машинного навчання для прогнозування відмов суднових дизельних двигунів [2] і суднових механізмів [3, 4]. Прескриптивна модель, що використовує генеративні змагальні мережі та аналіз режимів і наслідків відмов, може забезпечити моніторинг у реальному часі та високоточне прогнозування відмов суднового обладнання [5, 6]. Для моніторингу дизель-генераторів було запропоновано новий підхід, що використовує генеративні змагальні мережі у поєднанні з аналізом режимів і наслідків відмов, що дозволило досягти 83,13% точності у виявленні відмов [7, 8]. У статті представлено фреймворк на основі машинного навчання для моніторингу та прогнозування споживання палива та аномалій в режимі реального часу в судновому двотактному дизельному двигуні [9, 10]. Ці методології демонструють потенціал для раннього виявлення несправностей, покращення прийняття рішень та оптимізації стратегій технічного обслуговування в морській галузі. Однак необхідні подальші дослідження для вирішення таких проблем, як ідентифікація режимів відмов і оцінка критичності активів для комплексних рішень з предиктивного технічного обслуговування.

**Мета дослідження** полягає у розробці та впровадженні інноваційної системи моніторингу технічного стану суднових механізмів у реальному часі, засновану на алгоритмах машинного навчання та об'єктно-орієнтованих базах даних.

**Основні результати дослідження.** У сучасній літературі існує два основних підходи до обслуговування на основі стану, а саме: підхід, що ґрунтується на моделях та підхід на основі даних. Підхід, заснований на моделях, включає в себе фізичне розуміння цільових системи і включає такі методи, як експертні системи на основі правил, скінченних автоматів та якісних міркувань, або нечіткого моделювання. Як впливає з назви, експертні системи вимагають значного людського досвіду для того, щоб знайти рішення. Основним недоліком цих систем є нездатність до узагальнення (вони є специфічними для однієї системи), адаптації в нових умовах і навчання на своїх помилках. Підхід на основі даних також відомий як підхід машинного навчання, який використовує зібрані та накопичувані дані для автоматичного вивчення поведінки системи. Ці моделі підтримують розпізнавання і класифікацію складних несправностей без особливих знань про процес, сигнали і моделі несправностей. Деякі популярні методи машинного навчання, які можна для підходу, заснованого на даних, є нейронні мережі, дерева рішень.

Вищезазначені підходи, однак, створюють певні труднощі в їх застосуванні в морському секторі. Моделеподібні підходи забезпечують лише часткові рішення, які підходять для конкретного обладнання в певних умовах експлуатації, але вони не можуть точно відобразити та узагальнити динамічні зміни, що відбуваються у просторі та часі. З іншого боку, підходи, засновані на даних, вимагають великої кількості якісних маркованих навчальних даних для кожного

досліджуваного випадку, в тому числі даних з різних експлуатаційних профілів судна та/або частоти відмов. Ці дані вимагають значної кількості часу для збору, великий обсяг пам'яті на борту, системи управління базами даних, здатні обробляти великі обсяги даних, підвищених витрат на передачу даних на берег через супутниковий зв'язок для аналізу, а також додатковий час для навчання алгоритмів і отримання результатів. Критичний огляд сучасної літератури показав, що існуючі системи обслуговування на основі стану мають обмежене застосування і здебільшого базуються на простому статистичному аналізі. У зв'язку з цим, як ніколи раніше, необхідно запропонувати структуру обслуговування на основі стану, яка включатиме передові методи машинного навчання і моделювання для того, щоб запропонувати кращі діагностичні та прогностичні можливості, ніж існуючі системи, а також підвищену практичну цінність.

Запропонована структура обслуговування на основі стану (ООС): для вирішення основних проблем впровадження ООС у судноплавстві застосовується інноваційний підхід. Нова система ООС має просту архітектуру і може бути застосовуватися в більш ніж одній машинній системі без необхідності будь-яких попередніх даних і, що більш важливо, втручання будь-якої людини (експерта). Для цього створена база даних, яка полегшить процес машинного навчання завдяки своїй об'єктно-орієнтованій природі. У база даних буде інтелектуально збережено дані лише для моніторингу стану та очищено пам'ять кожного разу, коли навчання алгоритму буде завершено. Потім буде використано підхід, заснований на даних, підхід буде використовуватися для оцінки деградації обладнання та оптимізації результатів в модель відмов для прогнозування технічного обслуговування. Характеристики нової структури ООС (див. рис. 1) можна узагальнити наступним чином: проста та ефективна ООБД для зберігання даних моніторингу стану, машинного навчання, методи використання збережених даних для виявлення деградації та моделі відмов для використання результатів аналізу машинного навчання для забезпечення покращеного технічного обслуговування та надійності.



Рисунок 1 – Цільова структура ООС

Після огляду нової структури ООС, першим кроком стала розробка ООБД, щоб мінімізувати будь-які часові затримки через помилки або несумісність, з якими стикаються традиційні бази даних, коли їх використовують разом з методами машинного навчання.

Нова база даних була повністю створена на мові Python з використанням інструментів, наданих ООБД. База даних об'єктів - це ООБД з відкритим вихідним кодом для прозорого та

постійного зберігання об'єктів Python. Оскільки ООБД повністю написана на Python, для роботи з базою даних не потрібна окрема мова, і це не дуже впливає на код, щоб зробити об'єкти стійкими. Крім того, немає ніякої бази даних, яка частково приховує базу даних. Використання ООБД краще, ніж використання об'єктно-реляційного відображення, оскільки в ньому майже немає нічого між кодом і базою даних, а зв'язки між об'єктами обробляються дуже природно, підтримуючи складні об'єктні графи без з'єднань. Як було показано, рішення використання ООБД значно підвищить швидкість взаємодії методів машинного навчання з даними, накопиченими системою.

Наступним кроком був вибір алгоритму, який би зміг визначити, коли виконується умова погіршення роботи механізмів. До цього часу реляційна база даних була найпоширенішою моделлю даних і переважна більшість сучасних систем баз даних базується на цій моделі. Поява домінування об'єктно-орієнтованого програмування в розробці програмного забезпечення та прагнення подолати деякі обмеження реляційної моделі призвели до розвитку об'єктно-орієнтованих баз даних. У запропонованій структурі ООС, база даних використовується в поєднанні з об'єктно-орієнтованим програмуванням. Існує загальновідома проблема між реляційними базами даних та об'єктно-орієнтованим програмуванням, яка називається "об'єктно-реляційна невідповідність". Ця невідповідність може виникнути лише тоді, коли об'єктно-орієнтована програма використовує реляційну базу даних для збереження даних. Замість того, щоб керувати зв'язками за допомогою різних таблиць зі спільними первинними ключами, ООБД дозволяє розробникам використовувати звичайні посилання на об'єкти Python. Таким чином, ООБД не вимагає попередньо визначеної структури стовпців і типів даних для об'єктів, які вона зберігає, що означає, що атрибути об'єктів можуть легко змінюватися як за кількістю, так і за типом. З усього вищесказаного випливає, що використання ООБД в новій структурі ООС є більш ефективним оскільки об'єктно-орієнтовані бази даних розроблені таким чином, що їх можна інтегрувати безпосередньо або без особливих зусиль з програмним забезпеченням, розробленим за допомогою об'єктно-орієнтованих мов програмування. Мета бази даних у запропонованій структурі ООС полягає в тому, щоб максимізувати швидкість методів машинного навчання і не зберігати тисячі непотрібних екземплярів даних. Для цього вона інтелектуально зберігає дані для навчання і стирає їх після того, як вони були використані для навчання алгоритму, звільняючи місце для нових навчальних даних, коли вони потрібні. Саме тому нова база даних отримала назву: База даних моніторингу стану (БДМС).

Як було доведено, рішення про використання ООБД значно підвищить швидкість взаємодії методів машинного навчання з даними, накопиченими системою. Наступним кроком був вибір алгоритму, який би зміг визначити, коли виконується умова погіршення стану механізмів.

ЛФВ - це алгоритм, вперше представлений Бройнігом у 2000 році, і його метою було виявити локальні викиди в наборі даних. Алгоритм не просто класифікує дані у бінарний спосіб, а саме, викиди чи ні, а скоріше присвоює кожній точці даних локальний коефіцієнт викидів, який показує, наскільки точка даних є викидом, щось подібне до кластеризації на основі щільності. Автори спочатку знайшли найменшу гіперсферу з центром у заданих вибірках, яка містила  $k$  найближчих сусідів, а ЛФВ обчислювали шляхом ділення  $k$  на об'єм гіперсфери. ЛФВ створює границю прийняття рішення з функції прийняття рішення, навченої на навчальному наборі даних який складається зі "звичайних" даних, а потім оцінює, чи є нова точка даних новинкою чи ні. Бажану межу прийняття рішення можна отримати, змінюючи ЛФВ поріг. ЛФВ працює дуже добре у багатьох випадках, часто перевершуючи конкурентів, наприклад, у виявленні мережевих вторгнень та в обробці класифікаційних еталонних даних. На закінчення, велика загальна застосовність, а також продемонстрована ефективність порівняно з іншими алгоритмами алгоритму ЛФВ є причинами того, що його було обрано в якості алгоритму для використання в нашій системі ООС.

Додатковою метою цієї статті є визначення з високою точністю, коли механізм змінює свій стан, за допомогою моніторингу значень, що відображають його стан. Виявлення зміни стану обладнання є дуже важливим для системи ООС, що розробляється. Щоб досягти цього, для

навчання алгоритму машинного навчання потрібні марковані дані, що представляють різні стани машин необхідні для навчання алгоритму машинного навчання. Етап навчання складається з навчання алгоритму на даних, що представляють один стан, з одночасним налаштуванням його параметрів для максимальної точності визначення, коли з'являються дані з різних станів. Потім налаштований алгоритм потрібно протестувати з новими невідомими даними, як для одного стану, так і для різних, і зробити висновок про його точність. Нарешті, цей процес також включає одночасне тестування нового БДМС для зберігання та доступу до даних. Детальну інформацію про судно можна побачити в Таблиці 1.

Таблиця 1. Опис судна

|                                     | Проектні характеристики судна    |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| Загальна довжина (м)                | 140                              |
| Водотоннажність (т)                 | 5900                             |
| Максимальна швидкість судна (вузли) | 27                               |
| Двигуни                             | Газотурбінний LM2500, 32 000 кВт |
| Гвинти                              | 2                                |

Використання симулятора, перевіреного на реальних даних. Буде використано набір даних з репозиторію UCI (2019), якій є для вільного використання, для навчання, валідації та тестування алгоритму ЛФВ. Набір даних включає 25 ознак (див. Таблицю 2) і для кожного масиву з 25 ознак наведено коефіцієнти для крутного моменту, корпусу, компресора та турбіни.

Всі показники, які опосередковано відображають стан системи, були отримані та збережені в наборі даних для всіх швидкостей судна. Дані для швидкості судна 18 вузлів були використані для навчання, валідації та тестування алгоритму, але аналіз чутливості кінцевої моделі було проведено для всього спектру різних швидкостей судна та експлуатаційних профілів.

Спочатку були зібрані дані для певної швидкості судна (18 вузлів). Потім ці дані були замінені на ті, що представляють ідеальний стан обладнання, і на ті, що представляють всі можливі умови деградації. Ідеальний стан вважається таким коли коефіцієнт зносу обладнання дорівнює одиниці, а інший стан позначається, коли коефіцієнт зносу не дорівнює одиниці. Наступний крок це збереження даних в БДМС. ООБД пропонує ефективний спосіб зберігання об'єктів. Ця структура може ефективно зберігати великі масиви інформації, зберігаючи у пам'яті нещодавно або часто використовувані об'єкти, які нещодавно або інтенсивно використовувалися, зберігаються у кеші пам'яті для прискорення роботи. Крім того, пошук по всій базі даних можна здійснювати дуже швидко, оскільки об'єкти зберігаються у збалансованій деревоподібній структурі даних. VTrees є ефективною структурою для зберігання великих обсягів інформації. VTrees бувають різних типів, наприклад, OOVTrees та IOVTrees. Перший тип оптимізовано для використання об'єктів як ключів, так і значень, а другий - для використання цілих чисел як ключів, а об'єктів як значень. Процес створення БДМС можна описати наступним чином: створіть кореневий об'єкт, щоб ініціювати бази даних та використання IOVTree для ефективного зберігання даних у кореневому об'єкті. Дані були успішно збережені до нової архітектури БДМС та алгоритму машинного навчання використовували дані безпосередньо звідти з максимальною швидкістю, оскільки алгоритм і база даних були побудовані на мові Python.

Таблиця 2 – Виміряні характеристики

|   | Одиниці |
|---|---------|
| Положення важеля                        | []      |
| Швидкість                               | [вузли] |
| Крутний момент на валу                  | [кН м]  |
| Швидкість                               | [об/хв] |
| Тяга (правий борт)                      | [Н]     |
| Тяга (порт)                             | [Н]     |
| Крутний момент на валу (порт)           | [кН м]  |
| Частота обертання валу (порт)           | [об/хв] |
| Крутний момент на валу (правий борт)    | [кН м]  |
| Частота обертання на валу (правий борт) | [об/хв] |
| Температура на виході                   | [°C]    |
| Швидкість газогенератора                | [об/хв] |
| Витрата палива                          | [кг/с]  |
| Сигнал керування                        | [%]     |
| Тиск повітря на виході                  | [бар]   |
| Температура повітря на виході           | [°C]    |
| Зовнішній тиск                          | [бар]   |
| Тиск на виході, л.с.                    | [бар]   |
| Керуючий сигнал                         | []      |
| Коефіцієнт тяги (правий борт)           | []      |
| Швидкість (правий борт)                 | [об/хв] |
| Коефіцієнт тяги (порт)                  | []      |
| Швидкість (порт)                        | [об/хв] |
| Крутний момент порт)                    | [кН м]  |
| Крутний момент (правий борт)            | [кН м]  |

На Рисунку 2 показано виконані етапи експерименту. Алгоритм навчався лише на значеннях, що представляють певний стан (ідеальний), а потім він був перевірений та протестований, як для прогнозування зміни стану, так і для прогнозування того, чи стан не змінився. Експеримент проводився двічі, один раз для компресора і один раз для турбіни.



Рисунок 2 – Етапи проведення експерименту

Метрикою, що використовувалася для визначення ефективності алгоритму, були точність передбачення, коли умова була змінена, і точність передбачення, коли умова залишалася незмінною. Точність визначається за формулою (1).

$$\text{Точність} = \frac{\text{Кількість правильних прогнозів}}{\text{загальна кількість прогнозів}} \quad (1)$$

Де чисельник в (1) означає кількість правильних прогнозів алгоритму, а знаменник - загальну кількість передбачень (включаючи помилкові).

Для експерименту 80% даних, що представляють деградацію, були використані для валідації а решту - для тестування. Щодо кількості навчальних даних, то з ідеального стану, 80% було використано для навчання, 10% - для валідації і 10% - для тестування. Мета використання валідаційного набору полягає в тому, щоб мати можливість встановити найкращі гіперпараметри для алгоритму ЛФВ з максимальною точністю. Найважливішими гіперпараметрами є  $k$  для виконання  $k$ -NN кластеризації та параметр "забруднення", який допомагає краще встановити порогове значення для границі.

Після того, як було визначено постановку експерименту, наступні кроки полягали у виконанні навчання та валідації алгоритму, визначення найкращих параметрів для найвищої точності та використання фінального алгоритму на тестовому наборі даних. Крім того, були потрібні подальші експерименти з меншою кількістю навчальних даних, щоб дослідити вплив, який впливає кількість навчальних даних на точність моделі. Нарешті, аналіз чутливості був проведений для всіх експлуатаційних профілів судна.

Параметри алгоритму, які були налаштовані, так: кількість сусідів та величина забруднення. Перший параметр - це мінімальна кількість точок даних, які можуть утворювати кластери в навчальному наборі даних. Другий параметр - це частка викидів у навчальному наборі даних, задана у відсотках, наприклад, значення 0.1 означає 10% забруднення. При підборі він використовується для визначення порогу прийняття рішення яка визначатиме, чи є нова точка даних аномальною, чи ні. Найкращі значення параметрів алгоритму виявилися однаковими як для турбінного, так і для компресорного експериментів, що свідчить про те, що ці параметри мають загальну застосовність до конкретної задачі. Це важливий результат, який означає, що налаштований алгоритм може бути застосований до різного обладнання для виявлення зносу, якщо його навчити на даних про його поточний стан. На Рис. 3 показано точність експерименту з компресором. Алгоритм відмінно працює з середньою точністю для правильного передбачення, якщо умова має змінитися чи ні, становить 92%.

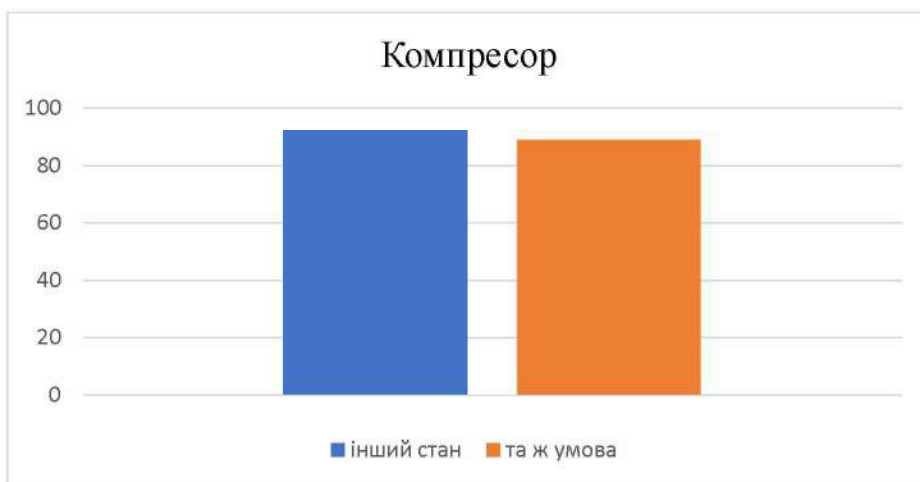


Рисунок 3 – Результати експерименту для компресора

На Рис. 4 показано точність експерименту з турбіною. Алгоритм знову працює дуже добре із середньою точністю для правильного передбачення, якщо виконується умова змінилася чи ні, 90%. Висока точність обох експериментів запевняє нас, що алгоритм виявить будь-яке відхилення від поточного стану техніки.

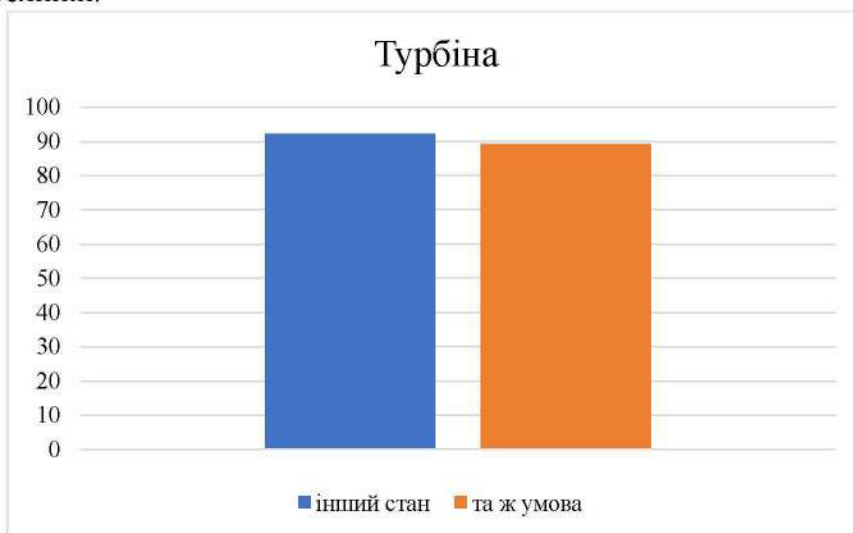


Рисунок 4 – Результати експерименту для турбіни

Точність експериментів відноситься до певної кількості навчальних даних. У експерименті було використано приблизно 6550 прикладів для обох випадків (6550 для компресора та 6554 для турбіни). Цікаво дослідити, чи можна зменшити кількість даних так, щоб навчання алгоритму може бути швидшим. Як видно з Рис. 5, для того, щоб мати хоча б 80% точності у правильному визначенні як однієї умови, так і іншої, алгоритм потребує щонайменше 5000 тренувальних даних.

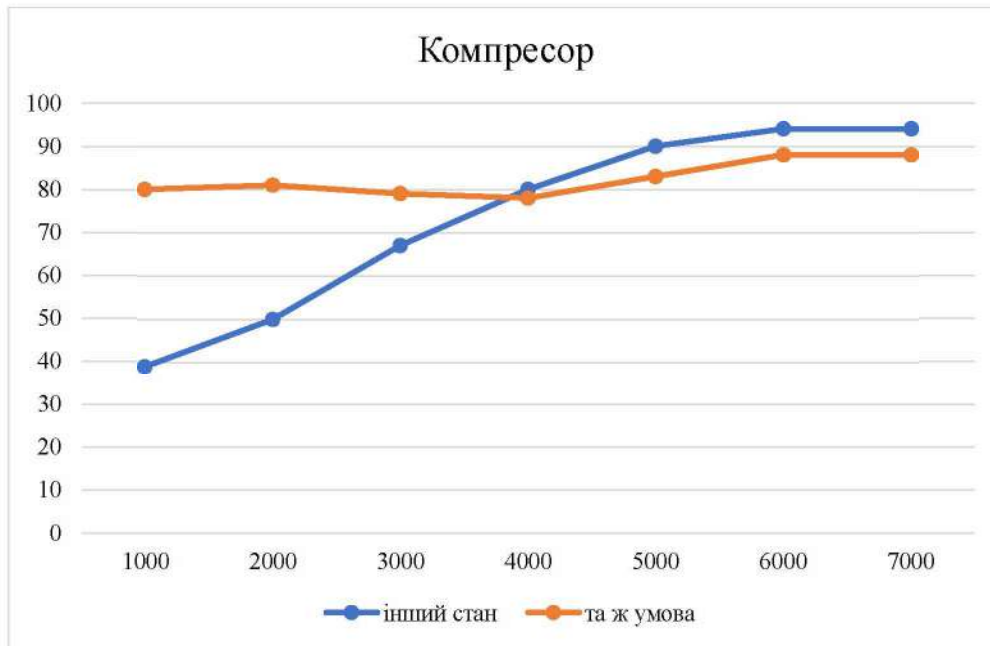


Рисунок 5 – Вплив навчальних даних на точність моделі

Однак використання 6550 навчальних даних дасть суттєво вищу точність (+10%) і йому слід надавати перевагу (Рис. 6). Переходячи до турбіни, Рис. 5 показує результати, подібні до результатів для компресора. Здається, що для досягнення 80% точності моделі потрібно щонайменше 5000 точок даних точності, що також вказує на те, що поріг у 6550 точок даних також може бути застосований і в цьому випадку. Експерименти, проведені щодо кількості навчальних даних, необхідних для достатньої точності, показують, що поріг 6550 навчальних даних необхідний для прийнятної відсоток точності. Проте, оскільки майже половина даних відноситься до різних умов, але не умови, які вважаються погіршенням, очікується, що кількість навчальних даних для розуміння погіршення умов буде набагато меншою в реальності. Подальше тестування з даними, зібраними з датчиків на борту комерційних суден допоможе встановити цей поріг з більшою впевненістю.

Оскільки швидкість судна використовувалася як параметр, що вказує на експлуатаційний профіль судна, важливо подивитися, як алгоритм працює на різних швидкостях судна.

Слід зазначити, що для кожного операційного профілю алгоритм навчається заново, з параметрами, які були встановлені. Це означає, що в цьому експерименті немає валідаційного набору. Доступні швидкості суден у базі даних такі: 3, 6, 9, 12 вузлів.

На Рисунку 7 показано результати аналізу чутливості для компресора. Середнє значення точність правильного визначення зміни стану і того, що стан є однаковим для всіх швидкостей становить 94% і 89% відповідно. Це дає в цілому 92% точність і показує узгодженість алгоритму з різними експлуатаційними профілями.

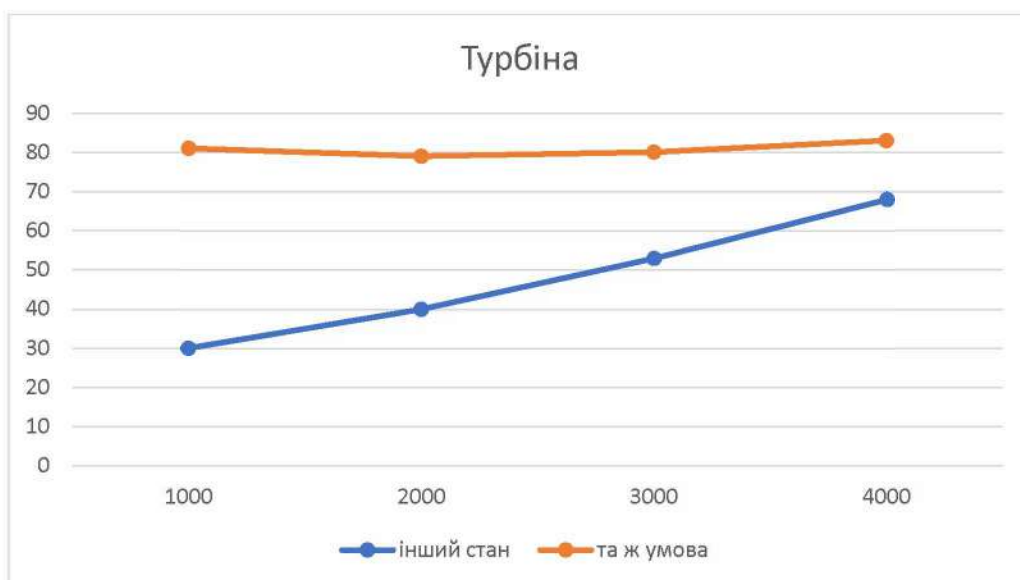


Рисунок 6 – Вплив навчальних даних на точність моделі

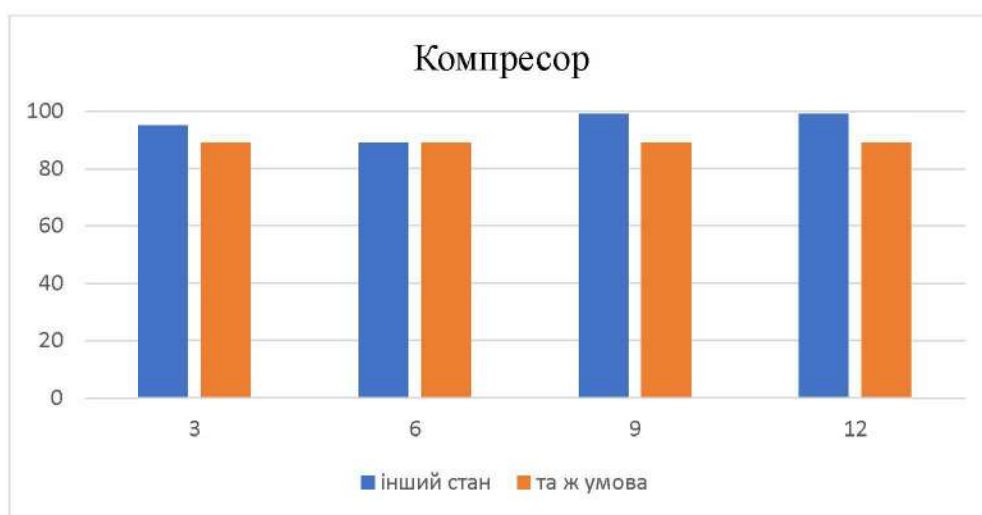


Рисунок 7 – Точність для різних швидкостей судна для компресора

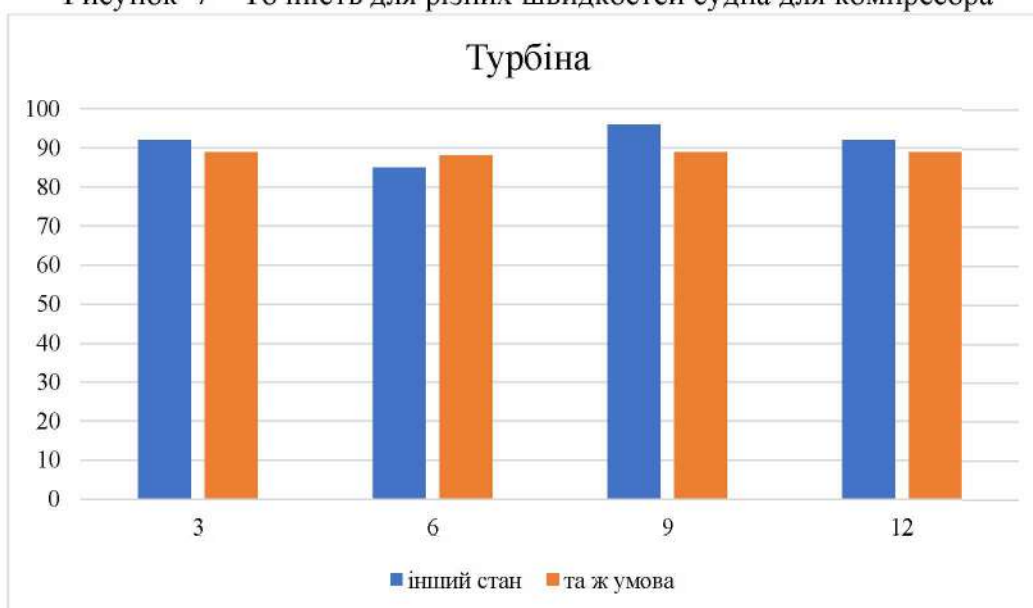


Рисунок 8 – Точність для різних швидкостей судна для турбіни

З іншого боку, результати для турбіни можна побачити на Рис. 8. Тут середні значення точності визначення зміни чи ні для всіх швидкостей становить 90% і 88% відповідно. Це дає в цілому 89% загальної точності, що знову ж таки вказує на достатню кількість точності для всіх операційних профілів. В цілому, аналіз чутливості довів, що алгоритм є достатньо надійним, щоб працювати з високою точністю у всіх експлуатаційних профілях судна, як для турбіни, так і для компресора. Це означає, що його можна використовувати для безперервного моніторингу деградації обладнання в усіх експлуатаційних режимах судна і таким чином підвищуючи надійність і точність системи діагностики і прогнозування.

**Висновки.** У цій статті представлено нову структуру БДМС, яка поєднує об'єктно-орієнтовану базу даних, методи машинного навчання та систему діагностики і прогнозування. Основні частини цієї системи були протестовані на даних, що відображають процес деградації компресора та турбіни суднової енергетичної установки. Експериментальні результати показали, що алгоритм з високою точністю виявляє зміни стану обох типів обладнання. Крім того, той факт, що налаштований алгоритм демонстрував стабільні параметри для турбіни та компресора, підтверджує його універсальність і можливість застосування до різних машин. Аналіз чутливості виявив, що експлуатаційний профіль судна не впливає на точність прогнозування, незалежно від швидкості руху. Також дослідження підтвердило важливість кількості навчальних даних для ефективності алгоритму, проте подальші експерименти з реальними даними можуть показати зниження мінімального необхідного порогу. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої системи моніторингу судових механізмів у реальному часі. Вона має значні переваги перед традиційними методами технічного обслуговування, що відкриває перспективи для широкого впровадження в морській галузі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Головань, А. І. (2023). Концептуальна модель планування та оптимізації графіків технічного обслуговування вантажних суден. *Vodnij Transport*, 1(37), 107–115. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12>
2. Maione, F., Lino, P., Maione, G., & Giannino, G. (2024). A Machine Learning Framework for Condition-Based Maintenance of Marine Diesel Engines: A Case study. *Algorithms*, 17(9), 411. <https://doi.org/10.3390/a17090411>
3. Jimenez, V. J., Bouhmala, N., & Gausdal, A. H. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), 358–386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003>
4. Yigin, B., & Celik, M. (2024). A prescriptive model for failure analysis in ship machinery monitoring using generative adversarial networks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 493. <https://doi.org/10.3390/jmse12030493>
5. Kocak, G., Gokcek, V., & Genc, Y. (2023). Condition Monitoring and Fault Diagnosis of a Marine Diesel Engine with Machine Learning Techniques. *Pomorstvo*, 37(1), 32–46. <https://doi.org/10.31217/p.37.1.4>
6. Vorkapić, A., Radonja, R., Babić, K., & Martinčić-Ipšić, S. (2020). MACHINE LEARNING METHODS IN MONITORING OPERATING BEHAVIOUR OF MARINE TWO-STROKE DIESEL ENGINE. *Transport*, 35(5), 462–473. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14038>
7. Elijah, O.; Ling, P.A.; Rahim, S.K.A.; Geok, T.K.; Arsad, A.; Kadir, E.A.; Abdurrahman, M.; Junin, R.; Agi, A.; Abdulfatah, A.M.Y. A Survey on Industry 4.0 for the Oil and Gas Industry: Upstream Sector. *IEEE Access* 2021, 9, 144438–144468
8. Angelopoulos, A.; Giannopoulos, A.; Nomikos, N.; Kalafatelis, A.; Hatziefremidis, A.; Trakadas, P. Federated Learning-Aided Prognostics in the Shipping 4.0: Principles, Workflow, and Use Cases. *IEEE Access* 2024, 12, 6437–6454
9. Aslam, S.; Michaelides, M.P.; Herodotou, H. Internet of Ships: A Survey on Architectures, Emerging Applications, and Challenges. *IEEE Internet Things J.* 2020, 7, 9714–9727

10. Lexau, S.J.N.; Breivik, M.; Lekkas, A.M. Automated Docking for Marine Surface—A survey. *IEEE Access* 2023, 11, 132324–132367
11. Hasan, A.; Widyotriatmo, A.; Fagerhaug, E.; Osen, O. Predictive Digital Twins for Autonomous Ships. In *Proceedings of the 2023 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Bridgetown, Barbados, 16–18 August 2023; pp. 1128–1133

## REFERENCES

1. Golovan, A. I. (2023). Conceptual model of planning and optimization of cargo ship maintenance schedules. *Vodnij Transport*, 1(37), 107-115. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12>
2. Maione, F., Lino, P., Maione, G., & Giannino, G. (2024). A Machine Learning Framework for Condition-Based Maintenance of Marine Diesel Engines: A Case study. *Algorithms*, 17(9), 411. <https://doi.org/10.3390/a17090411>
3. Jimenez, V. J., Bouhmala, N., & Gausdal, A. H. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), 358–386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003>
4. Yigin, B., & Celik, M. (2024). A prescriptive model for failure analysis in ship machinery monitoring using generative adversarial networks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 493. <https://doi.org/10.3390/jmse12030493>
5. Kocak, G., Gokcek, V., & Genc, Y. (2023). Condition Monitoring and Fault Diagnosis of a Marine Diesel Engine with Machine Learning Techniques. *Pomorstvo*, 37(1), 32–46. <https://doi.org/10.31217/p.37.1.4>
6. Vorkapić, A., Radonja, R., Babić, K., & Martinčić-Ipšić, S. (2020). MACHINE LEARNING METHODS IN MONITORING OPERATING BEHAVIOUR OF MARINE TWO-STROKE DIESEL ENGINE. *Transport*, 35(5), 462–473. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14038>
7. Elijah, O.; Ling, P.A.; Rahim, S.K.A.; Geok, T.K.; Arsad, A.; Kadir, E.A.; Abdurrahman, M.; Junin, R.; Agi, A.; Abdulfatah, A.M.Y. A Survey on Industry 4.0 for the Oil and Gas Industry: Upstream Sector. *IEEE Access* 2021, 9, 144438–144468
8. Angelopoulos, A.; Giannopoulos, A.; Nomikos, N.; Kalafatelis, A.; Hatziefremidis, A.; Trakadas, P. Federated Learning-Aided Prognostics in the Shipping 4.0: Principles, Workflow, and Use Cases. *IEEE Access* 2024, 12, 6437–6454
9. Aslam, S.; Michaelides, M.P.; Herodotou, H. Internet of Ships: A Survey on Architectures, Emerging Applications, and Challenges. *IEEE Internet Things J.* 2020, 7, 9714–9727
10. Lexau, S.J.N.; Breivik, M.; Lekkas, A.M. Automated Docking for Marine Surface—A survey. *IEEE Access* 2023, 11, 132324–132367
11. Hasan, A.; Widyotriatmo, A.; Fagerhaug, E.; Osen, O. Predictive Digital Twins for Autonomous Ships. In *Proceedings of the 2023 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Bridgetown, Barbados, 16–18 August 2023; pp. 1128–1133

*Honcharuk I.P., Golovan A.I.*

### **INNOVATIVE MACHINE LEARNING SYSTEM FOR REAL-TIME MONITORING OF SHIPBOARD EQUIPMENT**

*This article presents an innovative online condition monitoring system. It consists of a new object-oriented database, a machine learning algorithm, and a detailed model for predicting equipment failures. The condition monitoring database, which is an object-oriented database built entirely in Python, was developed to avoid any relational-object mismatch problems that often arise when using relational databases in complex applications using machine learning techniques. The database will intelligently store data from various sensors and then organize the data into a pipeline to the diagnostic and prognostic*

*system, offering a continuous assessment of the condition of ship's machinery with high speed and accuracy. The proposed condition-based maintenance system is based on detecting changes in equipment condition in real time, using a local deviation factor algorithm to detect novelty. Training, validation, and testing of the algorithm were performed using data on the degradation of the power plant. The results show that once the algorithm was tuned, it detected with high accuracy when the mechanical system changes state for both the turbine and compressor, and for different ship operating profiles.*

**Keywords:** *technical condition, monitoring, forecasting, real-time, object-oriented database, machine learning, artificial intelligence, local deviation factor, ship's machinery, mechanisms, ship.*

*Стаття прийнята 01.03.2025*

© Тарасенко Т. В., Мазур Т. М.

## ОСНОВНІ МЕТОДИ МОНІТОРІНГУ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ НА СУДНІ ЗГІДНО ДОДАТКУ VI МК МАРПОЛ 73/78

Управління енергоефективністю є розробкою, впровадженням у суднову практику та постійним поліпшенням механізму, що сприяє підвищенню енергетичної ефективності суднових операцій. У положеннях нормативних документів ІМО розглядається можливість раціонального використання енергетичних ресурсів судна, зниження споживання палива під час виконання суднових операцій. Це, у свою чергу, дає можливість скоротити викиди парникових газів в атмосферу, включаючи викиди CO<sub>2</sub>, а також зменшить загальні витрати Компанії на енергетичні ресурси, підвищуючи її конкурентоспроможність. Найкращі способи оптимізації та підтримки енергоефективності судна плануються та реалізуються з використанням Плану управління енергоефективністю судна. Цей план описує заходи, які необхідно застосовувати на борту та всередині судноплавної компанії, щоб забезпечити безперебійну роботу та максимальну ефективність судна. Критичний аналіз того, чи корисні ці заходи, окупності інвестицій, які вони пропонують, та змін, необхідних у процесі для його покращення, можна провести за допомогою Індексу енергоефективності (ЕЕОІ). Також не можна виключати роль екіпажу судна для впровадження ефективних заходів відповідно до Суднового плану управління енергоефективністю. Вони допоможуть надати необхідні звіти про продуктивність та зворотний зв'язок для берегового офісу, виконуючи важливу роль у збиранні цінної інформації, яка допоможе у подальшому покращенні плану.

*Ключові слова:* енергетична ефективність, моніторинг енергоефективності, Експлуатаційний коефіцієнт енергоефективності, енергетична перевірка судна.

Згідно вимог Додатку VI, гл. 4, пр. 19 Міжнародної конвенції по запобіганню забруднення з суден (МАРПОЛ 73/78) правила енергоефективності суден поширюються на всі судна місткістю 400 і більше. Положення цього розділу мають на меті підвищення енергоефективності суден за допомогою виконання комплексу технічних експлуатаційних вимог, які призведуть до скорочення викидів будь яких речовин, що виділяються з рідкого палива і в процесі згоряння. [1]

Розрізняють основні чотири етапи в основі процесу управління енергоефективністю: планування, впровадження, моніторинг, оцінка та покращення, як показано на рис. 1



Рисунок 1 – Схема процесу управління енергоефективністю

Основними завданнями «Планування», яке є найважливішим етапом у процесі управління енергоефективністю на судах, є визначення поточного енергетичного статусу судна, цілей енергоефективності судна та спеціальних заходів, спрямованих на підвищення енергоефективності судна. На енергетичну ефективність експлуатації судна впливають такі аспекти (табл.1).

Таблиця 1. Заходи щодо підвищення енергоефективності

| Навігаційні                                     | Управління                            | Морехідні якості                              | Бункеровка   | Суднова СЕУ                                   | Споживання енергоресурсів   | Організаційні                            |
|---|---------------------------------------|---|--|---|---|--|
| Виконання плану переходу судна                  | Ротація портів заходів судна          | Ходові характеристики судна, диферент, осадка | Управління бункеруванням судна                           | Головні та допоміжні двигуни                  | Опалення, венти-ляція, кондиціонування повітря, освітлення, інші споживачі електроенергії | Розподіл обов'язків та відповідальності  |
| Метеорологічні умови навігації та морські течії | Фрахтування, виконання умов договору  | Стан корпусу судна                            | Планування бункерування в портах заходів                 | Ефективність головних двигунів                | Ізоляція та втрати енергії  | Поінформованість та свідомість персоналу |
| Призначення швидкості ходу                      | Суднові операції в портах та на рейді | Стан гребного валу                            | Під час бункерування: розподіл бункера між танками судна | Ефективність використання допоміжних двигунів | Інсінератор   | Компетентність та підготовка             |
|   | Вантажні операції                     | Авторулеві та перо керма                      | Планування витрати бункера із танків                     | Ефективність використання котлів              | Компресори  | Взаємодія та обмін інформацією           |
|   |                                       | Підрулюючі пристрої                           |  |   | Рефрижераторні камери та контейнери   | Управління процесом                      |

Після того, як пройшов перший етап визначення заходів щодо підвищення енергоефективності, розробляється ряд заходів щодо їх впровадження у виробничу діяльність Компанії. Такі заходи можуть включати:

- призначення суднового та берегового персоналу, відповідального за впровадження та підтримання схвалених заходів щодо енергоефективності, розподіл відповідальності та повноважень такого персоналу;
- інформування персоналу про енергетичну політику та зусилля Компанії, спрямовані на розумну економію паливно-енергетичних ресурсів;
- забезпечення виконання персоналом своїх функціональних обов'язків щодо підвищення енергоефективності на судах Компанії;
- визначення необхідного рівня компетентності персоналу та необхідності в додатковому навчанні та тренуваннях;
- виконання затверджених заходів відповідно до встановлених для них методів реалізації та критеріїв належного виконання;
- забезпечення доступу до інформації про найкращі практики та технології, що застосовуються в судноплаванні, спрямовані на енергозбереження.

Етап моніторингу енергоефективності судна включає [4]:

- збір оперативної інформації, що відноситься до енергоефективності судна;
- кількісний вимір ключових характеристик, що визначають енергетичну ефективність з використанням схвалених інструментів моніторингу;
- періодичну перевірку, аналіз та оцінку поточного стану енергоефективності судна з урахуванням поставлених цілей;

- коригування поточного стану енергоефективності, зокрема усунення виявлених невідповідностей.

Безперервний та послідовний збір оперативної інформації з енергоефективності судна є основою моніторингу, поряд із застосуванням інструментів вимірювання енергоефективності. Оперативна інформація, що стосується енергоефективності судна, включає, але не обмежується цим[3] :

- добові донесення, щомісячні та рейсові звіти;
- записи в суднових журналах;
- звіти технічної служби судна щодо роботи суднових механізмів та систем;
- значення експлуатаційного коефіцієнта енергоефективності, інформацію щодо пройденої відстані, кількості та типу витраченого палива, перевезеного вантажу, кількості викидів;
- результати суднових нарад та перегляду суднової системи управління безпекою;
- результати внутрішніх аудитів та технічних інспекцій судна;
- рейсові завдання, карти погоди;
- пропозиції персоналу, спрямовані на підвищення енергоефективності судна.

Види моніторингу енергоефективності судна представлені на рис.2.

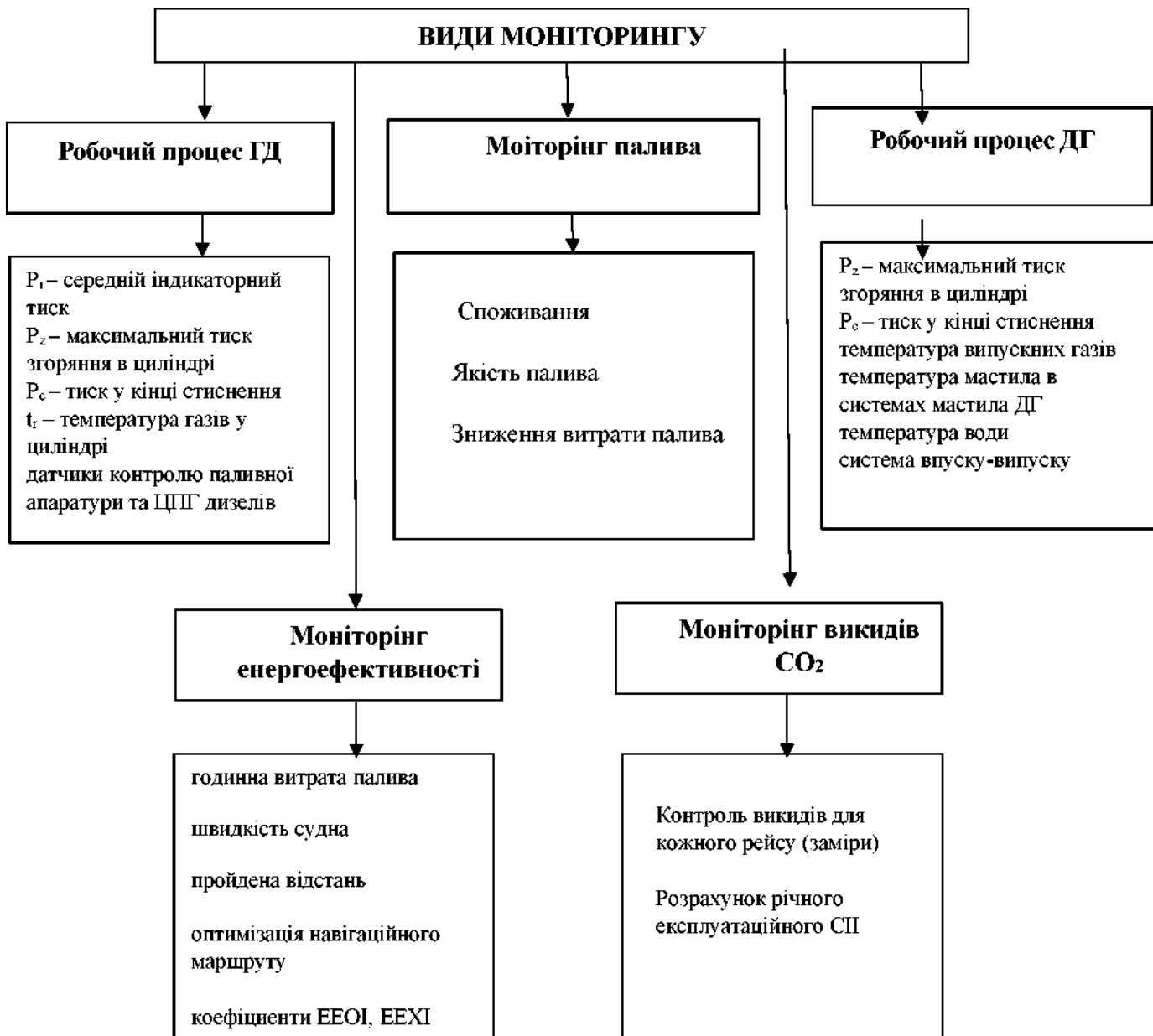


Рисунок 2 – Види моніторингу енергоефективності судна.

Енергоефективність судна має контролюватись кількісно, з використанням встановлених інструментів моніторингу. Компанія використовує як інструмент моніторингу Експлуатаційний коефіцієнт енергоефективності - ЕКЕЕ (Energy Efficiency Operational Indicator -EEOI), який є міжнародно визнаним інструментом визначення кількісного коефіцієнта енергоефективності судна в процесі експлуатації. [2]

Методика розрахунку ЕКЕЕ заснована на рекомендаціях, наведених у Керівництві ІМО МЕРС.1/Circ.684.

Для визначення ЕКЕЕ необхідно :

- визначити період, на який розраховується ЕКЕЕ;
- визначити джерела для збирання даних;
- зібрати дані;
- конвертувати дані у необхідний формат;
- розрахувати ЕКЕЕ;

Для одного рейсу розрахунок коефіцієнту ЕКЕЕ визначається :

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times CF_j}{m_{cargo} \times P} \tag{1}$$

Де середній показник для всіх рейсів розраховується як;

$$Average EEOI = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ij} \times C_{ij})}{\sum_i (m_{cargo,i} \times D_i)} \tag{2}$$

де, j- тип палива,

i – кількість рейсів,

$FC_{ij}$ - маса спожитого палива j у рейсі i,

$CF_j$ - маса палива (CO<sub>2</sub>) перетворена для кожного типу палива j ,

m – вага перевезеного вантажу або виконаного рейсу (кількість TEU або пасажирів),

D – відстань у морських милях, що відповідає перевезаному вантажу або виконаному рейсу.

Дані щодо кожного виконаного рейсу, необхідних для розрахунку значень ЕКЕЕ, повинні регулярно заноситись старшим механіком у таблицю, встановленої форми. (табл. 2).

Таблиця 2. Стандартизований звіт даних для розрахунку.

| Method used to measure fuel oil consumption  | Fuel oil consumption(t) |          |     |        |     |     |           | Hours underway (h) | Distance Travelled (nm) | Power output (rated power) (kW) |                       | Ise Class (if applicable) | EEDI (if applicable) (gCO <sub>2</sub> /t.nm) | DWT | NT | GRT | Ship Type | IMO number | End date   | Start date |
|--|-------------------------|----------|-----|--------|-----|-----|-----------|--------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------|---|-----|----|-----|-----------|------------|------------|------------|
|  | Ethanol                 | Methanol | LNG | Butane | HFO | LEO | Diesel/GO |                    |                         | Auxiliary Engine(s)             | Main Propulsion Power |                           |   |     |    |     |           |            |            |            |
| method using bunker fuel oil tank monitoring |                         |          |     |        |     |     |           |                    |                         |                                 |                       |                           |   |     |    |     |           |            | 31/12/2024 | 01/01/2024 |

На основі цих даних автоматично визначаються значення коефіцієнта для:

- кожного виконаного судном рейсу;
- число рейсів, виконаних судном за календарний місяць, квартал, рік.

Дані щодо баластових переходів, а також дані щодо переходів, не пов'язаних з перевезенням вантажу (наприклад, перехід судна до місця докування) повинні бути включені до таблиці розрахунку ЕКЕЕ.

При розрахунку ЕКЕЕ за певний проміжок часу (місяць, квартал, рік) враховуються лише рейси, які були завершені у цей проміжок часу.

Значення ЕКЕЕ за рейс(и) направляється у щомісячному судовому звіті Призначеній особі для порівняння зі значеннями коефіцієнта за попередні рейси, аналізу та, за необхідності, вироблення коригуючих заходів. Коригувальні заходи визначаються Призначеною особою разом із капітаном, технічним та оперативним менеджером. Середньорічне значення ЕКЕЕ використовується Технічним менеджером та Призначеною особою під час виконання щорічної оцінки та аналізу енергоефективності судна.

Оцінка та покращення є фінальним етапом процесу управління енергоефективністю. Результати цього етапу є вступними даними для початку наступного циклу управління енергоефективністю судна, а саме для першого етапу циклу – «Планування». Метою оцінки є визначення ступеня впровадження та ефективності схвалених енергетичних заходів. Оцінка дозволяє глибше зрозуміти які показники судових операцій впливають на ефективність, які заходи слід виконувати наступного року для підвищення енергоефективності судна [5].

Енергетична перевірка судна – це інспекція судна, в ході якої дається оцінка загального споживання енергії на судні та ефективності основних судових споживачів енергії. Перевірка включає інспекцію машинного відділення, судових механізмів і систем, визначення можливих джерел енергетичних втрат. У ході виконання енергетичної перевірки судна визначається ступінь впровадження та ефективності схвалених енергетичних заходів на судні, причини недостатнього впровадження та ефективності схвалених енергетичних заходів, рекомендації щодо оптимізації загального споживання енергії на борту. [6]

В результаті проведення моніторингу процесів енергоефективності судноплавна компанія має на меті забезпечити постійну придатність, адекватність та результативність заходів щодо підвищення енергоефективності на судах. У ході виконання аналізу процесу управління енергоефективністю приймаються рішення про зміни в енергетичній політиці, цілях та інших елементах процесу енергетичного менеджменту, виділення та розподіл необхідних ресурсів та міри щодо подальшої ефективності моніторингу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. International Maritime Organization. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78), Annex VI. [Online]. – 2017. – 65p. – Mode of access: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/publications/Documents/Supplements.pdf> (date of access: 12.03.2025).
2. International Maritime Organization. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI) . Resolution MEPC.1/Circ.684 [Online]. – 2009. –12 p. –Mode of access: <https://gmn.imo.org/wp-content/uploads/2017/05/Circ-684-EEOI-Guidelines.pdf> . (date of access: 18.03.2025).
3. Регістр судноплавства України. Правила запобігання забрудненню з суден.-К: 2020. – 237 с. – Режим доступу: <https://www.shipregister.ua/wp-content/uploads/2022/09/Marpol.pdf> (дата звернення: 21.03.2025).
4. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві [Електронний ресурс] / В. І. Залож, Т. В. Тарасенко, П. С. Суворов // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2023. – № 2. – С. 37-45. – Режим доступу: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05> (дата звернення: 22.03.2025).
5. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Аналіз трансформації оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому водному транспорті [Електронний ресурс] / В. І.

Залож, Т. В. Тарасенко, П. С. Суворов // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 161–170. – Режим доступу: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.18> (дата звернення: 20.03.2025).

6. Mazur T. Energy efficiency management process on vessels/T.Mazur// Znanstvena misel journal.- Slovenia,2023. – №79. – С.79-84. – Mode of access: <https://www.znanstvena-journal.com/wp-content/uploads/2023/06/Znanstvena-misel-journal-2023.pdf> (date of access: 24.03.2025).

#### REFERENCES

1. International Maritime Organization, (2017). International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78), Annex VI. [Online]. 65p. [Viewed 12 March 2025]. Available from: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/publications/Documents/Supplements.pdf>
2. International Maritime Organization, (2009). Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI) . Resolution MEPC.1/Circ.684 [Online]. 12 p. [Viewed 18 March 2025]. Available from: <https://gmn.imo.org/wp-content/uploads/2017/05/Circ-684-EEOI-Guidelines.pdf>
3. Rehistr sudnoplavstva Ukrainy. Pravyla zapobihannia zabrudnenniu z suden [Online] [Viewed 21 March 2025]. 2020. 237p. <https://www.shipregister.ua/wp-content/uploads/2022/09/Marpol.pdf>
4. Suvorov P. S., Tarasenko T. V., Zalozh V. I. Deiaki pytannia otsinky enerhoefektyvnosti suden v umovakh enerhetychnoho perekhodu u vnutrishnomu sudnoplavstvi [Online]. Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia [Viewed 20 March 2025]. 2023. Vol. № 2(2023). P. 37-45. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>
5. Suvorov P. S., Tarasenko T. V., Zalozh V. I. Analiz transformatsii otsinky enerhoefektyvnosti suden v umovakh enerhetychnoho perekhodu u vnutrishnomu vodnomu transporti. [Online]. Vodnyi transport. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnogo universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. [Viewed 20 March 2025]. 2023. Vol 1(37). P. 161-170. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.18>
6. Mazur T. (2023). Energy efficiency management process on vessels. Znanstvena Misel Journal, 79, 79–84. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8070666>

#### BASIC MONITORING METHODS FOR ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT ON SHIPS ACCORDING TO ANNEX VI OF MARPOL 73/78

*Energy efficiency management is the development, implementation in ship practice and continuous improvement of a mechanism that contributes to increasing the energy efficiency of ship operations. The provisions of IMO regulatory documents consider the possibility of rational use of ship energy resources, reducing fuel consumption during ship operations. This, in turn, makes it possible to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere, including CO<sub>2</sub> emissions, and will also reduce the Company's overall costs for energy resources, increasing its competitiveness. The best ways to optimize and maintain the energy efficiency of a ship are planned and implemented using a Ship Energy Efficiency Management Plan. This plan describes the measures that need to be implemented on board and within the shipping company to ensure the smooth operation and maximum efficiency of the ship. A critical analysis of whether these measures are useful, the return on investment they offer, and the changes needed in the process to improve it can be carried out using the Energy Efficiency Index (EEOI). The role of the ship's crew cannot be ruled out either for implementing effective measures in accordance with the Ship Energy Efficiency Management Plan. They will help provide the necessary performance reports and feedback to the shore office, playing an important role in collecting valuable information that will help in further improving the plan.*

**Keywords:** energy efficiency, energy efficiency monitoring, Energy Efficiency Operational Indicator, ship energy audit.

Стаття прийнята 20.03.2025

© *Калініченко Є. В., Колеснік О. В., Калініченко Г. Є.*

## **ПОЗА ПРАВИЛОМ 19: АНАЛІЗ НЕОФІЦІЙНОЇ ІЄРАРХІЇ В ПРОЦЕСІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПІД ЧАС НАВІГАЦІЇ В ОБМЕЖЕНІЙ ВИДИМОСТІ**

*Стаття присвячена вивченню ролі неофіційної ієрархії в процесі прийняття рішень на морі, зокрема в умовах обмеженої видимості, коли традиційні навігаційні правила, зокрема Правило 19 Міжнародних правил запобігання зіткненням суден, можуть бути недостатніми. У таких умовах екіпажі часто змушені спиратися на неформальні механізми взаємодії та ухвалення рішень, які відрізняються від офіційних процедур і зосереджуються на реальному досвіді, експертизі та здатності швидко реагувати на зміни обставин.*

*Правило 19 МППЗС-72 визначає основні принципи поведінки суден за умов обмеженої видимості, однак, у реальних умовах на морі, коли швидкість прийняття рішень є критично важливою, чітке дотримання формальних норм не завжди є оптимальним. У статті підкреслюється, що неофіційна ієрархія, яка ґрунтується на довірі та взаємоповазі між членами екіпажу, стає ключовим фактором для забезпечення безпеки та ефективності маневрування в складних умовах.*

*Дослідження охоплює аналіз реальних морських ситуацій, де екіпажі приймають важливі рішення не тільки на основі правил, але й завдяки оперативним консультаціям, аналізу досвіду кожного члена екіпажу, що дозволяє швидше реагувати на зміни обстановки. Важливою частиною дослідження є визначення того, як неофіційні структури та динаміка відносин між членами екіпажу впливають на результат прийнятих рішень. У статті використано методи якісного аналізу на основі спостережень за реальними ситуаціями на судах та інтерв'ю з досвідченими морськими фахівцями. Спеціальна увага приділяється випадкам, коли формальна ієрархія або ж правила зіткнення не можуть бути застосовані безпосередньо через складні погодні умови або неочікувані зміни на маршруті.*

*Стаття також пропонує практичні рекомендації для вдосконалення системи тренувань екіпажів, зокрема щодо розвитку комунікативних навичок, здатності адаптуватися до швидко змінюваних умов та формування більш гнучких структур управління. Висновки статті акцентують важливість підтримки неформальних механізмів прийняття рішень, які можуть істотно підвищити рівень безпеки мореплавства в екстремальних умовах.*

***Ключові слова:** морська безпека, Правило 19 МППЗС-72, обмежена видимість, судноводіння, ухилення, навігаційні ризики, комерційний тиск.*

**Постановка проблеми.** Неофіційна ієрархія на судні — це, по суті, система взаємодії, яка виходить за межі формальних норм управління, встановлених на рівні командувача або капітана. У ситуаціях, коли видимість на морі значно обмежена, прийняття рішень може бути делеговане іншими членами екіпажу в залежності від їхніх знань, досвіду та спроможності швидко оцінити ситуацію. Важливо зазначити, що неофіційна ієрархія формується, зокрема, завдяки здатності членів екіпажу швидко і без помилок визначити, хто має найбільший досвід чи компетенцію в конкретній ситуації, навіть якщо ця особа не займає офіційно найвищу посаду на борту.

Однією з головних проблем є те, що традиційні навігаційні рішення, що ґрунтуються на формальних правилах, можуть бути недостатніми в умовах низької видимості, коли важливо діяти з максимальною гнучкістю та розумінням контексту. У таких умовах, як показують приклади з досліджень, екіпажі часто звертаються до неофіційної ієрархії для прийняття оперативних рішень. У цьому випадку найбільший вплив на рішення має, зокрема, досвід кожного члена екіпажу та їх здатність швидко аналізувати ситуацію.

**Аналіз літературних джерел** У попередніх дослідженнях аналізувалися встановлення чітких процедур для взаємодії між суднами в умовах поганої видимості є важливим аспектом безпеки, але часто вирішальним фактором є суб'єктивна оцінка ситуації екіпажем. Обговорювалось, як автоматизовані системи, наприклад, AIS (система автоматичної ідентифікації суден), можуть допомогти у прийнятті рішень, але людський фактор все одно відіграє важливу роль. Було показано, як внутрішня ієрархія екіпажу і досвід можуть допомогти або завадити прийняттю правильних рішень в критичних ситуаціях, таких як обмежена видимість. Проаналізовано також конкретні інциденти, надаючи висновки про помилки, які були допущені в прийнятті рішень, а також те, як застосування новітніх технологій могло б допомогти уникнути катастроф.

**Мета статті** – дослідити вплив неофіційної ієрархії на процес прийняття рішень у морському середовищі в умовах обмеженої видимості, визначити фактори, що формують цю ієрархію, та оцінити її вплив на безпеку судноплавства.

**Викладення основного матеріалу.** Міжнародні правила запобігання зіткненням суден у морі (МППЗС-72) є основним документом, що регулює рух суден та забезпечує безпеку судноплавства. Проте, незважаючи на чітко визначені положення, у реальних умовах моряки часто стикаються з труднощами в їх практичному застосуванні. Особливо це стосується Правил 19, яке визначає порядок дій суден в умовах обмеженої видимості.

Правило 19 встановлює вимоги до маневрування суден, які знаходяться поза видимістю одне одного, спираючись виключно на радіолокаційні та звукові засоби виявлення. Однак у реальній практиці фактори, що не прописані в регламенті, значною мірою впливають на процес ухвалення рішень. До них належать характеристики судна, технічний стан навігаційного обладнання, досвід екіпажу та навіть культура безпеки, яка панує на борту.

**Правило 19, офіційний контекст і його обмеження.** Правило 19 МППЗС-72 стосується суден, що перебувають у районах обмеженої видимості та не мають можливості візуального контакту одне з одним. Основні положення цього правила включають:

1. Судна повинні рухатися з безпечною швидкістю, враховуючи умови видимості, завантаження та маневрені характеристики.
2. Кожне судно зобов'язане вести радіолокаційний контроль за навколишнім середовищем.
3. Якщо судно виявило інше судно за допомогою радіолокації, воно повинно уникати ризикованих маневрів, особливо тих, що передбачають різку зміну курсу вліво (за винятком випадків, коли це неминуче).
4. При виявленні судна за звуковими сигналами або коли радарна інформація є ненадійною, слід зменшити швидкість до мінімальної або повністю зупинитися.

Хоча ці положення є логічними та формально правильними, їх застосування в реальних умовах може спричинити труднощі. До основних проблем належать:

- невизначеність у пріоритетах – Правило 19 не встановлює жорсткої схеми дій у разі зближення суден, як це передбачено в інших розділах МППЗС-72. Кожен капітан змушений приймати рішення на основі особистого досвіду, що може призвести до різних інтерпретацій;
- залежність від технічних засобів – оскільки у видимість 100 м судноводії повністю покладаються на радар та AIS, якість і точність роботи цього обладнання стає критично важливою. Однак не всі судна мають сучасні радари з автоматичним визначенням ризику зіткнення.
- різний рівень підготовки екіпажів – один і той самий сценарій може бути по-різному оцінений екіпажами різних суден залежно від їхнього досвіду, традицій у компанії та навіть національних особливостей.
- неофіційна ієрархія суден – на практиці більші судна мають перевагу у процесі ухвалення рішень, навіть якщо це прямо не прописано в правилах. Наприклад, невеликі вантажні судна або риболовецькі траулери зазвичай намагаються уникати зустрічі з контейнеровозами або танкерами, оскільки вважають, що ті не змінять курс, навіть якщо зобов'язані це зробити.

Щоб продемонструвати складність застосування Правил 19, розглянемо дві реальні ситуації:

**Ситуація 1:** Два вантажних судна, що наближаються курсами що пересікаються. Обидва судна бачать одне одного лише на радарі, кожен намагається оцінити, чи є ризик зіткнення. Одне судно

вирішує змінити курс на 20° вправо, інше зменшує швидкість – але їх дії не узгоджені. У результаті маневри створюють ще більшу небезпеку.

**Ситуація 2: Великий контейнеровоз та малий балкер у густому тумані.** Контейнеровоз рухається на швидкості 14 вузлів, балкер – 8 вузлів. Балкер, побачивши контейнеровоз на радарі, очікує, що той змінить курс, однак контейнеровоз вважає, що саме менше судно має ухилитися. Через відсутність чіткої координації між суднами ризик зіткнення зростає.

Ці приклади показують, що формальна рівність суден за правилами не завжди відповідає реальності. У практичній навігації створюється неофіційна ієрархія, де певні типи суден фактично мають більше прав у процесі ухвалення рішень.

**Фактори, що формують неофіційну ієрархію при ухваленні рішень.** У реальних морських умовах ухвалення рішень залежить не лише від формальних вимог МПЗЗС-72, а й від низки неписаних правил, які моряки використовують на основі досвіду, ситуаційної обізнаності та особливостей експлуатації суден. У цьому розділі ми розглянемо три ключові фактори, які впливають на неофіційну ієрархію в процесі прийняття рішень у ситуаціях, що підпадають під дію Правила 19.

У морській практиці більші судна, такі як контейнеровози, танкери та пасажирські лайнери, мають фактичну перевагу перед меншими суднами (риболовецькими, буксирами, балкерами малої тоннажності). Це зумовлено такими причинами:

- великі судна мають довший гальмівний шлях та обмежену маневреність;
- сучасні великі судна мають кращі радари та системи прогнозування ризику;
- капітани менших суден, навіть якщо формально мають перевагу, часто ухиляються від маршруту більших суден, щоб уникнути потенційної небезпеки;
- контейнеровози та VLCC (Very Large Crude Carrier) мають велику циркуляцію повороту, що обмежує їхню можливість швидкої зміни курсу;
- судна з азимутальними рушійними або подвійними гвинтами (зокрема сучасні пасажирські та спеціалізовані судна) можуть здійснювати різкіші маневри, що інколи спонукає їх брати на себе більше ініціативи в ухваленні рішень.

Досвід екіпажу та рівень підготовки також має суттєвий вплив. Судна різних компаній мають різний підхід до управління ризиками. Великі судноплавні компанії часто працюють за більш жорсткими стандартами безпеки, ніж приватні власники малих суден.

Молоді капітани або офіцери, які не мають достатнього досвіду роботи в умовах обмеженої видимості, можуть вагатися у прийнятті рішень, чим створюють додаткові затримки у реагуванні.

Старі радари з обмеженими можливостями виявлення малих цілей можуть спричинити невпевненість в ухваленні рішень. Різний рівень автоматизації на суднах (наприклад, сучасні електронні навігаційні системи проти традиційної радіолокаційної навігації) впливає на швидкість і точність аналізу ситуації.

Політики компаній та вплив традицій можуть викликати так званий конфлікт ситуацій. Деякі судноплавні компанії наполягають на мінімізації ризиків за будь-яку ціну, що змушує екіпаж ухилитися навіть у ситуаціях, де вони мають формальну перевагу. Інші компанії вимагають чіткого дотримання МПЗЗС-72, навіть якщо це створює напружені ситуації з менш досвідченими екіпажами інших суден.

Досвідчені капітани з багаторічною практикою частіше ухвалюють рішення на основі професійної інтуїції, навіть якщо вони не повністю відповідають формальним правилам. Менш досвідчені капітани або молоді офіцери більше покладаються на букву закону, що може ускладнювати взаєморозуміння між суднами.

Наведемо приклади впливу комерційного тиску та пріоритету вантажних суден:

1. Контейнеровоз проти балкера – пріоритет графіка перевезень.

Місце і час – Гонконгський портовий підхід, 2020 рік. Судна:

- контейнеровоз (400 м, 200 000 тонн), швидкість – 18 вузлів;
- балкер (220 м, 70 000 тонн), швидкість – 10 вузлів.

Ситуація наступна.

Контейнеровоз рухається до порту за жорстким графіком — кожне запізнення призводить до штрафів і затримки розвантаження. Балкер прямує до якірної стоянки з меншою швидкістю. Контейнеровоз виявляє балкер за допомогою радару та бачить, що ризик зближення високий.

Події розвивались наступним чином.

Балкер очікує, що контейнеровоз ініціює ухилення, бо йде з більшою швидкістю та може маневрувати активніше. Контейнеровоз не змінює курс, оскільки комерційний тиск змушує його мінімізувати відхилення від маршруту. Судна зближуються до 0,5 милі, після чого балкер змінює курс, щоб уникнути аварійної ситуації.

Проаналізуємо ситуацію:

- комерційний тиск – контейнеровоз не хотів втратити час, оскільки будь-яка затримка означала фінансові втрати для компанії;
- неофіційна ієрархія – балкер, хоча і міг залишатися на своєму курсі, ухилився через тиск з боку комерційного судноплавства;
- ризики – подібні ситуації можуть призводити до аварійних маневрів, якщо судна не узгодять свої дії завчасно.

Таким чином, комерційний тиск часто змушує контейнеровози діяти агресивніше, а повільніші судна — ухилитися першими, навіть якщо цього не вимагають правила.

2. Танкер із небезпечним вантажем і суховантаж – страх втратити слот у порту.

Місце і час – Перська затока, 2018 рік. Судна:

- нафтовий танкер (300 м, 160 000 тонн), швидкість – 14 вузлів;
- суховантаж (180 м, 40 000 тонн), швидкість – 12 вузлів.

Ситуація наступна.

Танкер перевозить нафту і має вікно для швартування в порту, якщо він запізниться — отримає штраф і змушений чекати нове вікно. Суховантаж рухається транзитом, його графік не такий жорсткий. Танкер виявляє суховантаж на радарі, але не сповільнюється і не ухиляється.

Події розвивались наступним чином.

Суховантаж передає запит на УКХ-зв'язок, питаючи, чи змінить курс танкер. Танкер відповідає: "Ні, ми маємо жорсткий ETA (Estimated Time of Arrival), ухилийтеся ви". Суховантаж змушений знизити швидкість і змінити курс, щоб пропустити танкер.

Проаналізуємо ситуацію:

- комерційний тиск – танкер мав жорсткий графік доставки, що змушувало його уникати будь-яких змін курсу;
- роль вантажу – оскільки це був нафтовий танкер, екіпаж також уникав різких маневрів через ризик безпеки;
- наслідки – такі ситуації можуть створювати небезпеку у вузьких судноплавних районах, якщо інші судна не готові змінювати курс у відповідь.

Отже, танкери часто отримують неофіційний пріоритет у маневруванні, особливо якщо їхній графік розвантаження суворо обмежений.

3. Великий круїзний лайнер і вантажне судно – пріоритет пасажирських перевезень.

Місце і час – Карибське море, 2016 рік. Судна:

- круїзний лайнер (320 м, 150 000 тонн), швидкість – 22 вузли;
- контейнеровоз (270 м, 90 000 тонн), швидкість – 18 вузлів.

Скларлась наступна ситуація.

Круїзний лайнер рухається до порту відправлення з розкладом прибуття на причал, щоб прийняти нових пасажирів. Контейнеровоз рухається з меншою швидкістю, але йде по основному рекомендованому маршруту. Взаємне виявлення відбулося на 5-мильній дистанції, але жодне судно не ухиляється.

Події розвивались наступним чином.

Контейнеровоз передає УКХ-запит, чи змінить курс лайнер. Лайнер відповідає: "Ми на жорсткому графіку прибуття, розраховуємо, що ви зміните курс". Контейнеровоз ухиляється, змінюючи курс на 15 градусів, щоб уникнути конфлікту.

Аналіз ситуації показав наступне:

- комерційний тиск – круїзні лайнери працюють з фіксованими таймінгами, що змушує їх уникати затримок будь-якою ціною;
- неофіційна ієрархія – пасажирські судна часто мають пріоритет перед вантажними, хоча це не прописано в COLREG;
- ризик – якщо контейнеровоз не змінив би курс, лайнер міг би створити аварійну ситуацію.

Висновок – круїзні судна через комерційні обставини часто діють агресивніше, ніж інші судна, що змушує вантажні судна поступатися курсом.

Загальний аналіз комерційного тиску показав, що контейнеровози та пасажирські судна працюють за розкладом, і будь-яке відхилення призводить до штрафів. Танкери з небезпечним вантажем уникають маневрування, що змушує інші судна ухилятися першими. Судна з вільнішим графіком часто вимушені ухилятися навіть у випадках, коли це не їхній обов'язок.

Ці приклади підтверджують, що в морській навігації існує неофіційний пріоритет для певних категорій суден через комерційні фактори.

**Реальні випадки та комплексний аналіз інцидентів.** Розглянемо кілька типових ситуацій, що демонструють взаємодію між суднами в умовах обмеженої видимості та як неофіційна ієрархія впливала на ухвалення рішень.

#### 1. Балкер і танкер у тумані.

Балкер (довжина 180 м, осадка 10 м) рухався зі швидкістю 10 вузлів. Танкер (довжина 300 м, осадка 18 м) йшов зі швидкістю 12 вузлів. Обидва судна помітили одне одного на радарі на дистанції 6 миль. Балкер очікував, що танкер ухилиться, оскільки міг вільно маневрувати. Танкер не знизив швидкість, оскільки його екіпаж вважав, що балкер виконає ухилення.

У результаті за 3 хвилини до небезпечного зближення обидва судна одночасно змінили курс, що тільки погіршило ситуацію.

#### 2. Взаємодія контейнеровоза та риболовного судна.

Контейнеровоз (260 м, швидкість 16 вузлів) йшов у районі з активним рибальським промислом. Риболовне судно (довжина 30 м) мало обмежену маневреність через те що він виконував лов риби за допомогою трала. Контейнеровоз очікував, що рибалки ухиляться, оскільки вони були більш маневрені. Рибалки, навпаки, очікували, що контейнеровоз змінить курс, оскільки вони не могли маневрувати.

Відсутність комунікації призвела до аварійної зміни курсу контейнеровозом за 1 хвилину до критичного зближення.

#### 3. Зіткнення контейнеровоза та балкера в густому тумані в Тайванській протоці у 2019 році.

- Судна:
- контейнеровоз (280 м, 80 000 тонн), швидкість – 15 вузлів;
  - балкер (200 м, 50 000 тонн), швидкість – 10 вузлів.

Видимість знижена до менше 0,5 милі через густий туман. Обидва судна рухаються перехресними курсами. Радари фіксують зближення на 6-мильній дистанції, ризик зіткнення зростає. Балкер очікує, що контейнеровоз ініціює ухилення, оскільки той має більшу маневреність. Контейнеровоз вважає, що балкер має змінити курс першим, бо він рухається повільніше. Ніхто не ініціює ухилення вчасно, а за 2 хвилини до зіткнення обидва судна одночасно змінюють курс у різні сторони, що призводить до бортового удару.

Аналіз ситуації показав наступне:

- фактор неофіційної ієрархії – балкер підсвідомо очікував, що більший і швидший контейнеровоз буде ухилятися, тоді як контейнеровоз покладався на те, що повільніший балкер змінить курс;
- вплив швидкості – контейнеровоз не хотів знижувати швидкість, щоб не втратити хід у щільному судноплавному районі;
- роль комунікації – відсутність радіозв'язку між суднами (ніхто не уточнив наміри іншої сторони) призвела до невизначеності.

#### 4. Майже зіткнення між танкером і риболовецьким судном у Північному морі, 2017 рік.

Судна:

- нафтовий танкер (250 м, 120 000 тонн), швидкість – 12 вузлів;
- риболовецьке судно (45 м), швидкість – 6 вузлів.

Ситуація розвивалась за високої вологості й видимості, обмеженої до 1 милі.

Танкер рухається транзитом, риболовецьке судно веде промисел. Радари танкера фіксують риболовецьке судно на 4 милях, але оператор вважає, що воно змінить курс. Танкер не змінює курс, оскільки вважає, що рибалки зобов'язані ухилитися через їхню маневреність. Риболовецьке судно не маневрує, оскільки його сітки у воді обмежують маневреність. На відстані 0,8 милі рибалки зв'язуються з танкером, після чого танкер різко змінює курс.

Аналіз ситуації:

- фактор неофіційної ієрархії – великотоннажний танкер вважав, що мале судно має ухилитися першим;
- вплив вантажу – танкер з небезпечним вантажем намагався уникати різких маневрів, відкладаючи ухилення до останнього моменту;
- роль культури безпеки – рибалки запізно вийшли на зв'язок, хоча могли прояснити ситуацію раніше.

Висновок – потрібно включати в навчальні програми кейси, де маломаневрені судна, такі як риболовецькі, потребують більш ранньої координації з великими суднами.

5. Швидкохідний пором і балкер, Ла-Манш, 2021 рік. Судна:

- швидкохідний пасажирський пором (150 м, 35 вузлів);
- балкер (230 м, 60 000 тонн), швидкість – 10 вузлів.

Ситуація розвивалась за дуже завантаженого трафіку у каналі, сильного дощу, видимості обмеженої до 0,7 милі.

Балкер рухається сталим курсом, пором наближається з правого борту. Балкер ідентифікує пором за допомогою АІС, і вважають, що пором змінить курс першим. Пором рухається на високій швидкості і не змінює курс до останнього моменту. Балкер, побачивши наближення порома на 0,5 милі, знижує швидкість, щоб дати порому можливість пройти. За 1 хвилину до критичного зближення пором раптово змінює курс і проходить у 0,2 милі від балкера.

Аналіз ситуації:

- фактор швидкості – високошвидкісні судна ухвалюють рішення значно пізніше, оскільки покладаються на свою маневреність;
- роль культури безпеки – балкер був готовий уникнути ризику завчасно, але паром діяв агресивно, що могло призвести до аварії.

Аналіз залежності швидкості суден від кількості аварійних ситуацій. Аналіз статистичних даних чітко показує, що швидкість руху суден є одним із найбільш критичних факторів, що впливають на кількість аварійних ситуацій на морі. Дані свідчать про те, що з підвищенням швидкості судна кількість аварій стрімко зростає, причому ця тенденція є характерною для всіх основних типів суден: танкерів, контейнеровозів і пасажирських суден.

Нижче наведено таблицю з узагальненими аналітичними даними, яка ілюструє залежність між швидкістю руху та кількістю інцидентів (табл. 1).

Таблиця 1. Залежність між швидкістю судна та кількістю аварійних ситуацій за класами суден (середньорічні показники)

| Швидкість (вузли) | Танкери (випадки/рік) | Контейнеровози (випадки/рік) | Пасажирські судна (випадки/рік) | Загальне зростання ризику (%) | Швидкість (вузли) |
|-------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| 5-10              | 12                    | 15                           | 8                               | Базовий рівень                | 5-10              |
| 11-15             | 28                    | 34                           | 18                              | +115%                         | 11-15             |
| 16-20             | 45                    | 67                           | 32                              | +275%                         | 16-20             |
| 21-25             | 78                    | 112                          | 58                              | +490%                         | 21-25             |
| >25               | 142                   | 187                          | 96                              | +850%                         | >25               |

Згідно з представленими даними (рис. 1), навіть помірне підвищення швидкості суден із 5-10 вузлів до 11-15 вузлів призводить до зростання ризику аварійних ситуацій на 115%. При подальшому підвищенні швидкості до 16-20 вузлів кількість аварій збільшується вже на 275%, що підкреслює нелінійну залежність ризику від швидкості руху.

Найбільша кількість аварійних випадків зафіксована у сегменті швидкості понад 25 вузлів, де ризик аварій зростає більш ніж у 8 разів (+850%) порівняно з базовим рівнем (5-10 вузлів). Особливо критичною ця ситуація є для контейнеровозів та пасажирських суден, де кількість аварій є найвищою.

Таким чином, статистичні дані чітко демонструють, що швидкість руху є ключовим фактором, що визначає безпеку судноплавства. Це підтверджує необхідність суворого контролю швидкості в умовах обмеженої видимості і складних навігаційних умовах, а також наголошує на потребі додаткових тренувань для екіпажів щодо правильного вибору безпечної швидкості.

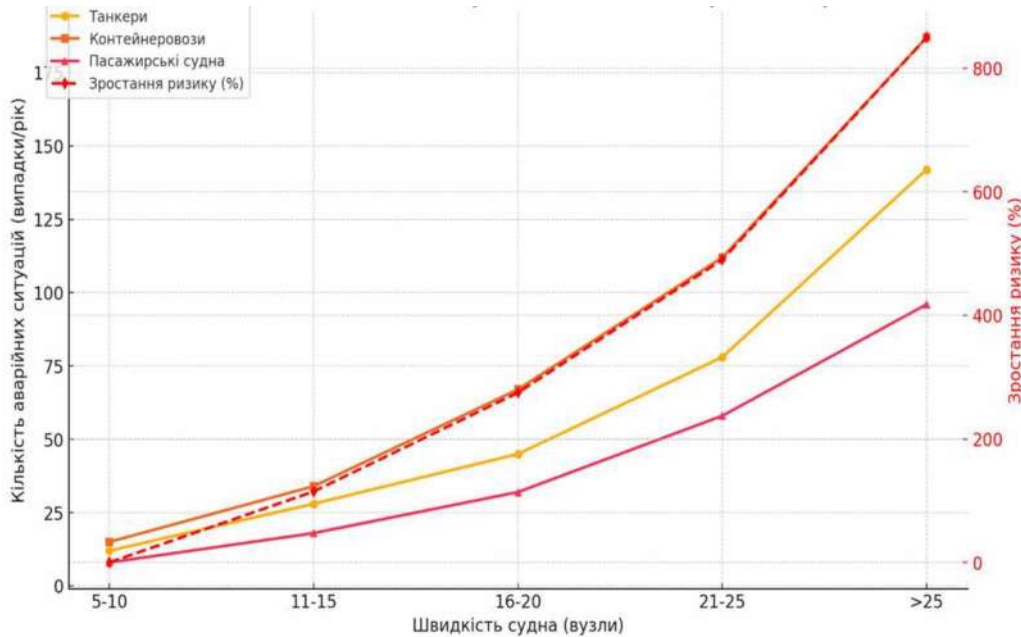


Рисунок 1 – Залежність між швидкістю судна та кількістю аварійних ситуацій

Аналіз впливу швидкості на гальмівний шлях та доступний час реакції екіпажу. Швидкість судна є не лише фактором ризику виникнення аварійних ситуацій, але й критично впливає на здатність екіпажу своєчасно зреагувати та уникнути зіткнення. У табл. 2 представлені розрахункові показники гальмівного шляху судна залежно від швидкості, а також час, що залишається у екіпажу для прийняття рішення у випадку виявлення небезпеки на відстані 0,6 милі.

Таблиця 2. Вплив швидкості на зупинний шлях та час реакції екіпажу

| Швидкість (вузли) | Гальмівний шлях (м) | Час до потенційного зіткнення на відстані 5 кабельтових (хв) | Доступний час для прийняття рішень (сек) |
|-------------------|---------------------|--|--|
| 8                 | 250 (1,4 каб.)      | 4.1  | 246                                      |
| 12                | 580 (3,3 каб.)      | 2.7  | 162                                      |
| 16                | 1050 (6,0 каб.)     | 2.0  | 120                                      |
| 20                | 1650 (9,4 каб.)     | 1.6  | 96                                       |
| 24                | 2400 (13,7 каб.)    | 1.4  | 84                                       |
| 28                | 3250 (18,5 каб.)    | 1.2  | 72                                       |

Із представлених даних видно, що навіть незначне збільшення швидкості значно подовжує дистанцію, необхідну для повної зупинки судна (рис. 2). Наприклад, зростання швидкості з 8 до 16

вузлів збільшує гальмівний шлях із 250 м до 1050 м, тобто більш ніж у 4 рази. Це суттєво скорочує час, що має екіпаж на реакцію. Так, при швидкості 8 вузлів екіпаж має понад 4 хвилини (246 секунд), тоді як при 28 вузлах час на реакцію скорочується до критичних 72 секунд.

Отже, чим більша швидкість судна, тим менше часу залишається для ефективної оцінки ситуації та ухвалення правильних рішень. Умови обмеженої видимості значно ускладнюють ситуацію, оскільки дистанція виявлення загрози скорочується, що може стати вирішальним фактором при уникненні зіткнення.

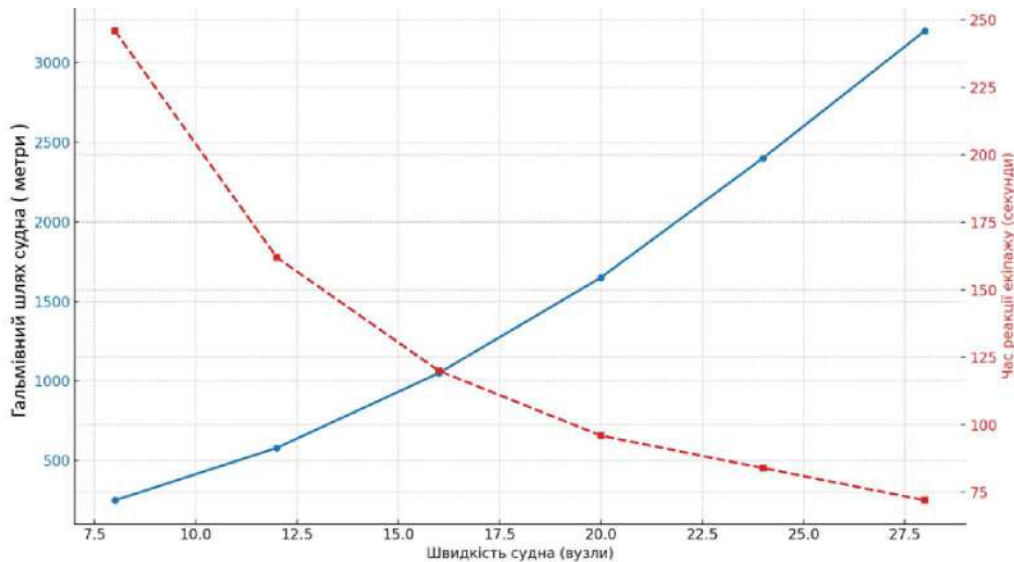


Рисунок 2 – Залежність гальмівного шляху судна та часу реакції екіпажу від швидкості судна

Графік наочно демонструє, як зі збільшенням швидкості судна суттєво зростає гальмівний шлях і водночас різко скорочується доступний екіпажу час для реагування на загрозу.

Ключові висновки з графіка:

- чим вища швидкість судна, тим довшим є гальмівний шлях. На високій швидкості судно стає менш маневреним і потребує більшого простору для виконання маневрів;
- при високій швидкості (понад 20 вузлів) екіпаж має критично малий час (менше 100 секунд) на оцінку ситуації та ухвалення рішення щодо уникнення зіткнення;
- вибір оптимальної та безпечної швидкості є ключовою умовою уникнення аварійних ситуацій, особливо в умовах обмеженої видимості.

Цей графік є ілюстрацією для кращого розуміння важливості контролю швидкості в складних навігаційних умовах.

**Потенційні шляхи вдосконалення.** Виявлені у статті неофіційні ієрархії дозволяють припустити, що Правило 19 можна покращити, враховуючи реальні закономірності взаємодії між суднами.

Можливі наступні шляхи системного аналізу:

1. Використання великих масивів даних (Big Data) для виявлення шляхів ухвалення рішень:
  - аналіз радіолокаційних та АІС-даних за останні 10-15 років дозволив би виявити закономірності ухилення суден у різних регіонах та умовах видимості. Це могло б стати основою для офіційних рекомендацій щодо “пріоритету ухилення” у певних ситуаціях.
2. Використання досвіду капітанів та офіцерів у вдосконаленні навчальних програм:
  - інтерв'ю з досвідченими капітанами та аналіз їхніх рішень могли б допомогти молодим офіцерам краще розуміти реальну морську практику.
  - запровадження симуляторних тренінгів із реалістичними сценаріями, де моделюються типові неофіційні ієрархії ухвалення рішень.
3. Використання штучного інтелекту для розробки нових алгоритмів ухилення:

– AI-моделі можуть аналізувати мільйони випадків та пропонувати оптимальні маневри в умовах обмеженої видимості. Це допоможе зменшити суб'єктивність у процесі ухвалення рішень.

Для комплексного аналізу ситуації слід враховувати наступне:

1. Початкова умова. Ситуація обмеженої видимості – процес починається, коли судна рухаються в умовах обмеженої видимості (туман, сильний дощ, сніг тощо), і вони не бачать одне одного.

2. Як виявляється інше судно? Виявлення радаром (аналіз CPA і TCPA) – судно виявляє інше судно за допомогою радара або ЗАРП, що дозволяє завчасно оцінити ризик. Почуто звуковий сигнал (відсутній радарний контакт) – судно чує туманні сигнали попереду траверзу, але не має радарного контакту, що вимагає надзвичайної обережності.

3. Рішення на основі швидкості. Хто швидший? Якщо ваше судно швидше за інше – ви повинні завчасно вжити маневрів, щоб запобігти ризикам на пізніх етапах. Якщо ваше судно повільніше за інше – ви повинні зберігати курс і швидкість, якщо не існує безпосереднього ризику зіткнення.

4. Врахування типу судна. Чи є ваше судно критичним з точки зору безпеки?

Судно з високими вимогами безпеки (пасажирське, танкер, перевізник небезпечних вантажів)?

Якщо ТАК, слід вжити проактивних дій щодо уникнення ситуації надмірного зближення або безпосередньо ситуації зіткнення через високі стандарти безпеки та потенційну небезпеку в разі аварії. Якщо НІ, дотримуйтесь стандартних маневрів згідно з Правилем 19 на основі оцінки ризиків.

5. Тип Зближення. Хто рухається першим?

Ситуація обгону? Якщо ТАК – судно, що обганяє, завжди повинно уступати дорогу (згідно з Правилем 13).

Ситуація перетину Курсів? Якщо ТАК – судно з лівого борту повинно завчасно вжити заходів, щоб уникнути перетину по курсу попереду.

Зустрічна або майже зустрічна ситуація? Якщо ТАК – обидва судна повинні повернути праворуч і зменшити швидкість.

6. Кінцевий результат, забезпечення безпечного розходження. Дотримуючись структурованого підходу, судна уникають маневрування в останню хвилину та забезпечують безпечну навігацію в умовах обмеженої видимості.

Ключові положення наступні:

- швидші судна повинні завчасно вживати заходів для стабілізації ситуації;
- судна підвищеної безпеки (пасажирські судна, танкери та судна які перевозять небезпечні вантажі) повинні діяти проактивно;
- судна, що обганяють, завжди повинні поступатися дорогою;
- у ситуаціях перетину курсів судно, яке знаходиться з лівого борту, повинно маневрувати першим;
- при зустрічі суден на зустрічних курсах, обидва судна повинні повернути праворуч і зменшити швидкість.

Цей структурований процес прийняття рішень роз'яснює пріоритети маневрування в умовах обмеженої видимості згідно з Правилем 19, забезпечуючи ефективне зниження ризику.

Представлена блок-схема (рис. 3) демонструє неформальну ієрархію прийняття рішень під час навігації в умовах обмеженої видимості. У ситуації, коли ризик зіткнення визначається за допомогою радарів або звукових сигналів, екіпажі приймають рішення, керуючись як офіційними вимогами Правил 19 COLREG, так і додатковими факторами, такими як швидкість та тип вантажу судна.

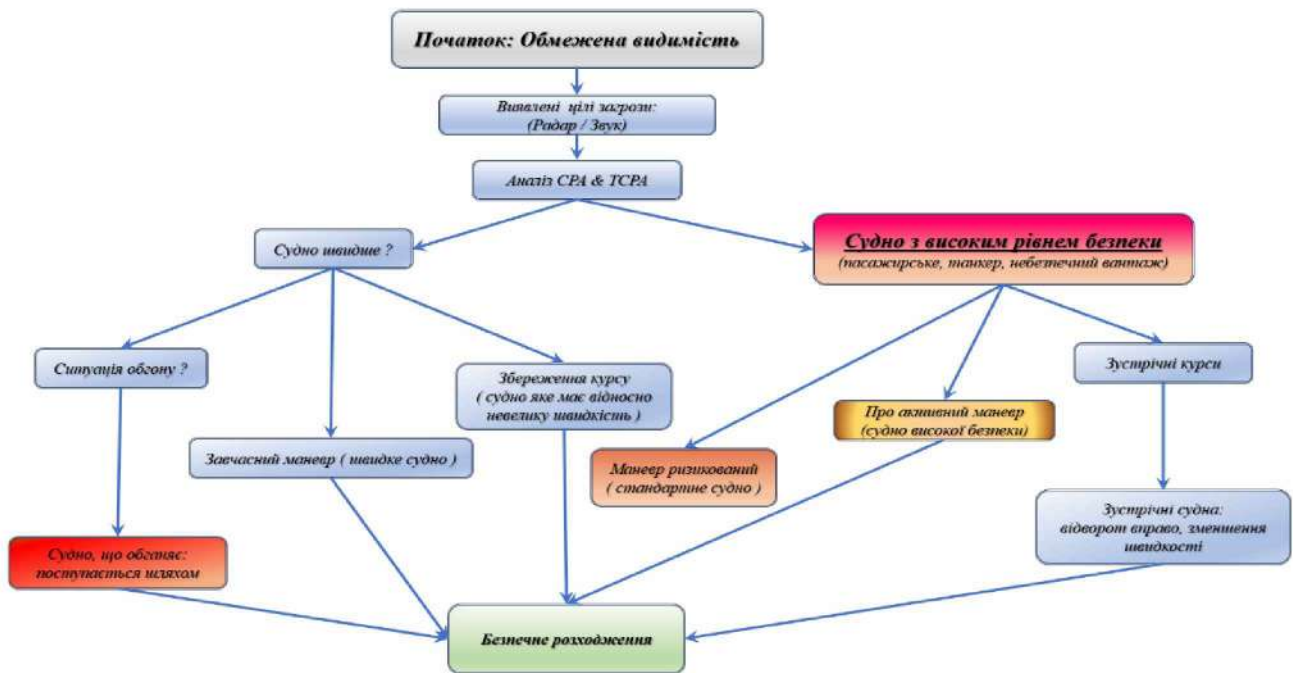


Рисунок 3 – Блок-схема неформальної ієрархії під час аналізу небезпечної ситуації, прийняття рішення та дії, необхідної для безпечного розходження

На практиці, судна, що рухаються швидше, а також судна з високим рівнем безпеки (наприклад, пасажирські судна, танкери, судна з небезпечними вантажами) часто ініціюють завчасні маневри уникнення. Водночас, у випадках обгону, судно, що обганяє, завжди повинно поступатися шляхом. При зустрічі на протилежних курсах або майже на зустрічних курсах обидва судна зобов'язані виконати завчасний маневр відвороту вправо із зменшенням швидкості, забезпечуючи таким чином безпечне розходження.

**Висновки.** У даній статті проаналізовано практичні аспекти застосування Правила 19 МПЗС-72 у реальних умовах судноплавства в обмеженій видимості. Виявлено, що, попри чіткі вимоги Конвенції, ухвалення рішень на морі часто відбувається з урахуванням неформальних факторів, таких як розмір судна, його маневрені характеристики, технічний стан навігаційного обладнання та рівень підготовки екіпажу.

Дослідження показало, що на практиці існує неофіційна ієрархія суден, що може впливати на поведінку судноводіїв у ситуаціях наближення. Аналіз навігаційних інцидентів підтвердив, що економічний тиск та комерційні пріоритети судновласників також відіграють значну роль у прийнятті рішень, іноді переважаючи суто навігаційні аспекти безпеки.

Зроблено висновок, що сучасні підходи до забезпечення безпеки судноплавства потребують додаткової адаптації. Зокрема, рекомендується:

- удосконалення навчальних програм для судноводіїв із включенням сценарного аналізу реальних судноплавних ситуацій;
- впровадження цифрових навігаційних систем з адаптивними алгоритмами, що враховують не лише правила, а й емпіричні закономірності взаємодії суден;
- підвищення контролю за дотриманням правил судноплавства з боку портівих і міжнародних організацій.

Таким чином, дотримання Правила 19 вимагає не лише суворого виконання нормативних положень, а й глибшого розуміння реальних судноплавних процесів, що дозволить ефективніше уникати небезпечних ситуацій та знижувати рівень аварійності.

## ЛІТЕРАТУРА

1. International Maritime Organization (IMO). (2005). International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs), IMO publication.
2. International Chamber of Shipping (ICS). (2020). *Bridge Procedures Guide*. ICS.
3. North of England P&I Association Ltd. (2022). Collision Avoidance in Restricted Visibility. North of England P&I Association Ltd. Newcastle, UK.
4. Marine Accident Investigation Branch (MAIB). (2012). *Costa Concordia accident investigation report*. London, UK.
5. Department of Transport. (1987). *MV Herald of Free Enterprise – Formal Investigation Report*. HMSO. London, UK.
6. Korean Maritime Safety Tribunal. (2014). *Sewol Ferry Disaster Report*. Republic of Korea Maritime Authority, Seoul, South Korea.
7. National Transportation Safety Board (NTSB). (1990). *Exxon Valdez grounding investigation report*. Washington D.C., USA.
8. European Maritime Safety Agency (EMSA). (2023). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents*. Lisbon, Portugal.
9. UK Maritime & Coastguard Agency (MCA). (2008). *MSC Napoli Incident: Report of Investigation*. Southampton, UK.
10. Chae, C.J. & Woo, J. (2016). Psychological analysis of crew actions in marine casualties: Lessons from the MV Sewol disaster. *Journal of Maritime Safety & Psychology*, 3(1), 45–54.
11. IMO. (1998). *International Safety Management Code (ISM Code)*. IMO Publishing, London, UK.
12. IMO Resolution A.893(21). (2001). *Guidelines for Voyage Planning*. IMO Publishing, London, UK.
13. Hetherington, C., Flin, R., & Mearns, K. (2006). *Safety in Shipping: The human element*. *Journal of Safety Research*, 37(4), 401–409.
14. Grech, M., Horberry, T., & Koester, T. (2008). *Human Factors in the Maritime Domain*. CRC Press.
15. Reason, J. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Ashgate Publishing Ltd., Aldershot, UK.
16. Hollnagel, E. (2014). *Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management*. Ashgate Publishing Ltd., Farnham, UK.
17. Baker, C. C., & McCafferty, D. B. (2005). "Safety Culture in Maritime Operations." *Journal of Safety Research*, Vol. 36(2), pp. 159-172.

## REFERENCES

1. International Maritime Organization (IMO). (2005). International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs), IMO publication.
2. International Chamber of Shipping (ICS). (2020). *Bridge Procedures Guide*. ICS.
3. North of England P&I Association Ltd. (2022). Collision Avoidance in Restricted Visibility. North of England P&I Association Ltd. Newcastle, UK.
4. Marine Accident Investigation Branch (MAIB). (2012). *Costa Concordia accident investigation report*. London, UK.
5. Department of Transport. (1987). *MV Herald of Free Enterprise – Formal Investigation Report*. HMSO. London, UK.
6. Korean Maritime Safety Tribunal. (2014). *Sewol Ferry Disaster Report*. Republic of Korea Maritime Authority, Seoul, South Korea.
7. National Transportation Safety Board (NTSB). (1990). *Exxon Valdez grounding investigation report*. Washington D.C., USA.
8. European Maritime Safety Agency (EMSA). (2023). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents*. Lisbon, Portugal.

9. UK Maritime & Coastguard Agency (MCA). (2008). *MSC Napoli Incident: Report of Investigation*. Southampton, UK.
10. Chae, C.J. & Woo, J. (2016). Psychological analysis of crew actions in marine casualties: Lessons from the MV Sewol disaster. *Journal of Maritime Safety & Psychology*, 3(1), 45–54.
11. IMO. (1998). *International Safety Management Code (ISM Code)*. IMO Publishing, London, UK.
12. IMO Resolution A.893(21). (2001). *Guidelines for Voyage Planning*. IMO Publishing, London, UK.
13. Hetherington, C., Flin, R., & Mearns, K. (2006). *Safety in Shipping: The human element*. *Journal of Safety Research*, 37(4), 401–409.
14. Grech, M., Horberry, T., & Koester, T. (2008). *Human Factors in the Maritime Domain*. CRC Press.
15. Reason, J. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Ashgate Publishing Ltd., Aldershot, UK.
16. Hollnagel, E. (2014). *Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management*. Ashgate Publishing Ltd., Farnham, UK.
17. Baker, C. C., & McCafferty, D. B. (2005). "Safety Culture in Maritime Operations." *Journal of Safety Research*, Vol. 36(2), pp. 159-172.

**Kalinichenko Y, Kolesnik O., Kalinichenko G.**

### **BEYOND RULE 19: ANALYSIS OF UNOFFICIAL HIERARCHY IN THE DECISION-MAKING PROCESS DURING NAVIGATION IN LIMITED VISIBILITY**

*The article is devoted to studying the role of informal hierarchy in decision-making at sea, in particular in conditions of limited visibility, when traditional navigational rules, in particular Rule 19 of the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, may be insufficient. In such conditions, crews are often forced to rely on informal mechanisms of interaction and decision-making that differ from formal procedures and focus on real-world experience, expertise and the ability to respond quickly to changing circumstances.*

*Rule 19 defines the basic principles of vessel behavior in conditions of limited visibility, however, in real-world conditions at sea, when speed of decision-making is critical, strict adherence to formal norms is not always optimal. The article emphasizes that informal hierarchy, based on trust and mutual respect between crew members, becomes a key factor in ensuring safety and efficiency of maneuvering in difficult conditions.*

*The study covers the analysis of real maritime situations, where crews make important decisions not only on the basis of rules, but also thanks to operational consultations, analysis of the experience of each crew member, which allows to react faster to changes in the situation. An important part of the study is to determine how informal structures and dynamics of relations between crew members affect the outcome of decisions made. The article uses qualitative analysis methods based on observations of real situations on ships and interviews with experienced maritime specialists. Special attention is paid to cases when the formal hierarchy or collision rules cannot be applied directly due to difficult weather conditions or unexpected changes on the route. The article also offers practical recommendations for improving the crew training system, in particular regarding the development of communication skills, the ability to adapt to rapidly changing conditions and the formation of more flexible management structures. The conclusions of the article emphasize the importance of supporting informal decision-making mechanisms that can significantly improve the level of maritime safety in extreme conditions.*

**Keywords:** *maritime safety, Rule 19 COLREG-72, limited visibility, navigation, evasion, navigational risks, commercial pressure.*

*Стаття прийнята 20.03.2025*

## ПРОВЕДЕННЯ ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ В РАЗІ ЗМІННОГО ГІДРОГРАФІЧНОГО ЛАНДШАФТУ МОРСЬКОГО ДНА

*Розглянути теоретичні та технологічні аспекти проведення днопоглиблювальних робіт в разі змінного гідрографічного ландшафту морського дна. Наведено аналіз методів та механізмів за допомогою яких можливо використовувати природні процеси в напрямку складання прогнозу зміни рельєфу дна на мілководді в умовах судноплавства. Визначено, що безпека судноплавства безпосередньо залежить від точності та актуальності інформації про зміни рельєфу морського дна, оскільки його структура постійно змінюється під впливом природних факторів. В умовах мілководдя, судноплавних каналів та гирл річок такі зміни можуть суттєво впливати на прохідність маршрутів і підвищувати ризик аварійних ситуацій. У цій роботі представлені методи проведення днопоглиблювальних робіт в умовах змінюваного гідрографічного ландшафту морського дна із застосуванням математичного моделювання та аналізу гідрометеорологічних даних. Розроблений підхід базується на врахуванні таких зовнішніх факторів, як вітер, хвилювання, придонні течії, опади та структура ґрунту, що дозволяє підвищити точність прогнозів змін рельєфу дна. Ключовим аспектом дослідження є введення концепції *scale factor*, яка враховує вплив різних динамічних процесів залежно від просторово-часових умов. Це дозволяє виокремити значущі та незначні зміни рельєфу під час створення електронних навігаційних карт і забезпечувати судноводіїв актуальною інформацією про глибини в режимі реального часу. У межах виконаного дослідження розроблена модель динаміки рельєфу морського дна, що дозволяє прогнозувати процеси замулення, ерозії та зміни донних структур упродовж заданого періоду часу. Додатково розглядається можливість інтеграції отриманих прогнозних даних в електронні картографічні системи, такі як ECDIS та Inland ECDIS. Включення динамічної складової в навігаційні системи дозволить покращити точність відображення фарватеру та підвищити безпеку судноплавства завдяки своєчасному оновленню інформації про рельєф дна. Результати роботи можуть бути застосовані в навігації, гідрографії, портовому плануванні та управлінні днопоглиблювальними роботами.*

**Ключові слова:** безпека судноплавства, днопоглиблювальні судна, ландшафт морського дна, мілководдя, маневрування суден, морський транспорт, моделювання навігаційної зони, навігація, навігаційні перешкоди, прибережні води, портові води, судноплавство, стиснені акваторії.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** У практиці судноводіння зустрічаються методи визначення впливу збурення зовнішнього середовища на судно, що рухається. Проте ці методи не враховують масштаб, а точніше різницю масштабів, а, отже, і міру їх впливу на рухомий об'єкт [1-3]. Тому прийнято таке допущення, що динамічні процеси можуть бути "значимими" і "незначними" залежно від масштабу простору і часу, в яких вони відбуваються [4-6]. Сьогодні недостатньо пояснити, чому і за яких причин судно виявилось на мілині, сьогодні необхідно передбачати, як можуть змінюватися природні процеси в динаміці [7, 8]. На підставі цих даних можна скласти прогнози зміни рельєфу дна на мілководді в умовах судноплавства. Ключовим фактором є розробка програм, які дозволяють відстежувати зміни природних процесів з відображенням і фіксацією їх на електронних носіях [9-11].

У практиці судноводіння досить часто існує проблема незбігу глибин на навігаційних картах і в реальності. Це, як правило, відбувається на мілководді або, найчастіше, на підхідних каналах в пригірлових ділянках річок. У цих випадках виникає загроза посадки судна на мілину. Як показує аналіз, днопоглиблювальні роботи в таких місцях проводяться без урахування впливу

рельєфстворюючих чинників, таких, як наприклад, сила і напрям вітру, довжина і висота хвилі та стан морського дна [12, 13]. Визначення проміжків часу, через які необхідно проводити днопоглиблення, а також складання прогнозу зміни рельєфу дна на цей час, одне із завдань цього дослідження. Рішення такої задачі дозволить судноводієві підвищити інформативність і точність положення фарватеру, що у свою чергу надасть можливість уникнути негативних наслідків, пов'язаних з посадкою на мілину.

**Формулювання цілей статті.** Метою цієї роботи є уточнення прогностичних елементів динамічних процесів довкілля під час руху судна і визначення якісних характеристик "значимості" під час використання пропонованого п'ятого елементу просторового виміру "scale factor" для врахування їх впливу на рухоме судно. Внаслідок того, що залежно від вибраного масштабу карти необхідно буде побудувати відповідну модель динаміки електронної навігаційної карти (ЕНК), допоміжним завданням є визначення алгоритму для моделювання динамічних процесів морського середовища в період руху судна.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теперішній час вже є ряд робіт, присвячених моделюванню поверхні водного простору в динаміці, а також зміні рельєфу морського дна і руху судна з урахуванням цього процесу [14-16]. Слід зазначити, що на усіх сучасних транспортних суднах паперові навігаційні карти застосовуються лише як резервні, а на електронних картах судноводій спостерігає рух судна тільки в площині екрану монітора в системі координат  $x, y$ . Використання ЕНК дає іноді судноводієві неправдиве уявлення про точність розташування об'єктів залежно від масштабу [17-19]. Слід зазначити, що точність і деталізація відображення, наприклад, засобів навігаційного устаткування (ЗНО), прив'язані до базового масштабу карти і при збільшенні масштабу відображення точність і деталізація карти не зміняться [20-22]. Сучасні технології дозволяють отримувати зображення судна в динаміці у взаємодії із зовнішнім середовищем з урахуванням вибраного ще на стадії складання карти параметра "scale factor", який обмежується вимогами до необхідної точності відображення об'єктів ЗНО на карті.

Встановлений алгоритм розвитку динамічних процесів рельєфу морського дна. Для цього проведені повторювальні проміри дна на досліджуваному полігоні, з використанням багатопроменевого ехолота (рис. 1).

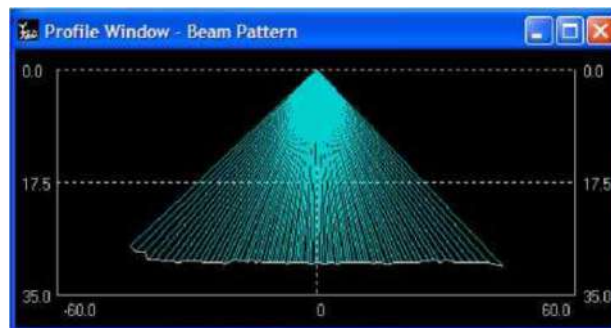


Рисунок 1 – Багатопроменевий ехолот в роботі

На промірний планшет нанесена сітка квадратів в умовній системі координат  $x, y, z$  (рис. 2), а в кожній вершині з координатами  $x_i, y_i$  визначена  $z_i$ .

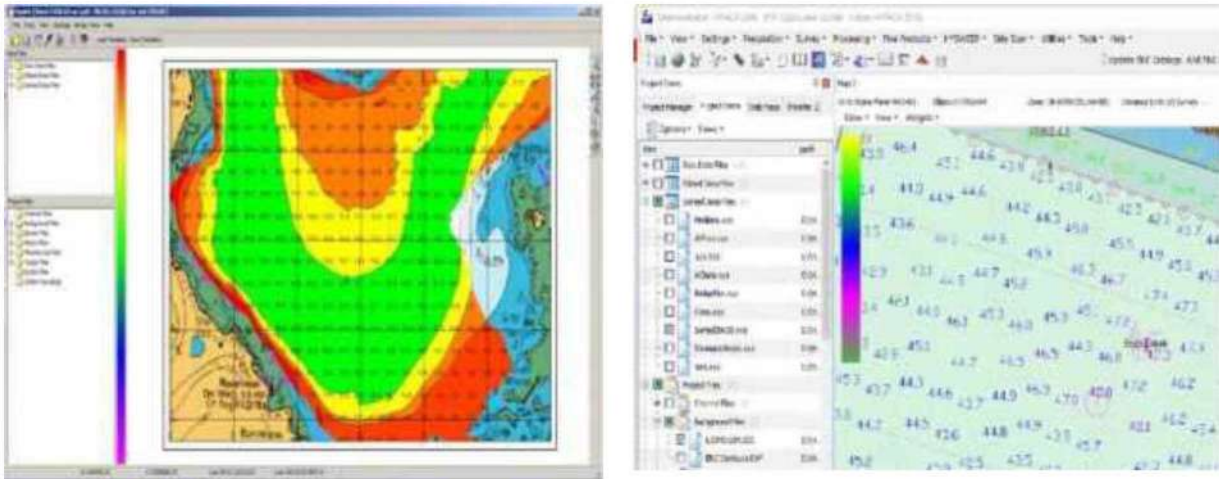


Рисунок 2 – Промірний планшет з нанесеною сіткою координат

При виборі "значимого" масштабу керувалися вимогами до точності вимірюваних параметрів. Внаслідок чого отримали, що масштаб часу слід віднести до одного місяця, а масштаб сітки квадратів може бути від одного до десяти метрів залежно від характеру рельєфу і швидкості рухливості ґрунту. Динаміку рельєфу відобразимо на ENC і IENC з урахуванням того, що Dynamic charts (морські і річкові) повинні забезпечувати безпеку судноплавства, і тому вони повинні максимально точно відображати нанесену інформацію, особливо ізобати.

Як відомо, рельєф морського дна постійно змінюється, особливо в гирлових ділянках річок, на підхідних каналах, в місцях підводних течій і при тривалих штормах [23-25]. Ці зміни можуть бути значними (до декількох метрів), що в умовах мілководдя може привести до аварійної ситуації судна та додатково погіршити екологічну ситуацію [26-28].

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо завдання побудови моделі динаміки рельєфу морського дна. Алгоритм такої моделі припускає наявність нижче перерахованих початкових даних: тип ґрунту; рухливість ґрунту; фізичні характеристики води (щільність, температура в придонному шарі); глибина моря; характеристики хвилювання моря (висота і довжина хвилі, напрям руху хвилі, сила і напрям вітру), характеристики придонної течії (швидкість, напрямок і розподіл по вертикалі).

Для складання моделі вимагається встановити закономірності пересування (розмиття, намиття) підводного ґрунту шляхом визначення функціональних залежностей зміни рельєфу морського дна від динамічних параметрів морського середовища, тобто необхідно визначити вид функції  $F(x,y,z)$ , яка описує рух окремо взятої точки на поверхні морського (річкового) дна в координатному просторі  $x_i, y_i, z_i$ , де  $i = 1, n$ ;  $n$  – номер ітерації в процесі вибору моделі.

Можливо також використовувати модель динаміки рельєфу морського дна, застосувавши метод паралельного перенесення характерних форм рельєфу.

Для цього побудуємо координатну сітку з квадратів, розміри яких дозволяють відчутти переміщення характерних форм рельєфу дна із заданою точністю. У цій сітці координати  $x, y = x_1, y_1$  в кожній вузловій точці фіксовані і залишаються постійними, змінною є лише координата  $z = z_i$ , де  $i = 1, n$ ;  $n$  – номер ітерації в процесі визначення виду функції  $F(z)$ .

На гирловій ділянці Дунаю, де відбувається замулювання фарватеру, був вибраний досліджуваний полігон, де встановлений гідрометеорологічний буй (рис. 3), на який безперервно ведеться запис усіх характеристик, у тому числі і тих, що впливають на пересування підводного ґрунту [29, 30].



Рисунок 3 – Гідрометеорологічний буй

Прийнявши гіпотезу про паралельне перенесення рухомої хвилі підводного рельєфа ґрунту, застосовано ітераційний метод Гаусса–Зейделя [31]. Приймаючи, що паралельне перенесення відбувається в кожній точці  $x_i$ ;  $y_i$  по власній траєкторії, що відповідає зміні підводного рельєфу ґрунту по висоті  $h_i$  на відстань  $b_i$  (в проєкціях на координатні осі  $x$  і  $y$  відповідно) для  $i$ -ої точки. Необхідно відмітити, що  $h_i$  відноситься до часу  $t_0$ , а  $b_i$  до часу  $t_1$ . Тоді запишемо досліджуваній масив у вигляді системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{n1}x_1 + \dots + a_{nn}x_n &= b_n \end{aligned} \right\}, \tag{1}$$

Прийmemo рівняння (1) як масив даних про рельєф дна і представимо його у виді:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}x_1 &= a_{12}x_2 - a_{13}x_3 - \dots - a_{1n}x_n + b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 &= -a_{23}x_3 - \dots - a_{2n}x_n + b_2 \\ \dots & \\ a_{(n-1)1}x_1 + a_{(n-1)2}x_2 + \dots + a_{(n-1)(n-1)}x_{n-1} &= -a_{(n-1)n}x_n + b_{n-1} \\ a_{(n-1)1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{n(n-1)}x_{n-1} + a_{nn}x_n &= b_n \end{aligned} \right\},$$

де  $a_{ii}$  – визначувані коефіцієнти.

Тут у  $j$ -му рівнянні перенесені в праву частину усі члени, що містять  $x_i$ , для  $i > j$  та система записана у вигляді:

$$(L + D)\vec{x} = -U\vec{x} + \vec{b},$$

де  $D$  означає матрицю, в якій на головній діагоналі стоять діагональні елементи матриці  $A$ , а всі інші елементи  $D$  нулі; матриці  $U$  та  $L$  містять верхню і нижню трикутні частини  $A$ , на головній діагоналі матриць  $U$  та  $L$  стоять нулі:

Після вибору відповідного початкового наближення ітераційний процес будується по формулі:

$$(L + D)\vec{x}^{(k+1)} = -U\vec{x}^{(k)} + \vec{b}, k = 0, 1, 2, 3, \dots, n.$$

Значення  $x$  послідовно обчислювали перетворенням системи:

$$\left. \begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= c_{12}x_2^{(k)} + c_{13}x_3^{(k)} + \dots + c_{1n}x_n^{(k)} + d_1 \\ x_2^{(k+1)} &= c_{21}x_1^{(k+1)} + c_{23}x_3^{(k)} + \dots + c_{2n}x_n^{(k)} + d_2 \\ &\dots \\ x_n^{(k+1)} &= c_{n1}x_1^{(k+1)} + c_{n2}x_2^{(k+1)} + \dots + c_{n(n-1)}x_{n-1}^{(k+1)} + d_n \end{aligned} \right\},$$

де

$$c_{ij} = -\frac{a_{ij}}{a_{ii}}, d = \frac{b_i}{a_{ii}}, i = 1, \dots, n.$$

Таким чином,  $i$ -та компонента  $n$ -го наближення обчислюється за формулою:

$$x_i^{(k+1)} = \sum_{j=1}^{i-1} c_{ij}x_j^{(k+1)} + \sum_{j=i+1}^n c_{ij}x_j^{(k)} + d_i, i = 1, \dots, n.$$

Умова закінчення ітераційного процесу при досягненні заданої точності  $\varepsilon$  в спрощеній формі має такий вигляд:

$$\|x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}\| \leq \varepsilon.$$

Умова збіжності:

$$|a_{ii}| > \sum_{j \neq i} |a_{ij}|.$$

Вище розглянута спрощена модель, яка показує лише приблизно, як поводитиметься підводний рельєф при сталому навантаженні [32, 33]. Для отримання реалістичнішої картини в результаті моделювання скористаємося системами нелінійних рівнянь.

Представимо модель рельєфу дна у вигляді системи нелінійних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ &\dots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

або

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n].$$

Вирішуючи цю систему, знаходимо, задовольняючий системі із заданою точністю  $\varepsilon$ , вектор:

$$f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0, j = \overline{1 \dots n}.$$

При рішенні цієї системи використовувалися ітераційні методи:

$$\overline{X^0} = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0].$$

Перетворивши систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

до вигляду

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \varphi_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ x_2 &= \varphi_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ \dots \\ x_n &= \varphi_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{aligned} \right\}$$

або

$$x_i = \varphi_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), i = \overline{1, n},$$

вибираємо початкове приближення

$$\overline{X^0} = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0].$$

Використовуючи значення змінних, отриманих на кроці  $(k-1)$ , знаходимо наближені значення коренів:

$$x_i^{(k)} = i(x_1^{k-1}, x_2^{k-1}, x_3^{k-1}, \dots, x_n^{k-1}). \quad (2)$$

Ітераційний процес припиняється, щойно виконається умова (за всіма змінними):

$$|x_j^k - x_j^{k-1}| \leq \varepsilon, j = \overline{1, n}$$

при виконанні умови збіжності ітераційного процесу пошуку, а саме:

$$\sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta \varphi_i}{\delta x_j} \right| < 1, j = \overline{1, n}.$$

У результаті нескладних математичних операцій можна знайти функцію  $y(x)$  при паралельному перенесенні геометричних форм рельєфу дна, використовуючи розв'язання задачі Коші. Так, наприклад, розглянемо методи Рунге – Кутте, засновані на апроксимації шуканої функції  $Y(x)$  у межах кожного кроку многочленом, отриманим за допомогою розкладання функції  $Y(x)$  в межах кроку  $h$  кожної  $i$ -ої точки в ряду Тейлора:

$$\begin{aligned} y(x_i + h) &= y(x_i) + h \cdot y'(x_i) + \frac{h^2}{2!} y''(x_i) + \\ &+ \frac{h^3}{3!} y'''(x_i) + \frac{h^4}{4!} y^{(4)}(x_i) + \frac{h^5}{5!} y^{(5)}(x_i) + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Запропонована модель дає змогу в інформаційному блоці ІECDIS дати графічне відображення динамічного процесу ізобат на частині електронної карти, як показано на рис. 4, а також зображення динаміки рельєфу морського дна в 3-D зображенні.

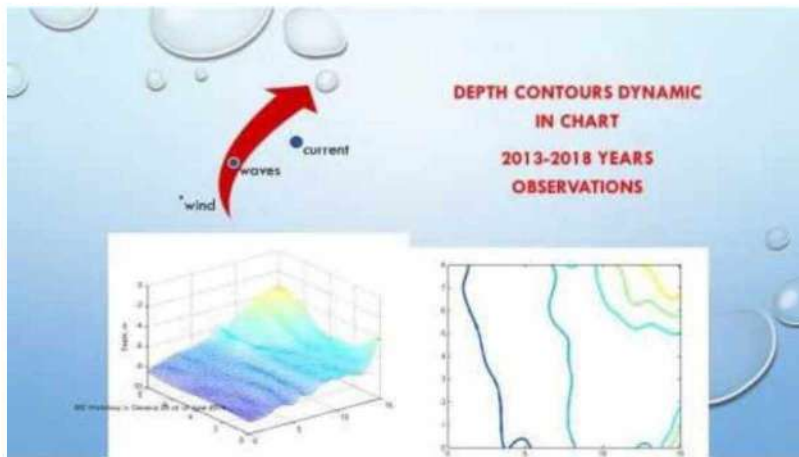


Рисунок 4 – Зображення рельєфу дна в динаміці (ліворуч) та ізобар (праворуч)

Запропоновану модель можна представити у вигляді блок-схеми (рис. 5).

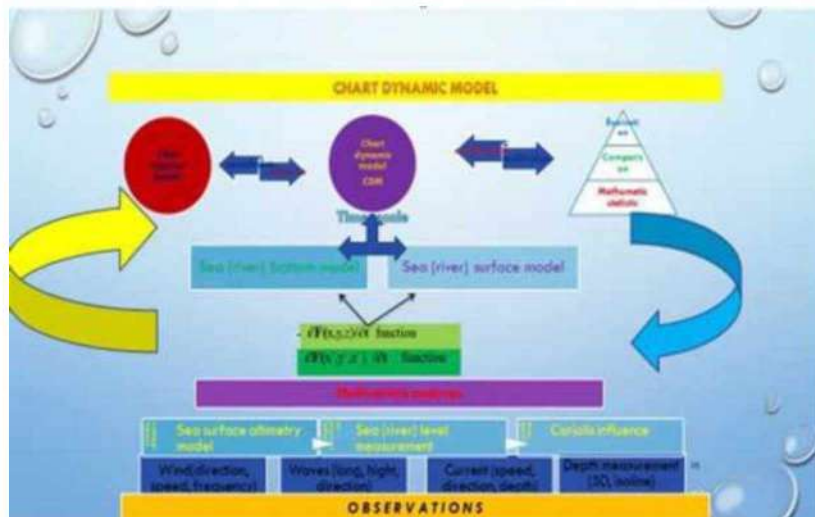


Рисунок 5 – Блок-схема динамічної моделі навігаційної карти

Ця модель передбачає проведення постійних спостережень за станом зовнішнього середовища з використанням гідрометеорологічного буя. Отримані результати спостережень заносять в електронний банк даних. У цьому банку зберігаються і надалі опрацьовуються такі дані як швидкість, тривалість і напрямок вітру, дані про стан хвилювання (довжина і висота хвилі, а також напрямок її руху), розрахована швидкість придонної течії, зміни рівня водної поверхні та глибини. Використовуючи ці дані, шляхом проведення багатofакторного аналізу можна визначити вагову характеристику кожного з елементів зовнішнього середовища, а потім методом ітерацій можна підібрати функції, що описують водну поверхню і поверхню дна. Ці функції віднесено до різних масштабів часу, тому, приводячи їх до одного масштабу з урахуванням динамічних складових, отримуємо “chart dynamic model”.

Запропонований спосіб моделювання динамічної карти дає можливість скласти прогноз замулювання морського/річкового дна на заданий період часу. Після порівняння прогнозу з фактичним результатом вводять поправки в функцію, що підбирається, вдосконалюючи модель [34-36].

На блок-схемі (див. рис. 5) відображено алгоритм моделювання так званої динамічної навігаційної карти, масштаб якої прив'язаний до періоду і параметрів морської хвилі. Так, наприклад, для досліджуваної ділянки побудови динамічної карти одиницею масштабу часу обрано 30 с, в якості одиниці масштабу відображення коливання поверхні рівня води обрано 10 см. Для відображення динаміки рельєфу морського дна за одиницю масштабу часу обрано 1 місяць із необхідною 10 см точністю відображення ізобат.

На рис. 6 зображено два фрагменти положення ізобат в залежності від хвилювання моря відносно

поверхні води, що коливається. Ці два положення характеризують зміну глибини на спостережуваній ділянці за період у 30 с, що відповідає одиниці масштабу і величині хвильового утворення, знятого з вимірювань гідрометричного буя.



Рисунок 6 – Зміна положення ізобат на досліджуваній ділянці, внаслідок утворення хвиль на поверхні моря за період у 30 с

На рис. 7 зображено криволінійну сітку координат, що спирається на вузлові точки, найбільш чутливі в обраному динамічному полі. Накладаємо цю сітку координат на картографічне зображення, будуюмо модель з використанням виразів (1) – (3), яка дає змогу побачити коливання поверхні в режимі 3D.

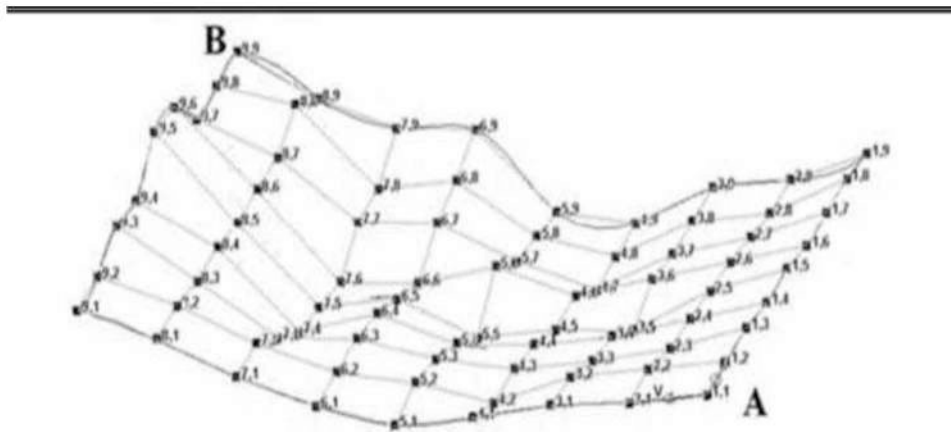


Рисунок 7 – Вузлові точки умовної сітки координат у 3D зображенні

На рис. 8 наведено також два фрагменти положення ізобат, але вже відображуючих зміну глибин в залежності від динамічних процесів рельєфу морського дна в часовому масштабі в 1 місяць.

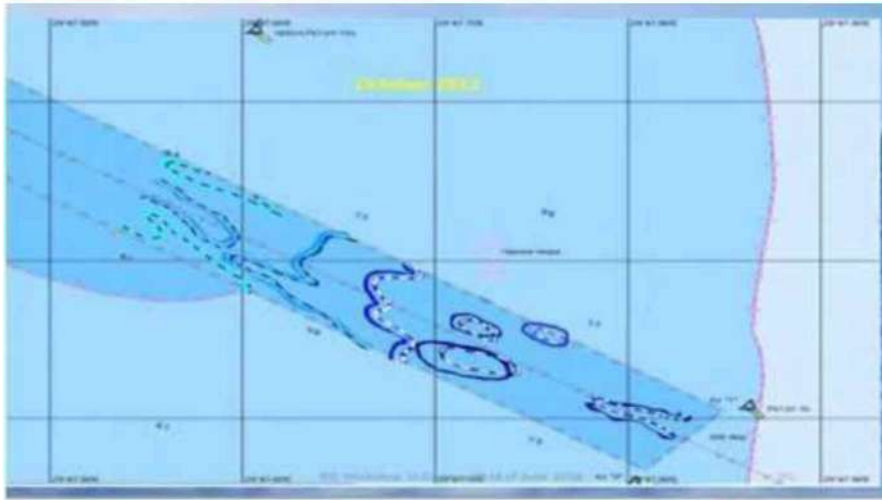


Рисунок 8 – Зміна положення ізобат на досліджуваній ділянці внаслідок руху підводного ґрунту з періодом в 1 місяць

Як видно з наведених зображень, одним із завдань побудови динамічної моделі навігаційної карти є вибір найбільш значимого масштабу для проведення досліджень і поєднання різномасштабних результатів в один інформаційний формат. Розв'язання цього завдання наведено в загальному вигляді на рис. 5, де в процесі ітерації вводять необхідні поправки в алгоритм використовуваної моделі, а також підбирають найбільш значущий масштаб, виходячи з необхідної точності до результатів вимірювань і використовуваних методів.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження можна зробити такі висновки.

В інформаційний блок навігаційних картографічних систем ECDIS і Inland ECDIS рекомендується вводити динамічну складову, що дає змогу бачити положення судна на хвилі відносно дна в реальному режимі часу, та можливість візуально оцінювати ступінь ризику дотику днищем судна поверхні дна.

Запропоновані методи моделювання шляхом паралельного перенесення рельєфу дна, що засновані на даних статистичних спостережень для прогнозу занесення дна на фарватері, дають достовірний результат, зазвичай, на піщаних і мулистих ґрунтах, де рельєф має яскраво виражені хвилеподібні форми, а також за умови зовнішніх впливів, що повторюються порівняно часто.

Для цілей спрощеного прогнозування можна використовувати модель, яка показує лише наближено положення ізобат у динаміці. Для точнішого прогнозу можна використовувати модель рельєфу дна у вигляді системи нелінійних рівнянь. У складних гідрометеоумовах пропонується використання алогічних методів, заснованих на апроксимації шуканої функції  $Y(x)$ .

#### ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
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. 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.
4. 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.

5. 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.
6. 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.
7. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
8. 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.
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. Ворохобін І.І., Бурмака І.О., Кулаков М.О., Петриченко О.О. Спосіб департаментизації електронної карти при зовнішньому управлінні розходження суден в зоні відповідальності СУРС // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 32. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 26-33. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
11. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
12. 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.
13. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії воднохвильових збурень // Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
14. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
15. Сагін С.В., Бондар С.А. Розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
16. Сагін С.С., Сагін С.В. 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.
17. Ворохобін І.І. Зависимость вероятности безопасного прохождения судном стесненного района от закона распределения погрешности смещения // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 30. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 58-66. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.
18. Шпілевський В.В., Крупов І.В. Гармонізація координатних систем у прикордонних районах країн на Дунаї // Судноводіння. – 2020. – Вип. 30. – С. 152-163. doi: 10.31653/2306-5761.30.2020.152-163.
19. Крупов І.В. Аналіз систем автоматичного управління земснарядами // Суднові енергетичні установки. – 2023. – Вип. 47. – С. 46-54. doi: 10.31653/smf47.2023.46-54.
20. Бурмака І.А., Ворохобін І.І., Федоров Д.Б. Учет динамики судов при автоматическом выборе маневра расхождения уклонением одного судна и пассивным торможением другого // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 31. – С. 80-88. DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
21. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.

22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Сагін С.С., Ворохобін І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морського транспорту // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 76-88.
26. 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.
27. 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.
28. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 – P. 36–43. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43.
29. Голіков В.А., Крупов І.В. Аналіз ефективності використання земснарядів в експлуатаційних умовах // Суднові енергетичні установки. – 2023. – Вип. 46. – С. 41-46. doi: 10.31653/smf46.2023.41-46
30. 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.
31. Кривий О.Ф., Міусов М.В., Кривий М.О., Математичне моделювання роботи судових стерн при різних режимах маневрування // Судноводіння. – 2023. – Вип. 34. – С. 93-114. doi: 10.31653/2306-5761.34.2023.93-114.
32. 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.
33. 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.
34. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
35. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
36. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.

## REFERENCES

1. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel CDSS. // Water transport. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.

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. Tymoshchuk O., Melnyk O. Analysis of the possibility of using the divergence maneuver by changing the course // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2023 – Vol.1(37). – P.96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
4. 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.
5. 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. – Vol. 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
6. 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.
7. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33-42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
8. 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.
9. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2020. – Vol. 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
10. Vorokhobin I., Burmaka I., Kulakov M., Petrychenko O. A Method of electronic chart departmentisation under external control of vessels' passing in VTS areas // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol.32. – P.26-33. doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
11. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
12. 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.
13. Levinskyi M.V., Levinskyi V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // *Automation of ship technical facilities*. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
14. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
15. Sagin S.V., Bondar S.A. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
16. 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). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
17. Vorokhobin I. Impact of the cross-track error distribution law on safe navigation in narrow waters // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2020. – Vol.30. – P.58-66. doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.
18. Shpylevsky V., Krupov I. Coordinates systems harmonization in the frontier districts of the Danube // *Shipping & Navigation*. – 2020. – № 30. – P. 152-163. doi: 10.31653/2306-5761.30.2020.152-163.
19. Krupov I. Analysis of Automatic Dredger Control Systems // *Ship power plants*. – 2023. – № 47. – P. 46-54. doi: 10.31653/smf47.2023.46-54.

20. Burmaka I., Vorokhobin I., Fedorov D. Account dynamics of ships at the automatic choice of manoeuvre of divergence by deviation of one ship and by the passive braking of the other // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol. 31. – P. 80-88. doi.org/10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
21. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – C. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
22. 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. – № 3(41). – C. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
23. 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.
24. 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.
25. Sagin S.S., Vorokhobin I.I. Minimizing the risk of maritime incidents during navigation passages of sea transport vessels // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 76-88.
26. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
27. 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.
28. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43.
29. Golikov V.A., Krupov I.V. Analysis of the Efficiency of Dredger Utilization in Operational Conditions // *Ship power plants*. – 2023. – № 46. – P. 41-46. doi: 10.31653/smf46.2023.41-46.
30. 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.
31. Kryvyi O.F., Miyusov M.V., Kryvyi M.O. Mathematical modelling of ship's rudders operation under various maneuvering modes // *Shipping & Navigation*. – 2023. – № 34. – P. 93-114. doi: 10.31653/2306-5761.34.2023.93-114.
32. 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.
33. 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.
34. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
35. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
36. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.

*Krupov I.V.***CONDUCTING DREDGING OPERATIONS IN THE CASE OF A VARIABLE HYDROGRAPHIC SEAFLOOR LANDSCAPE**

*The presented study provides an explanation of the mechanisms by which natural processes can be utilized to predict seafloor topography changes in shallow waters under navigational conditions. The safety of navigation directly depends on the accuracy and timeliness of information regarding changes in the seafloor topography, as it is constantly affected by natural factors. In shallow waters, navigation channels, and river estuaries, such changes can significantly impact route accessibility and increase the risk of maritime incidents. This study presents methods for conducting dredging operations in the context of a dynamically changing hydrographic seafloor landscape, utilizing mathematical modeling and hydrometeorological data analysis. The proposed approach takes into account external factors such as wind, wave action, bottom currents, sedimentation, and seabed composition, allowing for improved accuracy in predicting seafloor changes. A key aspect of the research is the introduction of the «scale factor» concept, which considers the influence of various dynamic processes depending on spatial and temporal conditions. This enables the identification of significant and minor seafloor changes when generating Electronic Navigational Charts and ensures that navigators receive real-time updates on depth conditions. As part of the study, a seabed dynamics model was developed to predict sedimentation, erosion, and seabed structure changes over a specified period. Additionally, the research explores the integration of predictive data into electronic charting systems such as ECDIS and Inland ECDIS. Incorporating dynamic seabed updates into navigation systems will enhance fairway representation accuracy and improve maritime safety through timely updates on seafloor topography. The findings of this study can be applied in navigation, hydrography, port planning, and dredging operations management.*

**Keywords:** coastal waters, compressed water areas, dredgers vessels, maritime transport, navigation zone modeling, navigation, navigational obstacles, port waters, seabed landscape, shallow water, ship maneuvering, shipping safety, shipping.

*Стаття прийнята 16.03.2025*

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА ПІД ЧАС РОЗХОДЖЕННЯ З СУДНАМИ, ЩО ВИКОНУЮТЬ ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНІ РОБОТИ

Проведено аналіз особливостей організації безпечного маневрування морських суден у зонах виконання днопоглиблювальних робіт. Однією з ключових загроз у таких акваторіях визначено обмежену маневреність суден днопоглиблювального флоту, а також змінну просторову конфігурацію навігаційних перешкод, зумовлених розташуванням шлангів, якорів і обладнання. Встановлено, що традиційні підходи до прогнозування та ухилення від зіткнень не враховують змінність геометрії небезпечних зон, динаміку гідрометеоумов та відсутність прямої комунікації між суднами. Проведено критичний аналіз наукових публікацій, присвячених алгоритмам ухилення в умовах багатосудових конфліктів, підходам до оптимального керування, формуванню адаптивних стратегій маневрування, а також математичному моделюванню допустимих траєкторій. Виявлено, що наявні рішення здебільшого орієнтовані на умови відкритого моря, що не відповідає потребам вузьких портових акваторій, де додаткову складність створюють днопоглиблювальні механізми, шланги та якорні лінії. З урахуванням цього, в роботі запропоновано концепцію адаптивної навігаційної зони (ANZ), у вигляді динамічної еліпсоїдної оболонки навколо днопоглиблювального судна, параметри якої формуються на основі геометричних характеристик обладнання, його орієнтації у просторі та з урахуванням просторово-часової динаміки. Побудовано формальну модель адаптивної навігаційної зони із урахуванням параметрів безпечної відстані та змінної конфігурації перешкод, а також алгоритм оцінки ризику входу інших суден у цю зону. Розроблений підхід інтегрується в цифрові навігаційні системи нового покоління та підтримує динамічне перепланування маневрів у реальному часі. Обґрунтовано доцільність використання цифрових двійників (Digital Twin) портових акваторій для візуалізації ситуації, прогнозування ризиків та підтримки рішень. Наведено приклад ефективного реалізації підходу в умовах порту Роттердам, де використовується комплекс інструментів: VTS-координація, AIS-інтеграція, AR-дисплеї, V2V-протоколи та ALRS. Продемонстровано, що комбінація математичного моделювання ANZ із цифровими технологіями дає змогу не лише підвищити точність оцінки навігаційної ситуації, але й забезпечити взаємне узгодження дій суден у критичних умовах. Усі елементи системи є сумісними зі стандартом S-100 і можуть застосовуватись як в умовах традиційного керування, також у сценаріях напівавтономного судноводіння. Висновки статті акцентують на високому потенціалі розробленого підходу для зниження навігаційних ризиків, підвищення безпеки портових операцій та відповідності міжнародним стандартам морської безпеки. У перспективі передбачено вдосконалення моделі адаптивної навігаційної зони (ANZ) за допомогою нейронних мереж і глибокого навчання для підвищення точності прогнозування траєкторій та адаптації до непередбачуваної поведінки суден і днопоглиблювального обладнання.

**Ключові слова:** адаптивна навігаційна зона, безпека судноплавства, днопоглиблювальні судна, ландшафт морського дна, маневрування суден, морський транспорт, моделювання навігаційної зони, навігаційні перешкоди, оптимальне управління, прогнозування траєкторій, судноплавство, стиснені акваторії.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Морський та внутрішній водний транспорт відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного функціонування світової логістичної системи. Зважаючи на високий рівень глобалізації, значну частину міжнародної торгівлі становлять вантажні перевезення морськими шляхами, які потребують гарантованого рівня безпеки, особливо у прибережних зонах

та портах. Одним із найкритичніших аспектів морського транспорту є забезпечення безпечного маневрування суден у складних умовах обмежених акваторій, де особливу загрозу становлять зони днопоглиблювальних робіт [1-4].

На фоні постійного зростання розмірів і осадки суден, підтримка навігаційних глибин у підхідних каналах та фарватерах стала регулярним технічним завданням. Водночас днопоглиблювальні судна, що виконують роботи з забезпечення навігаційних глибин та необхідного ландшафту морського дна, мають обмежену маневреність, часто займають частину суднового ходу і створюють динамічну навігаційну перешкоду [5-7]. Така ситуація суттєво ускладнює планування безпечного розходження та вимагає підвищеного рівня ситуаційної обізнаності екіпажів і операторів VTS.

У сучасному суднопластві не існує універсального рішення для точного прогнозування ризиків під час взаємодії з днопоглиблювальними суднами. Традиційні методи попередження зіткнень недостатньо враховують просторову змінність навігаційних перешкод [8, 9], вплив гідрометеорологічних чинників [10-11], а також відсутність прямої комунікації між суднами [12, 13]. Таким чином, виникає необхідність у формалізації навігаційних зон небезпеки та впровадженні цифрових технологій, що дозволяють динамічно оцінювати ситуацію в реальному часі.

Актуальність проблеми визначається потребою у комплексному підході до забезпечення безпеки судноплавства у присутності днопоглиблювального флоту [14, 15], включаючи розробку адаптивних математичних моделей навігаційної зони [16, 17], алгоритмів проактивного прогнозування траєкторій [18, 19], а також інтеграцію таких моделей у навігаційні системи наступного покоління. Такий підхід сприятиме зниженню ризику навігаційних інцидентів, підвищенню ефективності портових операцій та відповідатиме міжнародним вимогам з безпеки судноплавства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виникнення аварійних ситуацій зближення суден у стиснених водах здебільшого відбувається через некоректні, несвоєчасні і некваліфіковані дії з боку навігаційного офіцера і зрідка через технічну несправність суднової апаратури [20-22].

Проблематика забезпечення безпеки розходження суден у стиснених водах отримала значну увагу у вітчизняних та закордонних наукових публікаціях. Більшість досліджень зосереджено на аналізі аварійних ситуацій, що виникають через помилки у судноводінні [23-25], несвоєчасне прийняття рішень або відсутність належної координації між учасниками судноплавства [26-28]. Серед основних ризиків – несвоєчасне маневрування [29, 30], неправильно обрана швидкість або курс [31, 32], а також недостатнє урахування динаміки інших суден у зоні обмеженої маневреності [33, 34].

В наукових роботах пропонують комплекс дій для екстреного уникнення зіткнень, включаючи екстремальні маневри, реверсування, гальмування або віддачу якоря, а також комбінацію зазначених методів. У складних ситуаціях зближення суден, особливо в районах високої щільності трафіку, системах поділу руху або у припортових водах, навігаційні офіцери змушені здійснювати точні розрахунки та обирати маневри, що не лише відповідають вимогам МППЗС-72, а й враховують геометрію траєкторій зближення з кількома суднами.

Суттєвий внесок у розв'язанні завдань безпечного розходження зроблено в галузі математичного моделювання та оптимального управління [35-37]. Зокрема, використання теорії оптимального управління дозволяє будувати маневри уникнення за наявності кількох навігаційних перешкод. Алгоритми, що поєднують лінійне та нелінійне програмування, формують траєкторії руху, мінімізуючи ймовірність зіткнення та визначаючи допустимі зони маневрування навіть у складних умовах.

У випадках багатосуднових конфліктів (три і більше судна) запропоновано підхід з формуванням стратегій адаптивного маневрування – як пріоритетних, так і резервних – що дає змогу уникнути залежності від дій інших суден, які можуть виявитися непередбачуваними. Аналіз істинних та відносних траєкторій показує, що ефективне ухилення потребує врахування швидкісних параметрів об'єктів і, за певних умов, вимагає поетапного виконання маневрів.

Водночас встановлено важливість аналізу форми траєкторій для повернення судна до початкової траєкторії після виконання ухилення. Залежно від співвідношення швидкостей між судном та перешкодою, істинна і відносна траєкторії можуть суттєво різнитися, що впливає на вибір оптимального маневру. Інші дослідження (що враховують роботу всього пропульсивного комплексу [38-41]) також надають аналітичні умови для існування декількох допустимих стратегій розходження в складних сценаріях.

Проте більшість вищезгаданих досліджень орієнтовані на сценарії, що відбуваються у відкритому морі, де судна мають більший маневровий простір. У випадку обмежених акваторій таких як вузькості, канали або порти, питання безпечного маневрування набуває іншого характеру. При цьому провідну роль відіграють берегові диспетчерські служби, оператори VTS та лоцманські команди, що координують рух у режимі реального часу. Водночас у таких зонах часто присутні днопоглиблювальні судна, які є обмеженими в маневреності та створюють динамічні навігаційні перешкоди [42, 43].

Слід відзначити, що спеціалізовані дослідження, присвячені розходженню суден з днопоглиблювальними суднами, наразі є обмеженими. У науковій літературі практично відсутні комплексні моделі, що враховують динамічну геометрію зони днопоглиблювальних робіт, непередбачуваність їхньої конфігурації (враховуючи шланги, якорі, робочі механізми) та вплив зовнішніх чинників (вітру, течії) на параметри суднового руху. Це створює значний науковий і практичний розрив, що вимагає розробки адаптивних навігаційних моделей, алгоритмів прогнозування конфліктних ситуацій та інтеграції цих інструментів у цифрові навігаційні системи нового покоління.

**Формулювання цілей статті.** Ціллю статті є розробка науково обгрунтованої концепції забезпечення безпеки судноплавства під час розходження з суднами, що виконують днопоглиблювальні роботи, шляхом математичного моделювання адаптивної навігаційної зони та впровадження інноваційних цифрових технологій для прогнозування та підтримки маневрування в умовах обмежених акваторій.

**Виклад основного матеріалу.** Функціонування сучасних морських портів в умовах зростаючої інтенсивності міжнародних вантажопотоків вимагає від адміністрацій та операторів забезпечення безперервного і безпечного судноплавства. З урахуванням збільшення габаритів суден, зокрема контейнеровозів і танкерів, підтримка достатніх глибин у фарватерах набуває критичного значення, що, своєю чергою, обумовлює системне виконання днопоглиблювальних робіт як постійної складової експлуатаційної діяльності портів. Присутність днопоглиблювальних суден, які за класифікацією міжнародних правил МПЗС-72 відносяться до категорії суден, обмежених у здатності маневрувати, створює низку навігаційних ризиків. Їх експлуатація у вузьких або складних ділянках фарватеру ускладнює маневрування інших суден, а формальні правила не завжди враховують специфіку взаємодії в умовах змінних зовнішніх факторів – течій, хвиль чи вітру, які впливають на динаміку розходження. Основні навігаційні ризики, спричинені присутністю днопоглиблювальних суден:

- 1) звуження суднового ходу внаслідок розміщення робочого обладнання;
- 2) наявність шлангів, якірних ліній та інших механізмів, що виступають за габарити корпусу судна;
- 3) збурення водного потоку, яке впливає на траєкторії інших суден у зоні робіт;
- 4) обмежена або відсутня передача динамічної інформації про переміщення днопоглиблювального судна для інших учасників навігації.

У цьому контексті актуалізується потреба у впровадженні адаптивних моделей управління, здатних не лише враховувати геометричні параметри обладнання (наприклад, довжину шлангів чи зону якоріння), але й прогнозувати зміни навігаційної обстановки у режимі реального часу. Особливої актуальності набувають інтелектуальні системи прогнозування, цифрові двійники портової акваторії та V2V-комунікація (vehicle-to-vehicle) як засоби підвищення ситуаційної обізнаності й навігаційної безпеки.

Порт Роттердам, як один із найзавантаженіших морських хабів Європи, демонструє ефективні технологічні підходи до управління ризиками під час виконання днопоглиблювальних робіт в зоні Nieuwe Waterweg та у зоні Maasvlakte. Порт Роттердам є показовим прикладом ефективного трафік-менеджменту де реалізовано низку організаційних і технічних заходів:

- 1) використання VTS (системи управління рухом суден) для централізованої координації трафіку;
- 2) інтеграція AIS-даних (Automatic Identification System) у Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) з метою підвищення ситуаційної обізнаності;
- 3) візуальна та цифрова ідентифікація днопоглиблювальних суден згідно з міжнародними стандартами;
- 4) динамічне планування маршрутів інших суден із можливістю тимчасового обмеження доступу до зон виконання робіт.

Водночас, навіть у таких умовах спостерігається нестача проактивних технологій, здатних забезпечити адаптивне керування у складних ситуаціях багатооб'єктної взаємодії.

У відповідь на ці виклики пропонується модель адаптивної навігаційної зони (ANZ – Adaptive Navigation Zone), що математично описується як динамічна еліпсоїдна оболонка. Її межі формуються з урахуванням радіуса безпечного обходу, довжини шлангів і орієнтації обладнання, що дозволяє здійснювати просторову локалізацію потенційно небезпечної зони. Судна, які наближаються, можуть за допомогою вбудованого алгоритму перевіряти відстань до меж ANZ і, відповідно, будувати безпечну траєкторію маневру, враховуючи допустимий рівень ризику.

Адаптивна навігаційна зона (Adaptive Navigation Zone, ANZ), яка описується як еліпсоїдна оболонка, що динамічно змінюється залежно від розташування судна та конфігурації обладнання, як наведено на рис. 1.

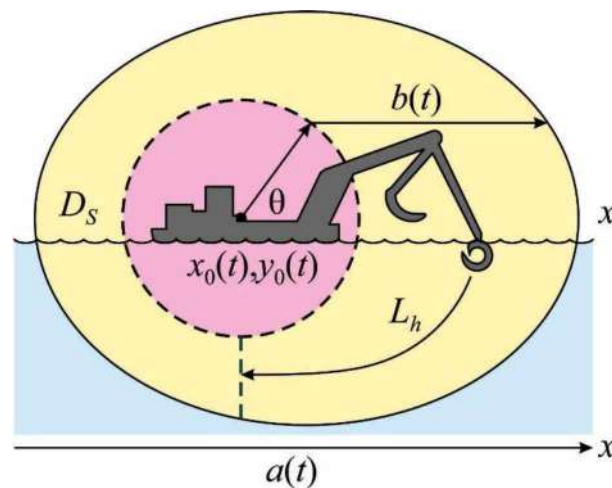


Рисунок 1 – Адаптивна навігаційна зона робота днопоглиблювального судна

Відповідно до моделі адаптивної навігаційної зони роботи днопоглиблювального судна, що надана на рис. 1:

$D_s$  – базовий радіус безпечного обходу навколо судна,

$L_h$  – ефективна довжина шлангів або якірних ліній, що виступають за корпус судна,

$\theta$  – кутова орієнтація обладнання відносно осі руху судна,

$x_0(t), y_0(t)$  – координати центру судна у момент часу  $t$ ,

$a(t), b(t)$  – півосі еліпса, що визначають форму зони.

Тоді множина точок, що описує адаптивну зону небезпеки, задається формулою:

$$\Omega(t) = \left\{ (x, y) \in R^2 \mid \left( \frac{x - x_0(t)}{a(t)} \right)^2 + \left( \frac{y - y_0(t)}{b(t)} \right)^2 \leq 1 \right\};$$

де  $R$  – обшир, в якому існує небезпека під час розходження транспортного судна та судна, що виконує днопоглиблювальні роботи;

$a(t) = D_s + L_h \cdot \cos\theta$  – довша піввісь, орієнтована вздовж шлангів;

$b(t) = D_s + L_h \cdot \sin\theta$  – коротша піввісь, залежно від орієнтації обладнання.

Для кожного судна, що наближається, виконується оцінка мінімальної відстані  $d_{\min}(t)$  у межах прогнозованого вікна часу  $\Delta t$ :

$$d(t) \min \|r_1(t') - r_2(t')\|, \quad / [t, t + \Delta t]_{\min}$$

де  $r_1(t), r_2(t)$  – векторні траєкторії днопоглиблювального судна і транспортного судна, що наближається; Обов'язкові умови виконання для безпечного розходження, будуть за умов:

$$d(t) \geq d_{\text{safe min}}$$

де  $d_{\text{safe}}$  – гранична безпечна відстань, яка гарантує уникнення критичної ситуації.

Якщо ця нерівність не виконується, запускається алгоритм перепланування маневру або автоматичного сповіщення VTS/AR-системи.

Запропонований підхід дозволяє реалізувати превентивне планування, яке враховує конфігурацію робочого обладнання, орієнтацію шлангів, просторово-часову динаміку руху суден та змінні зовнішні умови, як наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Використання адаптивної навігаційної зони в порту Роттердам

Для реалізації такого підходу необхідні високотехнологічні інструменти, здатні забезпечити точне моделювання та візуалізацію навігаційного середовища в режимі реального часу.

Однією з найперспективніших концепцій у цьому напрямку виступає використання цифрових двійників (Digital Twin) – віртуальних моделей портової інфраструктури, які працюють у режимі реального часу. Такі моделі забезпечують динамічну візуалізацію актуального положення суден, зон проведення робіт, прогнозів, сформованих на основі гідрометеоумов, а також конфігураційних змін днопоглиблювального обладнання. Зокрема, цифрові двійники дозволяють не лише

моніторити ситуацію, а й прогнозувати потенційні конфлікти траєкторій, що суттєво підвищує якість прийняття рішень у вузьких акваторіях.

Додаткову підтримку судноводію надають AR-системи (доповнена реальність), які виводять на AR-дисплеї містка проєкції зон ризику  $\Omega(t)$ , допустимих траєкторій руху та динамічних обмежень, що базуються на просторово-часовій оцінці навколишнього середовища. Таке візуальне доповнення забезпечує інтуїтивне орієнтування в складному середовищі без перевантаження інформаційного інтерфейсу, зберігаючи високий рівень ситуаційної обізнаності.

Особливу роль у підвищенні координації між суднами відіграє V2V-комунікація (vehicle-to-vehicle) у комбінації з ALRS (Automated Local Route Suggestions) – автоматизованою системою рекомендацій щодо маршруту. Судна, що входять у потенційно конфліктну зону, обмінюються сигналами про наміри, коригують свою швидкість та час входу до зони під контролем берегових служб (VTS), отримуючи при цьому об'єктивні рекомендації щодо оптимального маршруту. Такий підхід дозволяє реалізувати принцип взаємного узгодження маневрів у реальному часі, що є критично важливим у зонах обмеженого маневрування.

Всі перелічені технологічні компоненти інтегруються в сучасні навігаційні системи, зокрема в ECDIS (Electronic Chart Display and Information System), адаптовані до стандарту S-100, що забезпечує підтримку багат шарових картографічних даних, гнучке відображення об'єктів у динаміці та сумісність з інтелектуальними алгоритмами. Прогнозування траєкторій здійснюється на основі багатоджерельних даних, зокрема інформації з датчиків, результатів машинного навчання та розв'язання рівнянь руху з урахуванням гідродинамічних збурень, що дає змогу реалізувати адаптивне управління судном у реальному часі з можливістю попередження входу до критичних зон ще на етапі стратегічного планування.

Застосування цифрових двійників, AR-технологій, V2V-протоколів і ALRS у поєднанні з математичним моделюванням адаптивної навігаційної зони створює умови для розвитку напівавтономного або повністю автономного судноводіння, особливо в умовах інтенсивного портового трафіку та днопоглиблювальних операцій. Таким чином, впровадження вищезазначених інструментів формує нову систему ситуаційної підтримки прийняття рішень, де поєднуються аналітичні, цифрові та когнітивні компоненти для досягнення максимальної точності, узгодженості та безпеки судноплавства у складних навігаційних умовах.

**Висновки.** Забезпечення безпеки маневрування в умовах інтенсивного портового трафіку та присутності днопоглиблювального флоту є складним багатофакторним завданням, що вимагає системного підходу та впровадження інноваційних технологій. Аналіз сучасного стану морського транспорту вказує на відсутність універсальних рішень для прогнозування та уникнення навігаційних конфліктів у складних акваторіях, що обумовлює необхідність розробки нових підходів до моделювання траєкторій та формалізації зон ризику.

Запропонована в роботі концепція адаптивної навігаційної зони (ANZ), яка описується як динамічна еліпсоїдна оболонка навколо днопоглиблювального судна, враховує конфігурацію обладнання, його орієнтацію та просторові обмеження. Математична формалізація цієї зони дозволяє здійснювати оцінку мінімальної безпечної відстані в режимі реального часу та ініціювати автоматизовані маневрові рішення або попереджувальні дії у разі потенційного входу в небезпечну зону.

Ефективність підходу підкріплена прикладом порту Роттердам, де продемонстровано переваги використання інтегрованих навігаційних систем, VTS-координації, AR-інтерфейсів, V2V-комунікації та ALRS для динамічного управління потоками суден у зонах днопоглиблювальних робіт. Це свідчить про практичну реалізованість концепції в умовах інтенсивної взаємодії морських об'єктів.

Запропонована система ситуаційної підтримки рішень, яка поєднує адаптивне моделювання, цифрову візуалізацію та комунікаційні протоколи, формує основу для впровадження нового

покоління навігаційних технологій, орієнтованих на безпеку, ефективність та відповідність вимогам міжнародних стандартів.

Таким чином, результати дослідження мають не лише теоретичну цінність, а й практичну спрямованість, пропонуючи інструментарій для покращення управління судноплаванням у складних умовах портової діяльності. Подальші дослідження доцільно зосередити на розширенні моделей ANZ з урахуванням непередбачуваної поведінки навігаційних об'єктів, підвищенні точності прогнозів за рахунок нейромережових підходів та інтеграції з глобальними системами моніторингу і управління морським рухом.

## ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Даки 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.
3. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у судових СППР // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
4. 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.
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. 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.
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. Тимошук О.М., Даки 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>.
9. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
10. Ворохобін І.І., Бурмака І.О., Кулаков М.О., Петриченко О.О. Спосіб департаментизації електронної карти при зовнішньому управлінні розходження суден в зоні відповідальності СУРС // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 32. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 26-33. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
11. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
12. 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.
13. Бурмака І.А., Ворохобін І.І., Федоров Д.Б. Учет динамики судов при автоматическом выборе маневра расхождения уклонением одного судна и пассивным торможением другого // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 31. – С. 80-88. DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.

14. Майданевич С.Б., Тимошук О.М. Суб'єкти та принципи міжнародного морського права // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 39-47. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.05.
15. 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). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
20. Sagin S. V., Kuropyatnyk O. A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43.
21. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
22. Сагін С.В., Бондар С.А. Розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
23. Сагін С.С., Сагін С.В. 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.
24. 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.
25. Ворохобин І.І. Зависимость вероятности безопасного прохождения судном стесненного района от закона распределения погрешности смещения // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 30. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 58-66. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
30. Сагін С.С., Ворохобин І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морського транспорту // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 76-88.

31. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
32. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
33. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
34. 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.
35. 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” – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
36. 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.
37. 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.
38. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Використання інтегрованих діагностичних моделей для оцінки експлуатаційних характеристик судового пропульсивного комплексу // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 133-140. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.15.
39. Сагін С.В., Заблоцький 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. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
40. 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.
41. 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.
42. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.
43. Сагін С.В., Заблоцький 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.

## REFERENCES

1. 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. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
2. 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. – Vol. 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
3. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel CDSS. // Water transport. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.

4. 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.
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. 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.
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. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2020. – Vol. 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
9. Levynskiy M.V., Levynskiy V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // *Automation of ship technical facilities*. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
10. Vorokhobin I., Burmaka I., Kulakov M., Petrychenko O. A Method of electronic chart departmentisation under external control of vessels' passing in VTS areas // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol.32. – P.26-33. doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
11. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
12. 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.
13. Burmaka I., Vorokhobin I., Fedorov D. Account dynamics of ships at the automatic choice of manoeuvre of divergence by deviation of one ship and by the passive braking of the other // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol. 31. – P. 80-88. doi.org/10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
14. Maydanevich S.B., Tymoshchuk O. Subjects and principles of the international maritime law // *Water transport*. – 2021. – Vol. 3(34). – P. 39-47. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.05.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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>.
19. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – № 41. – P. 20-25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
20. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
21. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.

22. Sagin S.V., Bondar S.A. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
23. 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). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
24. Tymoshchuk O., Melnyk O. Analysis of the possibility of using the divergence maneuver by changing the course // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2023 – Vol.1(37). – P.96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
25. Vorokhobin I. Impact of the cross-track error distribution law on safe navigation in narrow waters // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2020. – Vol.30. – P.58-66. doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.
26. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
27. 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>.
28. 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.
29. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
30. Sagin S.S., Vorokhobin I.I. Minimizing the risk of maritime incidents during navigation passages of sea transport vessels // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 76-88.
31. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
32. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
33. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
34. Levynskyi 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
35. 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”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
36. 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.
37. 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>.
38. 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. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
39. 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.
40. 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.

41. 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.
42. 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.
43. 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.

*Sagin S.S., Sagin S.V.*

### **ENSURING THE SAFETY OF NAVIGATION DURING ENCOUNTERS WITH VESSELS ENGAGED IN DREDGING OPERATIONS**

*An analysis was carried out on the specific features of organizing safe maneuvering of seagoing vessels in dredging operation zones. One of the key threats in such waters is identified as the limited maneuverability of dredging vessels, as well as the variable spatial configuration of navigational obstacles caused by the positioning of hoses, anchors, and equipment. It has been established that traditional approaches to collision avoidance and prediction fail to account for the variability of hazardous zone geometry, the dynamics of hydro-meteorological conditions, and the lack of direct communication between vessels. A critical review of scientific literature was conducted, focusing on avoidance algorithms in multi-vessel conflict scenarios, optimal control strategies, the development of adaptive maneuvering tactics, and mathematical modeling of feasible trajectories. It was revealed that most existing solutions are tailored to open-sea conditions, which do not meet the requirements of confined port waters, where dredging equipment, hoses, and anchor lines introduce additional complexity. In response to these challenges, the paper proposes the concept of an Adaptive Navigation Zone (ANZ), modeled as a dynamic ellipsoidal envelope around a dredging vessel. The parameters of this zone are formed based on the geometric characteristics of the onboard equipment, its spatial orientation, and spatio-temporal dynamics. A formal model of the adaptive navigation zone has been developed, incorporating safe distance criteria and dynamic obstacle configurations, along with an algorithm for assessing the risk of intrusion by other vessels. The proposed method is designed for integration into next-generation digital navigation systems and supports real-time maneuver re-planning. The feasibility of using Digital Twins of port areas is substantiated to visualize situational dynamics, forecast risks, and support decision-making. An example of effective implementation is presented using the case of the Port of Rotterdam, where a suite of tools is employed: VTS coordination, AIS integration, AR displays, V2V communication protocols, and ALRS. The study demonstrates that combining ANZ-based mathematical modeling with digital technologies not only improves the accuracy of navigational situational assessment but also ensures mutual coordination of vessel actions in high-risk scenarios. All system components are compatible with the S-100 standard and may be applied in both conventional navigation and semi-autonomous scenarios. The article's conclusions emphasize the high potential of the proposed approach to reduce navigational risks, enhance port operation safety, and comply with international maritime safety standards. Future work envisions the enhancement of the Adaptive Navigation Zone (ANZ) model using neural networks and deep learning to improve trajectory prediction accuracy and adapt to unpredictable behavior of vessels and dredging equipment.*

**Keywords:** *adaptive navigation zone, compressed water areas, dredging vessels, maritime transport, navigation safety, navigation zone modeling, navigational obstacles, optimal control, seabed landscape, shipping, trajectory prediction, vessel maneuvering.*

*Стаття прийнята 14.03.2025*

© Сагін С.В., Поповський О.Ю., Куропятник О.А.

## ОСОБЛИВОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ВИБІРКОВОГО КАТАЛІТИЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ

Наведені результати досліджень щодо визначення особливостей регулювання частоти обертання суднового дизеля під час використання системи вибіркового каталітичного відновлення. Зазначено, що одним з варіантів забезпечення вимог Міжнародної конвенції МАРПОЛ щодо емісії оксидів азоту з випускними газами є використання систем вибіркового селективного очищення. Переведення дизеля з експлуатаційного режиму, яким не передбачалось використання системи вибіркового селективного очищення, на режим, в якому випускні гази піддаються очищення за допомогою цієї системи, призводить до зміни зовнішнього навантаження на дизель, що є причиною зменшення його частоти обертання. Нехтування раптовим та стрибкоподібним збуренням, що виникає через введення в експлуатацію системи вибіркового каталітичного відновлення може призвести до критичного зменшення частоти обертання та відповідного зменшення крутного моменту дизеля. На деяких експлуатаційних режимах це може бути причиною зупинки дизеля та виникнення аварійної навігаційної ситуації. Моделювання динамічних режимів роботи під час використання системи вибіркового каталітичного відновлення виконувалось для суднового малообертового дизеля 5X72DF фірми WinGD та ізодромного астатичного регулятора. Математичне моделювання було виконано в програмному середовищі пакету комп'ютерної математики Matlab / Simulink. Як параметри налаштування ізодромного астатичного регулятора були обрані коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою та час інтегрування інтегруючої компоненти. Як критерії оптимізації процесу регулювання були прийняті час регулювання та відносний динамічний закид частоти обертання. Шляхом математичного моделювання були встановлені оптимальні параметри налаштування регулятора: коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою – 4,5 та час інтегрування інтегруючої компоненти – 0,125 с. При цьому забезпечуються найменші для всіх перехідних процесів час регулювання – 1,78 с та відносний динамічний закид частоти обертання – 12,2 %. Це забезпечує оптимальний процес виходу головного двигуна на новий сталій режим під час переведення його на експлуатаційний режим з використанням системи вибіркового каталітичного відновлення.

**Ключові слова:** автоматичне регулювання частоти обертання, збурення, критерії оптимізації, математична модель, морський транспорт, навантаження, параметри налаштування регулятора, перехідний процес, регулювання, система вибіркового каталітичного відновлення, судновий дизель, чисельне моделювання, швидкісний режим суднового дизеля

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Суднові дизелі під час забезпечення судна енергією забруднюють довкілля, перш за все це пов'язано з неминучим викидом в атмосферу випускних газів – кінцевого продукту процесу згоряння палива в циліндрі дизеля [1-3]. Більшість складових випускних газів відносяться до нетоксичних компонентів. Це продукти неповного згоряння палива – діоксид вуглецю  $\text{CO}_2$  і водяна пара  $\text{H}_2\text{O}$ , а також газова суміш зі зниженим вмістом кисню  $\text{O}_2$  (концентрація якого виключає займання залишків вуглеводнів) та атомарний азот  $\text{N}_2$ . Поруч з цим до складу випускних газів входять токсичні компоненти, найбільш шкідливими з яких є монооксид вуглецю  $\text{CO}$ , а також оксиди сірки  $\text{SO}_x$  і азоту  $\text{NO}_x$  [4-6].

Одним з варіантів зменшення концентрації оксидів азоту  $\text{NO}_x$  в випускних газах є їх вибіркоче селективне очищення (Selective Catalytic Reduction – SCR), в разі використання якого газу спрямовуються в спеціальний колектор (SCR-реактор), в якому здійснюється їх очищення за допомогою спеціальних хімічних речовин [7-9]. В результаті хімічних реакцій, що перебігають в SCR-реакторі, оксиди азоту  $\text{NO}_x$  перетворюються в атомарний азот  $\text{N}_2$ . Таким чином суттєво (до 90...95 %) знижуються викиди оксидів азоту в довкілля. Системи SCR є найбільш ефективним способом очищення випускних газів від  $\text{NO}_x$  та забезпечують вимоги Додатку VI МАРПОЛ щодо попередження забруднення повітряного середовища з суден [10-12]. Також необхідно визначити, що використання систем SCR сприяє забезпечення вимог Tier III, що висуваються для екологічних показників суден, побудованих після 01.01.2016 р.

З безумовними перевагами системи SCR пов'язані деякі недоліки. Одним з них є збільшення аеродинамічного опору в газувипускній системі дизеля під час виконання вибіркового селективного очищення. Переведення дизеля з експлуатаційного режиму, яким не передбачалось використання системи SCR, на режим, в якому випускні газу потрапляють до SCR-реактору, призводить до зміни зовнішнього навантаження на дизель, що є причиною зменшення його частоти обертання [13-15]. Таким чином, введення в експлуатацію системи SCR вимагає регулювання швидкісного режиму роботи дизеля, а також вибору оптимальних режимів системи автоматичного регулювання частоти обертання.

Актуальність проблеми регулювання швидкісного режиму роботи дизеля пов'язана з забезпеченням ходових та маневрових якостей судна. Раптове стрибкоподібне зниження частоти обертання, або тривалий час регулювання дизеля з метою його повернення до заданого швидкісного режиму можуть викликати аварійні ситуації [16, 17], сприяти підвищенню рівню навігаційних небезпек [18, 19], бути першопричиною збільшення температурних [20, 21] та механічних [22, 23] навантажень на основні елементи дизеля [24, 25], гвинта [26, 27] та корпусу судна [28, 29].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Регулювання швидкісного режиму судових дизелів (головних – що передають потужність гребному гвинту за забезпечують рух судна, та допоміжних – таких, що є приводом судових електричних генераторів та в такій спосіб забезпечують роботу допоміжного, навігаційного та палубного обладнання) є обов'язковою складовою їх експлуатації [30-32]. Збільшення або зменшення частоти обертання головного двигуна впливає на його динамічне навантаження [33-35]. В разі збільшення частоти обертання під час експлуатації дизеля на номінальному режимі можлива його короткочасна робота за обмежувальною характеристикою [36-38]. При цьому система автоматичного регулювання зменшує циклову подачу палива, що відповідно до часу регулювання зменшую частоту обертання та призводить до повернення дизеля з області динамічного перенавантаження [39-41]. Під час зменшення частоти обертання автоматична система регулювання сприяє збільшенню циклової подачі палива та повертає в такий спосіб встановлений раніше експлуатаційний режим роботи дизеля [42-44]. Таким чином судові системи автоматичного регулювання швидкісного режиму судових дизелів як зовнішні збурення приймають зміну навантаження на гребний гвинт та корпус судна (перш за все хвилювання моря, динамічні навантаження з боку вітру, підводні течії) [45-47]. Одночасно з цим, таке зовнішнє збурення як збільшення аеродинамічного навантаження на газувипускную систему (яке виникає під час переведення дизеля на експлуатаційний режим з використанням системи вибіркового каталітичного відновлення) не враховується та не регламентується інструкціями з експлуатації дизелів, що в деяких випадках може призвести до виникнення аварійних ситуацій та зменшенню надійності роботи дизеля та судового пропульсивного комплексу [48, 49].

**Формулювання цілей статті.** Ціллю статті є визначення оптимальних режимів експлуатації судової системи автоматичного регулювання швидкісного режиму роботи дизеля в разі використання системи вибіркового каталітичного відновлення випускних газів.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження виконувались на судні класу LNG Carrier вантажомісткістю 53480 м<sup>3</sup>. Як головний двигун на судні використовувався судовий малооборотний дизель 5X72DF фірми WinGD з номінальною потужністю 32950 кВт та номінальною частотою обертання колінчатого валу 86 об/хв.

З метою забезпечення вимог Додатку VI МАРПОЛ випускні гази суднового дизеля 5X72DF додатково очищувались в системі SCR. При цьому емісія оксидів азоту з випускними газами не перевищувала 3,4 г/(кВт·год), що відповідало рівню Tier III. В разі, коли випускні гази дизеля не піддавались додатковому очищенню, емісія оксидів азоту не перевищувала значення 14,4 г/(кВт·год), що відповідало рівню Tier II. Схема очищення випускних газів дизеля за допомогою системи SCR надана на рис. 1.

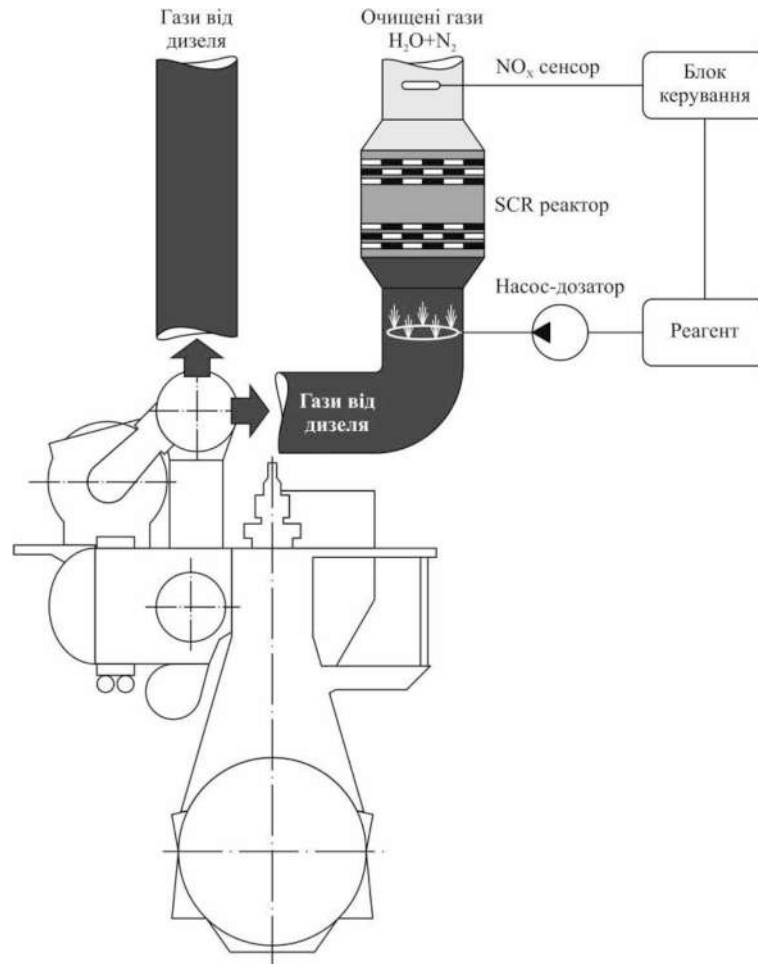


Рисунок 1 – Принципова схема очищення випускних газів суднового дизеля 5X72DF фірми WinGD від оксидів азоту за допомогою системи SCR

Розташування енергетичного обладнання, що забезпечує очищення випускних газів дизеля, в машинному відділенні судна наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Розташування обладнання, що забезпечує очищення випускних газів, в машинному відділенні судна

До складу автоматичної системи регулювання (АСР) швидкісного режиму роботи дизеля входили безпосередньо двигун 5X72DF (як об'єкт регулювання) та автоматичний електронний регулятор (який працював за ізодромним законом та був підключений у від'ємний зворотний зв'язок). Для аналізу роботи такої системи було потрібно розрахувати та проаналізувати перехідні процеси, що були викликані сигналом зовнішньої збурюючої дії, яка була прикладена до об'єкту регулювання (а саме – зміні аеродинамічного навантаження на дизель в разі його роботи з використанням системи вибіркового каталітичного відновлення SCR).

Зміна збурюючої дії з часом моделювалася східчастоподібною функцією Хевісайда:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot 1(t),$$

амплітуда цього сигналу дорівнювала одиниці –  $\lambda_0 = 1$ , а тривалість фронту зростання складала 0,1 с.

Розрахунок процесів зводився до пошуку розв'язання системи звичайних диференціальних рівнянь, які описують зміну з часом регульованої величини  $\varphi$  (за яку приймалась відносна частота обертання валу дизеля) та керуючої дії  $\mu$  (яка визначалась як відносна зміна циклової подачі палива в циліндр дизеля). Розрахунок проводився для безрозмірних величин, тобто величин взятих по відношенню до свого номінального значення.

Двигун, як об'єкт регулювання швидкісного режиму в першому наближенні і з нехтуванням його нелінійних властивостей, відповідав стійкій ланці першого порядку із позитивною величиною коефіцієнту саморегулювання та описувався диференціальним рівнянням

$$T_a \cdot \frac{d\varphi}{dt} + k_c \varphi = \mu - \lambda(t) \quad (1)$$

де значення характеристик об'єкту регулювання – постійної часу  $T_a$  та коефіцієнту саморегулювання  $k_c$  вибиралися такими, що відповідають результатам спостережень процесів в об'єкті.

Ізодромний астатичний регулятор описувався пропорційно-інтегруючим законом у вигляді:

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{1}{T_i} \cdot (v - \varphi) - k_p \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2)$$

де  $k_p$  та  $T_i$  – варійовані параметри налаштування:

$k_p$  – коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою регулятора, відн. од.;

$T_i$  – час інтегрування інтегруючої компоненти, с;

$v$  – величина уставки регулятора, яка визначала значення регульованої величини (під час проведення аналізу обиралися значення  $v = 1$ , що відповідало номінальному режиму роботи двигуна).

К конструктивні особливості побудови регулятора обумовили можливий діапазон зміни коефіцієнту підсилення за пропорційною складовою та час інтегрування інтегруючої компоненти у межах  $-k_p \in [0,5 \dots 4,0]$  та  $T_i \in [0,1 \dots 0,5]$  с.

Система рівнянь повинна була розв'язуватися із додатковими початковими умовами  $\varphi(0) = v = 1$ ,  $\mu(0) = k_c \cdot \varphi(0)$ . Незважаючи на те, що записана система рівнянь є лінійною найбільш зручним є метод чисельного розв'язання за методом Дорманда-Принса 4 порядку. Чисельний розв'язок проводився шляхом візуального моделювання у програмному середовищі пакету комп'ютерної математики Matlab/Simulink. Динамічні ланки, що відповідали об'єкту регулювання і автоматичному регулятору склалися відповідно рівнянням (1) та (2), а врахування ненульових початкових умов визначило використання спеціальних блоків з розділу бібліотеки пакету Simulink Extras. Для візуальної гладкості функцій перехідних процесів крок інтегрування диференціальних рівнянь не перевищував величини 0,01 с.

Схема візуального моделювання представлена на рис. 3.

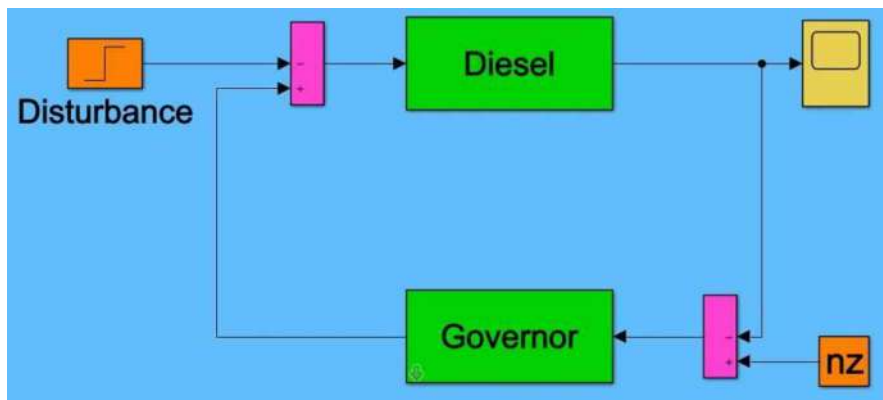


Рисунок 3 – Схема системи автоматичного регулювання частоти обертання валу дизеля

На рис. 3 позначені наступні елементи системи автоматичного регулювання:

- Disturbance – джерело збурюючої дії  $\lambda(t)$ , яка змінюється за східчастим законом;
- Diesel – об'єкт регулювання, вихідний сигнал якого (відносно значення швидкості обертання) є  $\varphi(t)$ ;
- Governor – автоматичний регулятор, вихідний сигнал якого (відносно значення керуючої дії) є  $\mu(t)$ ;
- nz – уставка регулятора  $v$  (у відносних одиницях швидкості  $nz=1$ ).

Налаштування режиму роботи АСР відбувалося шляхом покоординатної оптимізації, де як критерії оптимізації вибиралися час регулювання  $t_p$ , с та величина відносного динамічного закиду  $\sigma$ , %.

Варійованими параметрами були обрані параметри налаштування іпродромного регулятора – коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою  $k_p$  та час інтегрування інтегруючої компоненти  $T_i$ .

На рис. 4-8 проілюстровані зміни у характеру перебігу перехідного процесу за умовою зміни величини часу інтегрування –  $T_i=0,5$  с (1-ий процес),  $T_i=0,375$  с (2-ий процес),  $T_i=0,25$  с (3-ий процес) та

$T_i=0,125$  с (4-ий процес). Кожному з комплексу перехідних процесів відповідає певна величина коефіцієнта підсилювання за пропорційною складовою  $k_p=0,5$  (рис. 4),  $k_p=1,0$  (рис. 5),  $k_p=1,5$  (рис. 6),  $k_p=2,0$  (рис. 7),  $k_p=4,0$  (рис. 8).

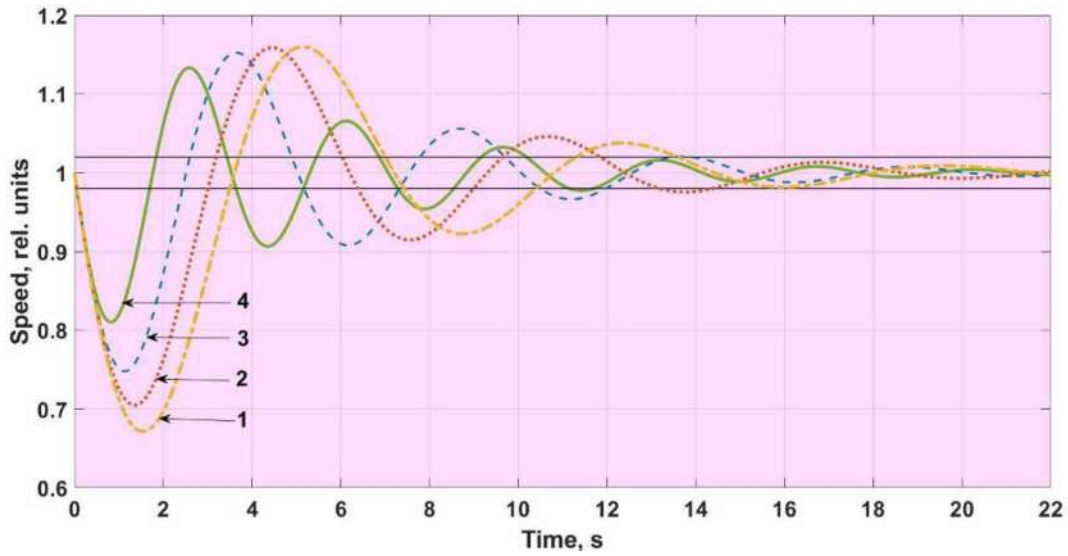


Рисунок 4 – Перехідні процеси для параметрів налаштування регулятора:

$k_p=0,5$  та 1 –  $T_i=0,5$  с; 2 –  $T_i=0,375$  с; 3 –  $T_i=0,25$  с; 4 –  $T_i=0,125$  с

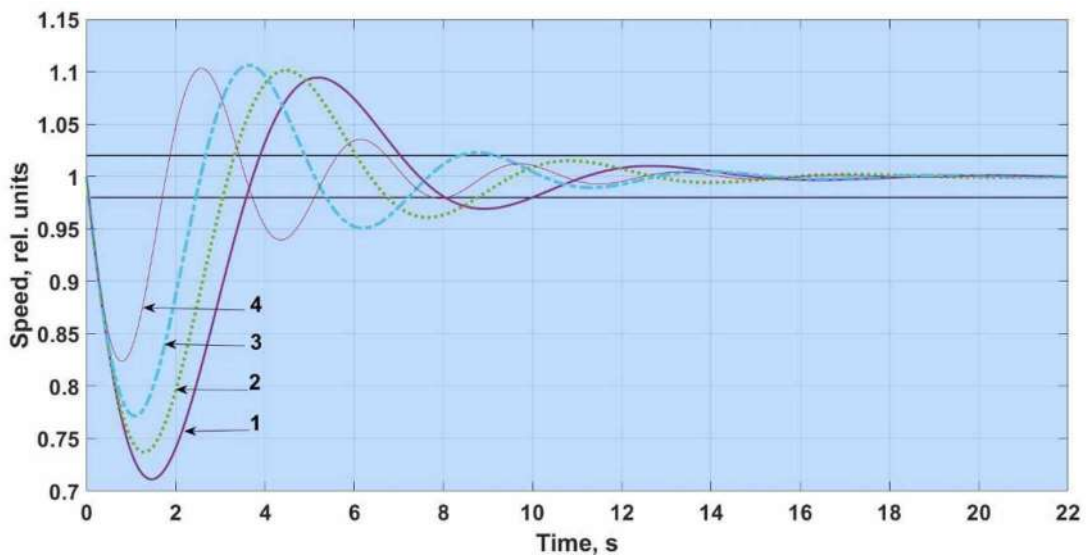


Рисунок 5 – Перехідні процеси для параметрів налаштування регулятора:

$k_p=1,0$  та 1 –  $T_i=0,5$  с; 2 –  $T_i=0,375$  с; 3 –  $T_i=0,25$  с; 4 –  $T_i=0,125$  с

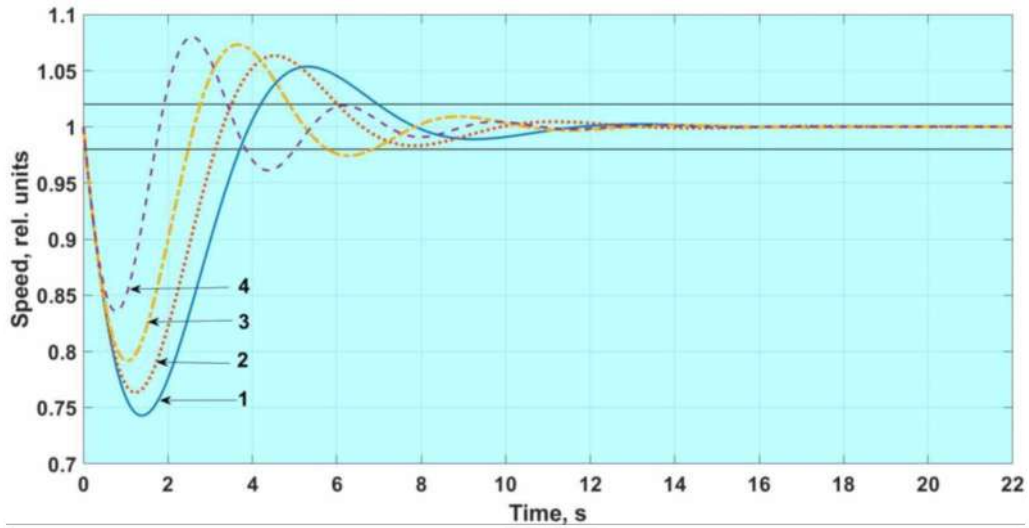


Рисунок 6– Перехідні процеси для параметрів налаштування регулятора:  
 $k_p=1,5$  та 1 –  $T_i=0,5$  с; 2 –  $T_i=0,375$  с; 3 –  $T_i=0,25$  с; 4 –  $T_i=0,125$  с

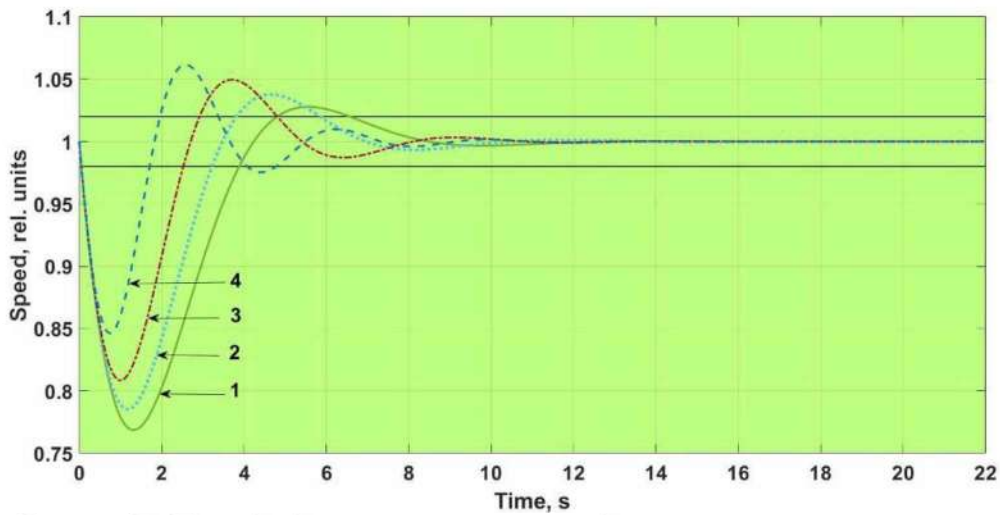


Рисунок 7– Перехідні процеси для параметрів налаштування регулятора:  
 $k_p=2,0$  та 1 –  $T_i=0,5$  с; 2 –  $T_i=0,375$  с; 3 –  $T_i=0,25$  с; 4 –  $T_i=0,125$  с

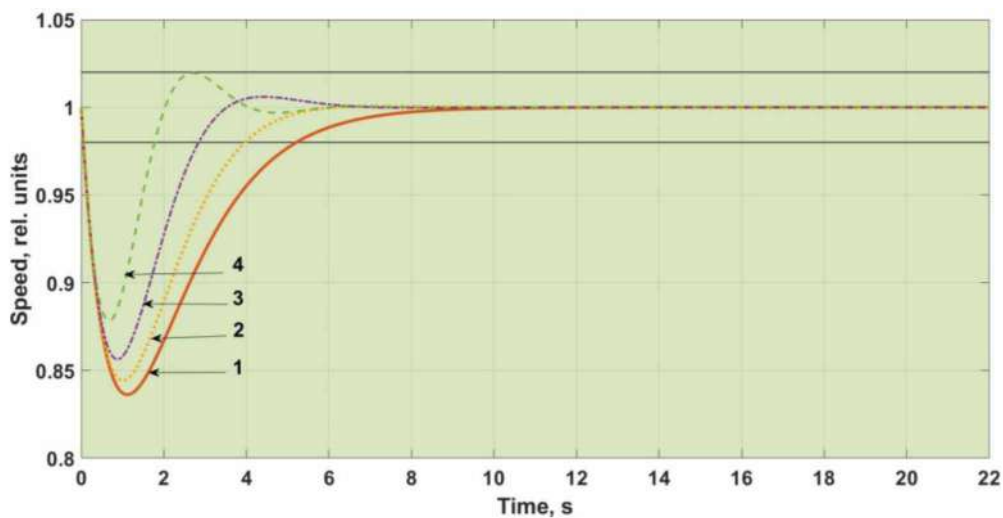


Рисунок 8– Перехідні процеси для параметрів налаштування регулятора:  
 $k_p=4,0$  та 1 –  $T_i=0,5$  с; 2 –  $T_i=0,375$  с; 3 –  $T_i=0,25$  с; 4 –  $T_i=0,125$  с

Результати визначення з графіків значень типових параметрів якості перехідних процесів, які водночас є критеріями оптимізації – часу регулювання  $t_p$  та відносного динамічного закиду  $\sigma$  зведені у таблицю 1.

Таблиця 1 – Критерії оптимальності для різних значень параметрів налаштування

| Параметри налаштування |           | Критерії оптимізації |           |
|------------------------|-----------|----------------------|-----------|
| $k_p$ , відн. од.      | $T_i$ , с | $\sigma$ , %         | $t_p$ , с |
| 0,5                    | 0,5       | 32,8                 | 16,02     |
|                        | 0,375     | 29,5                 | 14,40     |
|                        | 0,25      | 25,2                 | 12,05     |
|                        | 0,125     | 19,0                 | 11,76     |
| 1,0                    | 0,5       | 29,0                 | 10,02     |
|                        | 0,375     | 26,0                 | 8,82      |
|                        | 0,25      | 22,9                 | 9,13      |
|                        | 0,125     | 17,1                 | 8,29      |
| 1,5                    | 0,5       | 25,7                 | 6,16      |
|                        | 0,375     | 23,7                 | 6,01      |
|                        | 0,25      | 20,8                 | 6,92      |
|                        | 0,125     | 16,4                 | 5,03      |
| 2,0                    | 0,5       | 23,1                 | 6,53      |
|                        | 0,375     | 21,4                 | 5,80      |
|                        | 0,25      | 19,2                 | 4,79      |
|                        | 0,125     | 15,4                 | 4,82      |
| 4,0                    | 0,5       | 16,4                 | 5,21      |
|                        | 0,375     | 15,6                 | 3,96      |
|                        | 0,25      | 14,4                 | 2,85      |
|                        | 0,125     | 12,2                 | 1,78      |

Для кращої візуалізації результати моделювання також наведені на рис. 9 як діаграми, що відображають діапазон зміни критеріїв оптимізації (часу регулювання  $t_p$  та відносного динамічного закиду  $\sigma$ ) від параметрів налаштування (коефіцієнту підсилення за пропорційною складовою  $k_p$  та часу інтегрування інтегруючої компоненти  $T_i$ ).

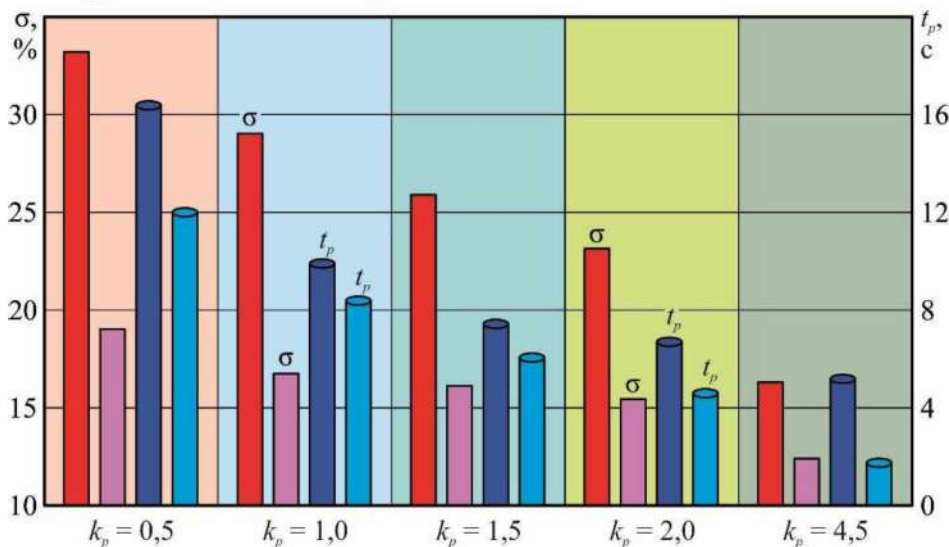


Рисунок 9 – Діапазон зміни критеріїв оптимізації (часу регулювання  $t_p$  та відносного динамічного закиду  $\sigma$ ) від параметрів налаштування (коефіцієнту підсилення за пропорційною складовою  $k_p$  та часу інтегрування інтегруючої компоненти  $T_i$ )

Об'ємна візуалізація наведених у таблиці 1 результатів проілюстрована на рис. 10, 11, на яких показана залежність динамічного закиду  $\sigma$  та часу регулювання від одночасної зміни параметрів налаштування у вигляді тривимірних графіків поверхонь функції.

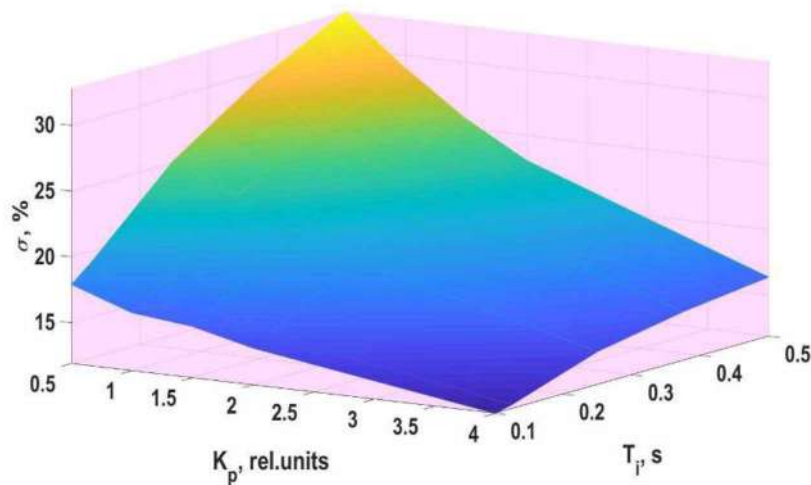


Рисунок 10 – Залежність величини динамічного закиду  $\sigma$  від параметрів налаштування регулятора

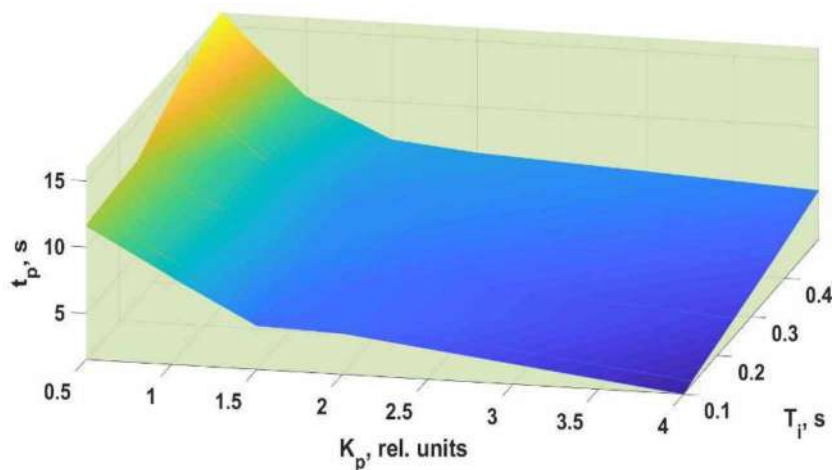


Рисунок 11 – Залежність величини часу регулювання  $t_p$  від параметрів налаштування регулятора

Наведені дані свідчать про тренд покращення якості перехідних процесів в АСР в цілому (з деякими незначними відхиленнями внаслідок коливального характеру перехідних процесів) пов'язаний із збільшенням коефіцієнту пропорційного підсилення та зменшенням часу інтегрування.

**Висновки.** Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Під час використання системи вибіркового каталітичного відновлення (що забезпечує зниження емісії оксидів азоту з випускними газами до рівню Tier III) через підвищення аеродинамічного опору збільшуються зовнішні збурення на судновий дизель. Це призводить до відхилення частоти обертання валу дизеля від встановленого завдання та сприяє виникненню перехідних процесів в автоматичній системі регулювання швидкісного режиму його роботи. Нехтування раптовим та стрибкоподібним збуренням, що виникає через введення в експлуатацію системи вибіркового каталітичного відновлення може призвести до критичного зменшення частоти обертання та відповідного зменшення крутного моменту дизеля. На деяких експлуатаційних режимах це може бути причиною зупинки дизеля та виникнення аварійної навігаційної ситуації.

2. Регулювання швидкісного режиму роботи дизеля здійснюється через зміну параметрів налаштування іздромного астатичного регулятора, якими є коефіцієнт підсилення за

пропорційною складовою та час інтегрування інтегруючої компоненти. Як критерії оптимізації процесу регулювання доцільно використовувати час регулювання та відносний динамічний закид частоти обертання.

3. Шляхом математичного моделювання (що було виконано в програмному середовищі пакету комп'ютерної математики Matlab / Simulink) встановлені оптимальні параметри налаштування регулятора: коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою – 4,5 та час інтегрування інтегруючої компоненти – 0,125 с. При цьому забезпечуються найменше значення часу регулювання – 1,78 с та величини відносного динамічного закиду частоти обертання – 12,2%. Це, у свою чергу, дає можливість відтворювати оптимальний процес виходу головного двигуна на новий сталий режим під час переведення його на експлуатацію з використанням системи вибіркового каталітичного відновлення.

### ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Sagin S. V., Kuropyatnyk O. O., Tkachenko I. V 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.
3. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport systems and technologies. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
4. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
5. 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.
6. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
7. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. https://doi.org/10.3390/jmse12081440
8. 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.
9. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – № 13. – P. 589. https://doi.org/10.3390/jmse1303058924.
10. 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.
11. 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.

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., Levynskiy M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
14. Gorb S., Levynskiy M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // Scientific Horizons. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
15. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
16. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
17. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22).
18. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судоводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у судових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. [doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10).
19. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20).
20. 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). – С. 59-70. [doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06).
21. 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.
22. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. [doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18).
23. Сагін С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
24. Levynskiy 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.
25. Сагін 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.
26. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
27. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судоводіння 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15).
28. Petrychenko O.O., Levynskiy M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
29. Сагін 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.

30. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
31. 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>.
32. 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. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
33. 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. – Одеса: ОГМА. – С.102-104.
34. Сагин С.С., Сагин С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
35. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
36. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
37. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
38. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
39. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // *International Journal of GEOMATE*. – 2023. – Vol. 25. – N 109. – Pp. 125-132. DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312>.
40. 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.
41. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту*. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
42. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // *Universum: Технические науки*. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
43. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants*. – 2025. – № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
44. Марченко О.О., Сагин С.В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив // *Судові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
45. Зверьков Д.О., Сагин С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // *Судові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
46. 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”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.

47. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal.* – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
48. 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>.
49. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи судових середньооборотних дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20).

## REFERENCES

1. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16).
2. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants.* – 2022. – № 45. – P. 5–16. [doi: 10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).
3. Petrychenko O., Levynskiy M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport systems and technologies.* – 2024. – № 43. – С. 21-36. [DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2](https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-2).
4. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Water transport.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21).
5. 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.
6. 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](https://doi.org/10.31653/smf340.2020.5-9).
7. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // *Journal of Marine Science and Engineering.* – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>
8. 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](https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131).
9. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering.* – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
10. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01).
11. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20).
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](https://doi.org/10.31653/smf340.2020.49-54).
13. Petrychenko O., Levynskiy M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // *Sustainability.* – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
14. Gorb S., Levynskiy M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons.* – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. [DOI: 10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).

15. 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.
16. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
17. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22).
18. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10).
19. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20).
20. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06).
21. 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.
22. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // Water transport. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. [doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18).
23. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2018. – № 4(57). – P. 109-120.
24. 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
25. 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.
26. Levinskyi M.V., Levinskyi V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // Automation of ship technical facilities. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
27. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15).
28. Petrychenko O.O., Levinskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96-106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
29. 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.
30. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37-43. [doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198](https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198).
31. 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](https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039).
32. Sagin S.V., Zablotsky 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 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.
34. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // Water transport. – 2024. – № 3(41). – C. 208-220. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21).

35. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
36. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
37. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
38. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
39. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // *International Journal of GEOMATE*. – 2023. – Vol. 25. – № 109. – P. 125–132. DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312>.
40. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74–83.
41. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.
42. Sagin S.V. Rheology of motor oils in start-up and reverse modes of marine low-speed diesel engines // *Universum: Technical sciences*. – 2018. – № 3(48). – P. 67–71.
43. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants*/ – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
44. 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.
45. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
46. 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”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
47. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7-8-36-43>.
48. 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>.
49. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V., Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166–179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.

*Sagin S.V., Popovskii O.Y., Kuropyatnyk O.A.*

#### **FEATURES OF REGULATING THE SPEED OF A MARINE DIESEL ENGINE WHEN USING A SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION SYSTEM**

The results of research on determining the features of regulating the rotational speed of a ship's diesel engine when using a selective catalytic reduction system are presented. It is noted that one of the options for ensuring the requirements of the International MARPOL Convention on the emission of nitrogen oxides with exhaust gases is the use of selective catalytic systems. Transferring a diesel engine from an operating mode that did not provide for the use of a selective selective purification system to a mode in which exhaust gases are purified using this system leads to a change in the external load on the diesel engine, which is the cause of a

decrease in its rotational speed. Neglecting sudden and abrupt disturbances that arise due to the commissioning of a selective catalytic reduction system can lead to a critical decrease in the rotational speed and a corresponding decrease in the diesel engine torque. In some operating modes, this can cause the diesel engine to stop and cause an emergency navigation situation. Modeling of dynamic operating modes when using the selective catalytic reduction system was performed for the 5X72DF marine low-speed diesel engine from WinGD and the isodromic astatic regulator. Mathematical modeling was performed in the Matlab/Simulink computer mathematics package software environment. The gain coefficient for the proportional component and the integration time of the integrating component were selected as the tuning parameters of the isodromic astatic regulator. The regulation time and the relative dynamic overshoot of the rotational speed were taken as the optimization criteria of the regulation process. By means of mathematical modeling, the optimal parameters of the regulator tuning were established: the gain coefficient for the proportional component – 4.5 and the integration time of the integrating component – 0.125 s. At the same time, the smallest regulation time for all transient processes – 1.78 s and the relative dynamic overshoot of the rotational speed – 12.2 % are provided. This ensures the optimal process of the main engine entering a new steady state when transferring it to the operational mode using the selective catalytic reduction system.

**Keywords:** *automatic speed control, controller settings, disturbances, high-speed mode of marine diesel load, marine diesel, marine transport, mathematical model, numerical simulation, optimization criteria, regulation, selective catalytic reduction system, transient process.*

*Стаття прийнята 19.03.2025*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОРГАНІЧНИХ НАНОПОКРИТЬ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ МАЩЕННЯ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Надані результати досліджень, щодо визначення впливу органічних нанопокриттів на забезпечення процесів мащення підшипникових вузлів судових дизелів. Експериментальні дослідження складались зі трьох етапів. На першому та другому, які проводились в науково-дослідницької лабораторії, визначались товщина адсорбованого шару різних епіламів на металевій поверхні, а також товщина та крайові кути змочування граничного шару мастила, що утворюється на металевій поверхні за таких умов. Товщина адсорбованого шару епіламу, а також характеристики структурованого граничного шару мастила визначались за допомогою елісометричної установки. При цьому було встановлено, що за тривалістю процесу епіламування до 10 хвилин на металевій поверхні утворюється адсорбований шар епіламу завтовшки 10,9... 17,7 нм. Це (для різних епіламів) сприяє збільшенню товщини граничного шару мастила зі значень 12,0... 12,7 мкм до 14,8... 18,0 мкм та підвищенню крайового кута змочування зі значень 9,7... 10,7 град до 15,4... 17,8 град, що свідчить про збільшення структурної впорядкованості мастила біля металевій поверхні. Третій етап досліджень виконувався на двох однотипних судових дизелях 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo, що входили до складу енергетичної установки судна класу Container Ship призначеного для перевезення 3780 TEU контейнерів. V-подібна конструкція дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo дозволяла нанести покриття епіламу на вкладки шості підшипників одного ряду циліндрів. Вкладки шості підшипників іншого ряду циліндрів залишити без нанесення покриття епіламу. Наявність на судні двох дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo дозволяла одночасно використовувати під час досліджень два різних епіламу. За такі обирались епілами, які (за результатами етапів 1 та 2) забезпечували утворення біля металевій поверхні більш структурованих граничних шарів мастила. Експерименти виконувались на протязі 3200 годин. У цей час дизелі 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo працювали в широкому діапазоні навантажень – 35... 85 % від номінальної потужності. Експериментально підтверджено, що епіламування вкладки підшипників сприяє зниженню зносу вкладки підшипників на 6,1... 27,6 % та покращує їх технічний стан.

**Ключові слова:** вкладки підшипника, граничний шар мастила, експлуатація судових дизелів, крайовий кут змочування, морський транспорт, моторне мастило, органічні покриття, процес мащення, система мащення, судовий дизель, технічний стан

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Суднові двигуни внутрішнього згорання відносяться до найпоширенішого типу теплових двигунів, що використовуються в енергетичних установках суден морського та внутрішнього водного транспорту [1-3]. Вони використовуються для перетворення кінетичної енергії газів, які утворюються в їхньому циліндрі під час згорання палива, в крутний момент на валу та далі в корисну роботу [4-6]. Функціонування та експлуатаційну надійність двигунів внутрішнього згорання забезпечують різні системи. Основними є паливна, мащення, охолодження, пускового повітря, випуску газів. Дані системи забезпечують процес згорання палива та випуску продуктів згорання, а також режими мащення та охолодження основних деталей дизеля [7-9].

Система мащення, яка для судових дизелів може бути лубрикаторною або циркуляційною, забезпечує подачу мастильного матеріалу до основних контактних пар дизеля: поршневе кільце – циліндрова втулка, а також вкладки підшипника – колінчастий вал [10, 12]. Малообертові судові дизелі, які працюють за двотактним циклом, комплектуються двома системами мащення. При цьому лубрикаторна система забезпечує подачу мастила на дзеркало циліндрової втулки дизеля, циркуляційна – мащення рамового, мотильового та крейцкопфного підшипників, шестерної або ланцюгової передачі,

а також охолодження поршня. У кожній із систем використовується свій сорт мастила, який відрізняється один від одного експлуатаційними характеристиками (насамперед лужним числом, в'язкістю та температурою спалаху) [13-15].

Суднові дизелі, робота яких відбувається за чотиритактним циклом, мають одну загальну систему мащення і використовують один сорт мастила. Подача мастильного матеріалу до підшипників цих дизелів забезпечується циркуляційною системою мащення. При цьому мастило за спеціальним свердлінням у колінчастому валу надходить на мащення рамового та мотильового підшипників, а за свердлінням у шатуні – на мащення головного підшипника [14, 15]. Мащення циліндрової втулки у такому разі забезпечується за допомогою розбризкування мастила з картера дизеля (рис. 1).

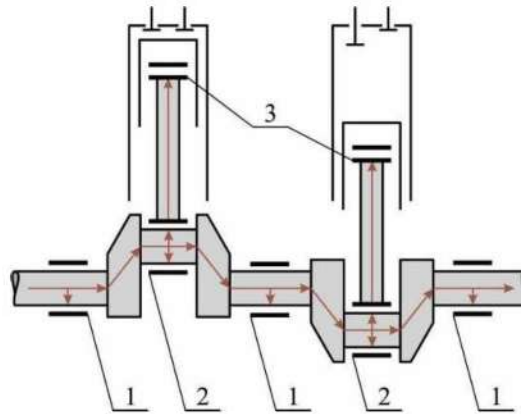


Рисунок 1 – Забезпечення подачі мастильного матеріалу до підшипників суднового чотиритактного дизеля за допомогою циркуляційної системи мащення:

1, 2, 3 – рамовий, мотильовий, головний підшипники відповідно

Мастило, яке знаходиться у поєднанні вкладиш підшипника – вал дизеля, забезпечує гідравлічну щільність та запобігає безпосередньому контакту цієї пари тертя. Збільшенню гідравлічної щільності сприяють сили поверхневого натягу, що виникають на поверхні мастильної плівки при контакті з повітряною фазою [16, 17]. Розмір цих сил пропорційна значенню крайових кутів змочування  $\theta$  (рис. 2).

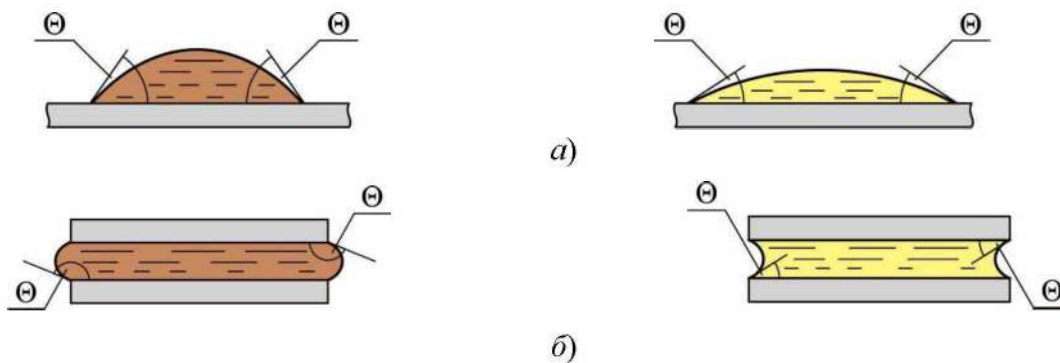


Рисунок 2 – Вплив крайових кутів змочування  $\theta$  на формування мастильного шару:  
а – на відкритій поверхні; б – всередині пари тертя

Збільшення крайових кутів змочування як на відкритій поверхні (на межі фаз метал-мастило-повітря), так і всередині пари тертя (на межі фаз метал-мастило-метал) сприяє підвищенню сили поверхневого натягу, зменшенню витоків мастила, підвищенню несучої здатності мастильного шару [18, 19]. Все це позитивно впливає на технічний стан вкладишів підшипників. Підвищення витоків у поєднанні вкладиш-вал зменшує демпфуючі властивості мастила, що може призвести до підвищеного зносу вкладишів підшипників і збільшення витрати мастила на вигар [20, 21]. Крім того, при цьому (через збільшення сили тертя між поверхнями, що вступають у безпосередній контакт), збільшуються механічні втрати, а також знижується ефективна потужність дизеля. Поступово це сприяє погіршенню

технічного стану поверхонь підшипників, що може стати однією з причин виникнення аварійної ситуації [22-25].

Таким чином, підтримка технічного стану вкладишів підшипників суднових дизелів (який може бути забезпечений за рахунок збільшення крайових кутів змочування масляної плівки) є актуальним науково-прикладним завданням. Її рішення сприяє зниженню механічних втрат, а також динамічних та теплових навантажень на основні деталі дизеля.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підтримка технічного стану вкладишів підшипників суднових дизелів [26-28] (як і ряду контактних поверхонь інших машин і механізмів [29-31]) можливе шляхом спеціальної механічної або фізичної обробки поверхонь [32-34], додаванням поверхнево активних речовин у мастило них покриттів [35-37].

Одним з поширених типів антифрикційних покриттів є епілами – полімерні речовини, що містять фтор, які наносяться на металеві поверхні. Під час нанесення епіламів на поверхні металу утворюється плівка завтовшки до 30 нм, яка не впливає на дислокаційну структуру та твердість металу. Її поверхнева енергія залежить від виду епіламу і залежить від металу, який вона наноситься [38-40].

Адгезійні сили сприяють утримання шару антифрикційного покриття на металевій поверхні [41-43]. Саме цей шар забезпечує зменшення контактних взаємодій у трибологічних системах. Визначення адгезійних сил нанопокриттів можливе у різний спосіб: дряпанням, нормального відриву, ультразвукової вібрації [44-46]. Основна функція епіламованого шару полягає в утриманні мастильного матеріалу в зоні тертя енергетичним бар'єром на межі «метал – епілам» [47-49]. Це досягається за рахунок збільшення крайових кутів змочування мастила  $\theta$ , яка знаходиться біля поверхні металу, покритого шаром епіламу (рис. 3), а також за рахунок переспрямованості вектора дії сили поверхневого натягу мастила.

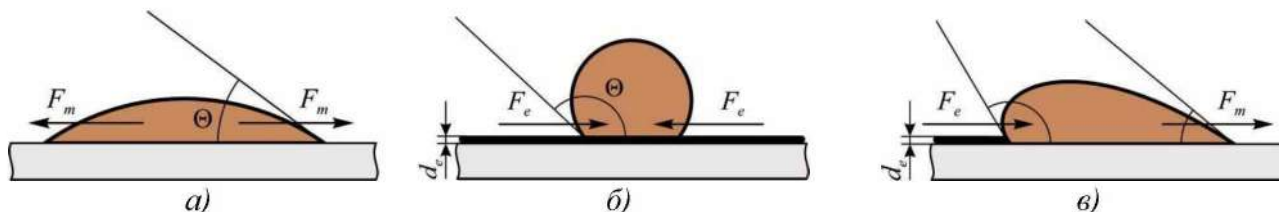


Рисунок 3 – Крайовий кут змочування та напрям дії вектора сили поверхневого натягу рідини: а – мастило на поверхні металу; б – мастило на поверхні епіламу; в – мастило на межі метал – епілам;  $\theta$  – крайовий кут змочування;  $F_m$ ,  $F_e$  – сили поверхневого натягу на металі та епіламі, відповідно;  $d_e$  – товщина адсорбованого шару епіламу

Нанесення епіламів сприяє утворенню на металевій поверхні граничних мастильних шарів підвищеної (порівняно з поверхнею, на яку не наноситься шар епіламу) товщини. Схема утворення граничних шарів в разі нанесення на металеву поверхню епіламів показано на рис. 4.



Рисунок 4 – Зміна товщини граничного шару мастила для різного стану металевій поверхні: а – без нанесення на поверхню шару епіламу; б – з нанесенням на поверхню шару епіламу;  $d_s$  – товщина граничного шару мастила;  $d_e$  – товщина адсорбованого шару епіламу

**Формулювання цілей статті.** З огляду на викладене метою дослідження було визначення впливу антифрикційних покриттів на забезпечення процесів мащення підшипникових вузлів суднових дизелів.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження виконувались в науковій лабораторії та під час експлуатації суднових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo. В науковій лабораторії визначались структурні характеристики тонких нанопокриттів епіламів, що наносились на металеву поверхню, а також структурні характеристики граничних шарів мастила, що утворювались на цих поверхнях.

Завданням досліджень, що виконувались на суднових дизелях 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo, було визначення технічного стану вкладишів їхніх підшипників ковзання, на несучу поверхню частини з яких було попередньо нанесене покриття шару епіламу.

Завданням першого етапу дослідження було визначення впливу нанесення епіламів на утворення граничного шару мастила на металевій поверхні.

Під час дослідження використовувались епілами Aqualin, Efren-K, Polisam-20. Поверхнево-активним компонентом всіх епіламів був фторований вуглець. Відповідно до характеристик виробника, вказані епілами утворюють на металевій поверхні тонкий шар завтовшки 10...50 нм та характеризуються температурною стійкістю 250...300 °С з можливістю сприймати короточасні миттєві температурні навантаження до 600 °С.

Нанесення вказаних епіламів на металеву поверхню (характеристики якої збігались з характеристиками поверхні вкладишів підшипників дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo) виконувалось шляхом їхнього попереднього розчинення в хладону.

Визначення товщини шару епіламу  $d_e$ , адсорбованого на металевій поверхні, а також визначення структурних характеристик граничних мастильних шарів (товщини шару  $d_s$  та крайового кута змочування  $\theta$ ) виконувалось за допомогою спектроскопічного еліпсометра ES01 (виробник Elliptor, Китай). Еліпсометр ES01 призначений для вимірювання параметрів структури шарів (наприклад, товщини) одношарових та багатошарових наноплівочок, фізичних параметрів (таких, як показник заломлення  $n$ , коефіцієнт екстинкції  $k$  або діелектричні функції  $\epsilon_1$  та  $\epsilon_2$ ). Еліпсометр ES01 дозволяє проводити вимірювання товщини тонких адсорбованих наноплівочок у діапазоні 3...100 нм, з точністю 0,1 нм, а також виконувати визначення крайових кутів змочування в діапазоні 2...60 градусів з точністю 0,1 градуса. Крім того, він дозволяє визначити товщину шару рідини в діапазоні до 22...25 мкм з точністю 0,2 мкм.

Спочатку за допомогою еліпсометра ES01 визначалася товщина шару епіламового покриття, нанесеного на металеву поверхню. Для підвищення точності, виконувався п'ятиразовий вимір товщини адсорбованого на металевій поверхні шару епіламу для кожного часового проміжку для кожного з епіламів. Після цього визначалася середня від отриманих значень величина адсорбованої товщини шару епіламів. Значення середньої товщини шару епіламів Aqualin, Efren-K, Polisam-20, а також діапазон отриманих при вимірюванні значень наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати визначення адсорбованої товщини шару епіламів  
*Aqualin, Efren-K, Polisam-20*

| Тривалість процесу нанесення епіламу, $t$ , хв | Середня товщина шару епіламу, $h$ , та діапазон її зміни, нм |                     |                     |
|--|--|---------------------|---------------------|
|  | Епілам № 1   | Епілам № 2          | Епілам № 3          |
| 2  | 4,78 (4,0...5,4)   | 7,72 (7,0...8,4)    | 9,1 (8,3...9,8)     |
| 4  | 9,28 (8,6...9,9)   | 12,28 (11,6...12,9) | 13,2 (12,6...13,8)  |
| 6  | 10,30 (9,8...10,8)   | 16,62 (16,0...17,3) | 14,68 (14,1...15,3) |
| 8  | 10,70 (10,3...11,0)  | 17,18 (16,7...17,6) | 14,90 (14,4...15,4) |
| 10   | 11,22 (10,9...11,4)  | 17,38 (17,0...17,7) | 15,20 (14,8...15,6) |

Примітка: нумерація епіламів виконана в довільній формі

За результатами таблиці 1 побудовані залежності, що надані на рис. 5.

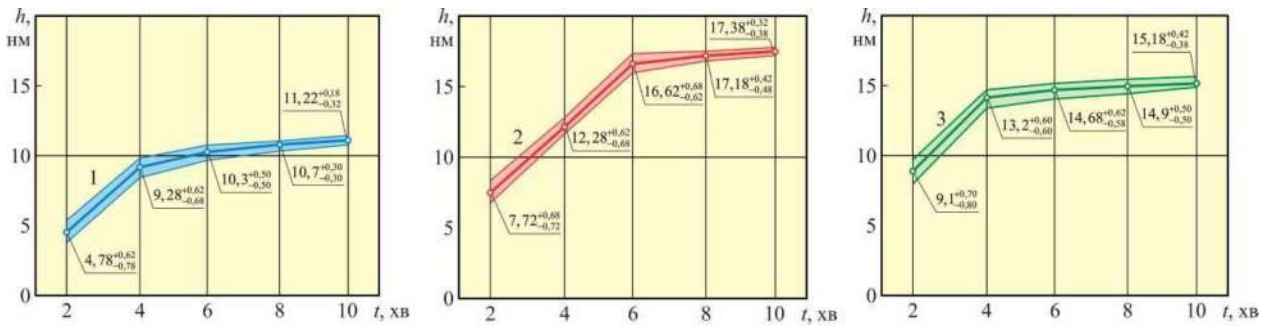


Рисунок 5 – Залежність середньої товщини адсорбованого шару епіламів *Aqualin, Efren-K, Polisam-20* від часу нанесення на металеву поверхню (нумерація епіламів виконана у довільній формі)

Результати, що наведені в таблиці 1 та на рис. 5, свідчать, що, після 6...10 хв нанесення товщина адсорбційного шару епіламу на металевій поверхні стабілізується. При цьому значення товщини адсорбційного шару епіламу для різних зразків коливається в діапазоні  $h=10,9...17,7$  нм.

Завданням другого етапу досліджень було визначення впливу епіламів на структурні характеристики граничних мастильних шарів (товщину шару  $d_s$  та крайовий кут змочування  $\theta$ ). Як мастило було обрано Castrol TLX PLUS 404. Саме це мастило використовувалося в циркуляційній системі мащення судового дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo.

За допомогою еліпсометра ES01 спочатку визначалися товщина граничного шару  $d_s$  та крайовий кут змочування  $\theta$ , утвореного на чистій металевій поверхні (без покриття епіламом). Після цього вказані характеристики визначалися для граничного мастильного шару, утвореного на поверхні з різним епіламовим покриттям. Для забезпечення необхідної точності проводилося п'ятиразове вимірювання цих показників. Після цього отримані значення усереднювалися. Середні значення товщини граничного шару  $d_s$  і крайового кута змочування  $\theta$ , а також їх діапазон зміни наведені в таблиці 2. Для кращої візуалізації, зміна товщини граничного шару  $d_s$  та крайового кута змочування  $\theta$  (а також відхилення значень від середньої величини) показані на рис. 6. При цьому під позначенням LO (lubrication oil) мається на увазі безпосередня товщина граничного шару мастила  $d_s$ , що утворюються на металевій поверхні, а також значення його крайових кутів змочування  $\theta$ . Під позначенням 1, 2, 3 – товщина граничного шару мастила  $d_s$ , що утворюється на тій же поверхні за умовою її покритті шаром епіламу, а також значення крайових кутів змочування  $\theta$ .

Таблиця 2 – Структурні характеристики граничного шару мастила в разі нанесення на металеву поверхню шару епіламів *Aqualin, Efren-K, Polisam-20*

| Тип покриття поверхні | Структурна характеристика граничного шару мастила |   |
|-----------------------|---|---|
|                       | товщина $d_s$ , мкм                               | крайовий кут змочування $\theta$ , град |
| Без покриття          | 12,32 (12,0...12,7)                               | 10,20 (9,7...10,7)                      |
| Епілам № 1            | 15,20 (14,8...15,5)                               | 15,80 (15,4...16,2)                     |
| Епілам № 2            | 18,28 (18,0...18,5)                               | 17,38 (17,0...17,8)                     |
| Епілам № 3            | 17,18 (16,9...17,4)                               | 16,30 (16,0...16,7)                     |

Примітка: нумерація епіламів виконана в довільній формі

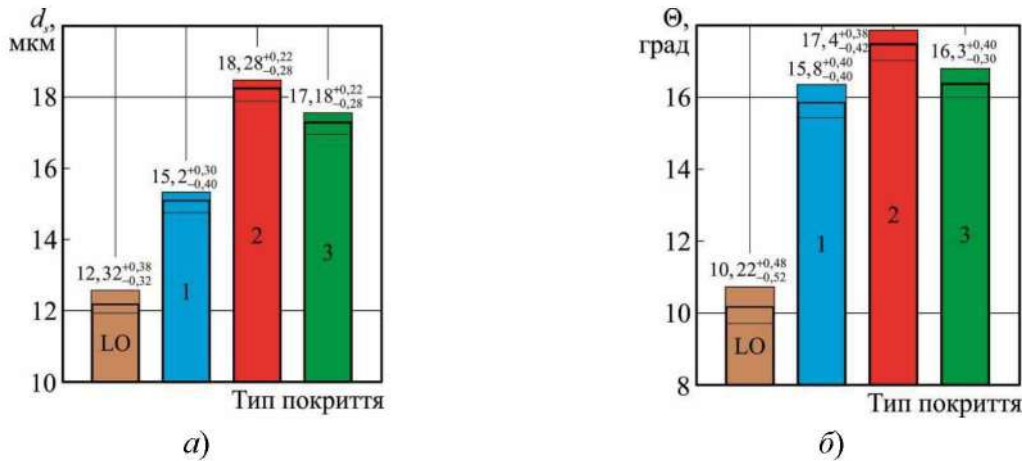


Рисунок 6 – Зміна товщини d<sub>s</sub> та крайового кута змочування θ граничного шару мастила в разі нанесення на металеву поверхню різних епіламів:

LO – відсутність покриття (безпосередня товщина граничного шару мастила або крайовий кут змочування); 1, 2, 3 – покриття епіламами Aqualin, Efren-K, Polisam-20 (нумерація епіламів виконана в довільній формі)

Як основний результат другого етапу досліджень було визначення епіламів, що забезпечують утворення біля металеві поверхні граничних шарів мастила з найбільшою товщиною та найбільшим кутом змочування. Як такі зразки були визначені епілами № 2 та № 3, нанесення яких на металеву поверхню сприяє утворенню граничних шарів мастила з товщиною 18,0...18,5 мкм та крайовими кутами змочування 17,0...17,8 град (для епіламу № 2) та товщиною 16,9...17,4 мкм та крайовими кутами змочування 16,0...16,7 град (для епіламу № 3).

Третій етап досліджень виконувався на суднових дизелях 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo, які у кількості двох входили до складу енергетичної установки судна класу Container Ship призначеного для перевезення 3780 TEU контейнерів. Принципова схема системи циркуляційного мащення дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo надана на рис. 7.

Подача мастила до циркуляційної системи мащення здійснюється мастильним насосом 1, за допомогою якого забезпечується поповнення мастильної цистерни 2 та подальше потрапляння мастила до стічної цистерни 11. подача мастила на мащення деталей дизеля 3 забезпечується циркуляційними насосами 7 або 8, при цьому мастило піддається попередньому очищенню у фільтрі грубого очищення 9 або 10. У разі необхідності охолодження мастила здійснюється в охолоджувачі 6. Перед потраплянням до дизеля мастило очищується у фільтрі грубого 5 та тонкого 4 очищення.

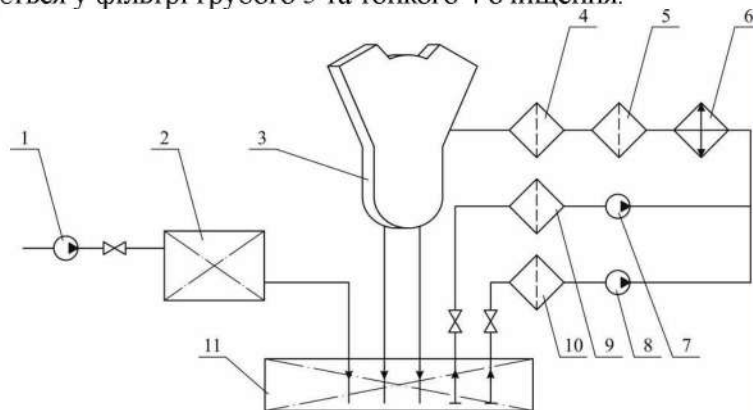


Рисунок 7 – Принципова схема системи циркуляційного мащення суднового дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo:

1 – насос, що підкачує мастило до системи мащення; 2 – цистерна циркуляційного мастила Castrol TLX PLUS 404; 3 – судновий дизель; 4 – фільтр тонкого очищення; 5, 9, 10 – фільтр грубого очищення; 6 – охолоджувач мастила; 7, 8 – циркуляційні мастильні насоси; 11 – стічна цистерна

Час експлуатації дизелів (а відповідно і час проведення досліджень) становив близько 3200 годин. У цей час дизелі 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo працювали в широкому діапазоні навантажень – 35...85 % від номінальної потужності. При цьому підтримувалися всі необхідні параметри в системах охолодження та мащення, що запобігало температурним навантаженням [50-52]. По завершенні вказано часу виконувалась оцінка технічного стану вкладишів підшипників дизелів [53-56].

V-подібна конструкція дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo дозволяла нанести покриття епіламу на вкладиші шості підшипників одного ряду циліндрів. Вкладиші шості підшипників іншого ряду циліндрів залишити без нанесення покриття епіламу. Наявність на судні двох дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo дозволяла одночасно використовувати під час досліджень два різних епіламу. За такі приймалися епілам № 2 та епілам № 3 – такі, що забезпечували найкращі структурні характеристик граничного шару мастила на поверхні вкладиша.

Початковим візуальним оглядом вкладишів підшипників було встановлено покращення технічного стану вкладишів, які були попередньо покриті шаром епіламу. При цьому цей факт було встановлено як для одного дизеля (для якого використовувався епілам № 2), також і для другого дизеля (для якого використовувався епілам № 3). Це виявлялось в різній інтенсивності зношування їх поверхонь. Знос поверхонь вкладишів (а, відповідно, і погіршення їх технічного стану), які попередньо були оброблені епіламом, спостерігався тільки в центральній частині. Саме ця частина вкладиша підшипника є найбільш навантаженою і більше піддається контактам з валом дизеля. У зв'язку з цим, знос даної ділянки вкладиша підшипника вважається стандартним і у разі допустимих значень – не критичним. Знос поверхні вкладиша, на який не наносився шар епіламу поширювався по більшій площі, а також був більш глибокий. Це свідчить про те, що в даному випадку між поверхнею вкладиша підшипника та валом відбуваються сильніші контактні взаємодії. Причиною виникнення є зменшення товщини граничного мастильного шару, а також зменшення крайових кутів змочування. Саме ці ознаки характерні у разі відсутності на поверхні вкладиша адсорбційного шару антифрикційного покриття (епілама).

Головним завданням аналізу стану вкладишів підшипників є оцінка ефективності роботи системи мащення. При цьому робляться висновки про якість моторного мастила, що використовується, а також про коректність обраних режимів мащення, охолодження та навантаження дизеля [57, 58]. Одним із найбільш точних методів визначення зміни геометрії поверхні є їхнє сканування електронним мікроскопом. На жаль, застосування подібної вимірювальної техніки поки що важко безпосередньо на морських суднах [59-61]. Це пов'язано як із вартістю таких вимірювальних приладів, також і з необхідністю наявності на судні фахівців, які здатні виконати вимірювання та їх аналіз. З іншого боку, періодичність використання електронного мікроскопа на борту морського судна дуже мала. Надсилання вкладишів або інших вузлів дизеля для визначення їх зносу методом електронного сканування пов'язане з додатковими витратами (наприклад, для дизеля 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo необхідно виконати аналіз стану двадцяти чотирьох вкладишів підшипників). Крім того, відправка деталей дизеля до дослідницької лабораторії, а також отримання результатів дослідження займає певний час. Це віддаляє час ухвалення рішення щодо ефективності роботи системи мащення дизеля.

У зв'язку з цим оцінка стану поверхонь вкладишів підшипників виконувалася шляхом вимірювання їхнього зносу. Згідно з інструкцією з експлуатації судових дизелів вага вкладишів підшипників складала 2850 г, що повністю задовольняло умови використання електронних ваг Walcom LB3002. Вимірювання ваги вкладишів підшипників дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo до їх встановлення на дизель та після експлуатаційного періоду роботи, виконувалася шляхом їх одноразового зважування. В обох випадках перед проведенням зважування вкладиші підшипників очищалися від усіх забруднень та оброблялися цетиловим спиртом C<sub>16</sub>H<sub>33</sub>OH. Результати вимірювання маси підшипників наведені в таблицях 3, 4.

Таблиця 3 – Маса вкладишів підшипників дизеля № 1, г

| № циліндра | Без покриття поверхні |                    | Покриття поверхні епіламом № 2 |                    |
|------------|-----------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|
|            | перед експлуатацією   | після експлуатації | перед експлуатацією            | після експлуатації |
| 1          | 2275                  | 2268,6             | 2278                           | 2272,4             |
| 2          | 2282                  | 2275,2             | 2281                           | 2275,3             |
| 5          | 2280                  | 2272,4             | 2283                           | 2277,1             |
| 6          | 2276                  | 2267,3             | 2277                           | 2270,7             |

Таблиця 4 – Маса вкладишів підшипників дизеля № 2, г

| № циліндра | Без покриття поверхні |                    | Покриття поверхні епіламом № 3 |                    |
|------------|-----------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|
|            | перед експлуатацією   | після експлуатації | перед експлуатацією            | після експлуатації |
| 1          | 2281                  | 2274,4             | 2277                           | 2270,8             |
| 2          | 2286                  | 2278,8             | 2283                           | 2276,4             |
| 5          | 2281                  | 2272,6             | 2281                           | 2274,2             |
| 6          | 2278                  | 2268,9             | 2277                           | 2270,0             |

Знос вкладишів підшипників (як показник, за яким виконувалася оцінка роботи системи мащення дизеля та ефективність використання епіламів) визначався як різниця їхньої маси перед експлуатацією і після експлуатації. Результати вимірювання зносу вкладишів підшипників наведені в таблиці 5.

Таблиця 5 – Знос вкладишів підшипників судових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel &amp; Turbo за різних умов експлуатації, г

| № циліндра | MAN-Diesel & Turbo № 1 |                       | MAN-Diesel & Turbo № 2 |                       |
|------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
|            | Без покриття поверхні  | Покриття епіламом № 2 | Без покриття поверхні  | Покриття епіламом № 3 |
| 1          | 6,4                    | 5,6                   | 6,6                    | 6,2                   |
| 2          | 6,8                    | 5,7                   | 7,2                    | 6,6                   |
| 5          | 7,6                    | 5,9                   | 8,4                    | 6,8                   |
| 6          | 8,7                    | 6,3                   | 9,1                    | 7,0                   |

За результатами таблиці 5 побудовано діаграми, що показані на рис. 8.

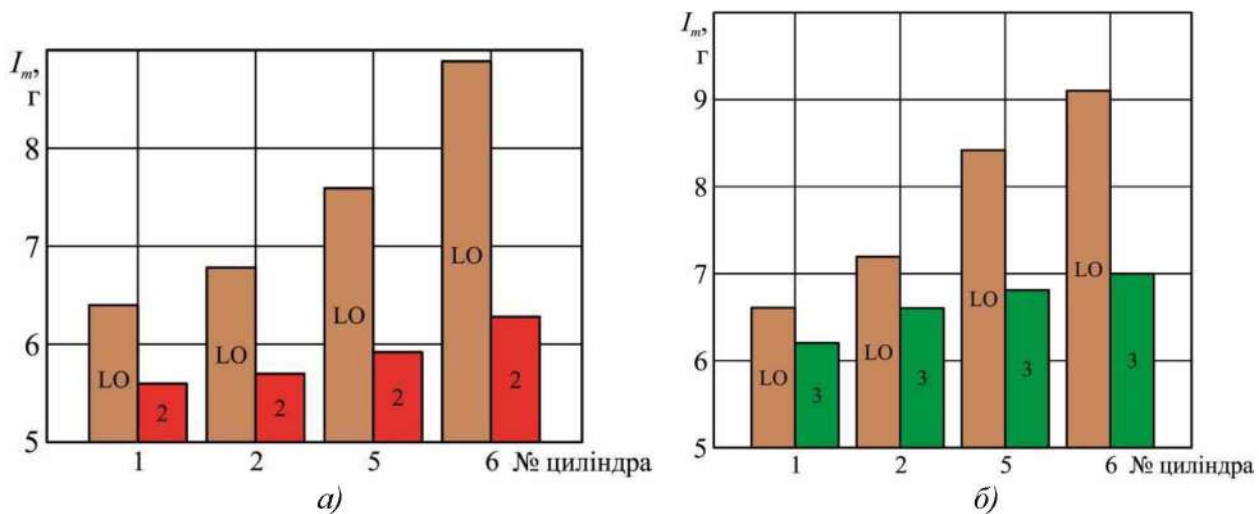


Рисунок 8 – Знос вкладишів підшипників дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo за різних умов експлуатації: а – дизель № 1, епілам № 2; б – дизель № 2, епілам № 3

Відсоткове зниження зносу у разі покриття поверхонь вкладишів різними епілами може бути оцінено за виразом:

$$\Delta I_m^i = \frac{I_m^W - I_m^E}{I_m^W} \cdot 100\%; \quad (1)$$

де  $\Delta I_m^i$  – зниження зносу вкладиша  $i$ -го підшипника, %;

$I_m^W, I_m^E$  – знос вкладиша  $i$ -го підшипника без покриття поверхні і з покриттям поверхні шаром епіламу, г.

Значення, отримані відповідно до виразу (1), для різних умов експлуатації дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo наведено у таблиці 6.

Таблиця 6 – Зниження зносу вкладишів підшипників, %, судових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo за різних умов експлуатації

| № циліндра | Дизель № 1.           | Лизель № 2.           |
|------------|-----------------------|-----------------------|
|            | Покриття епіламом № 2 | Покриття епіламом № 3 |
| 1          | 12,5                  | 6,1                   |
| 2          | 16,2                  | 8,3                   |
| 5          | 22,4                  | 19,0                  |
| 6          | 27,6                  | 23,1                  |

За результатами таблиці 6 побудовано діаграми, які відображають відсоткове зниження зносу вкладишів підшипників у разі покриття їх поверхні шаром епіламу (рис. 9).

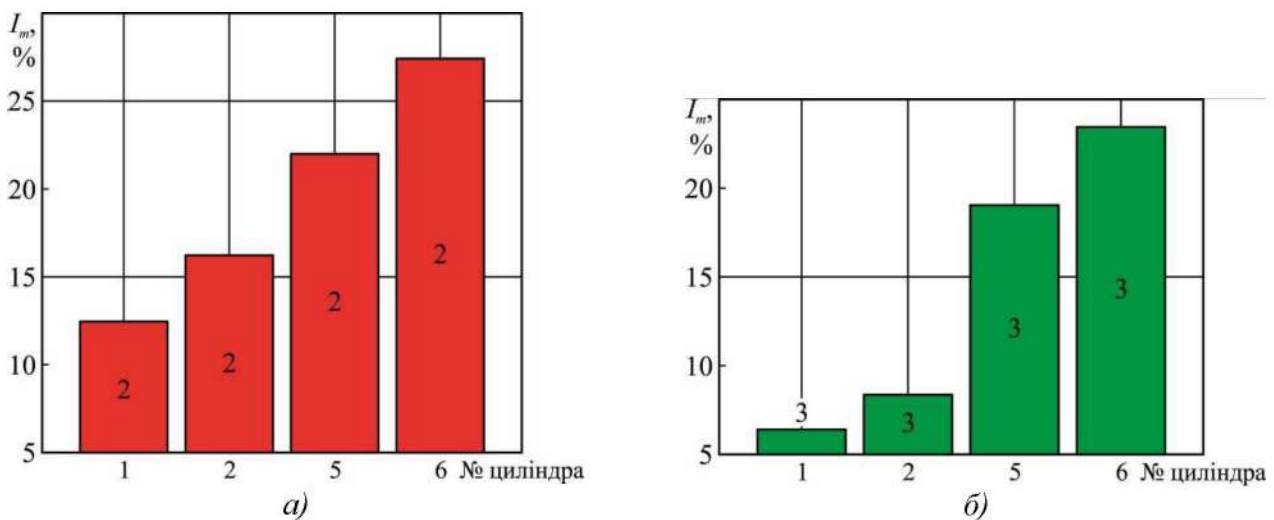


Рисунок 9 – Відсоткове зниження зносу вкладишів підшипників дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo у разі покриття їх поверхні шаром епіламу: а – дизель № 1, епілам № 2; б – дизель № 2, епілам № 3

У більшості випадків знос вкладишів підшипників для різних циліндрів відрізняється один від одного. Це пов'язано з динамічною нерівновагою, що в будь-якому разі виникає під час роботи дизеля; з різним навантаженням на циліндри дизеля через недосконалене впорскування палива, а також з різним розподіленням опору з боку споживача енергії (гвинта або електричного генератора). При цьому, як правило, більший знос вкладишів характерно для тих, які розташовані ближче саме до споживача енергії – а саме для «кормових» підшипників.

При проведенні експериментів зношування вкладиша для «кормового» підшипника (для циліндра № 6) приймалося за 1; знос інших вкладишів перераховувався за цим значенням у відносних одиницях. Результати розрахунків наведено у таблиці 7 та на рис. 10.

Таблиця 7 – Знос вкладишів підшипників суднових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo за різних умов експлуатації (відносні одиниці – від. од.)

| № циліндра | Дизель № 1   |                       | Дизель № 2   |                       |
|------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
|            | Без покриття | Покриття епіламом № 2 | Без покриття | Покриття епіламом № 3 |
| 1          | 0,736        | 0,644                 | 0,725        | 0,681                 |
| 2          | 0,782        | 0,655                 | 0,791        | 0,725                 |
| 5          | 0,874        | 0,678                 | 0,923        | 0,747                 |
| 6          | 1,0          | 0,724                 | 1,0          | 0,769                 |

За результатами таблиці 7 побудовано діаграми, що показані на рис. 10.

Всі дослідження виконувались з суворим виконанням правил технічної експлуатації, а також з міжнародних вимог щодо забезпечення безпеки людини та довкілля [62, 63].

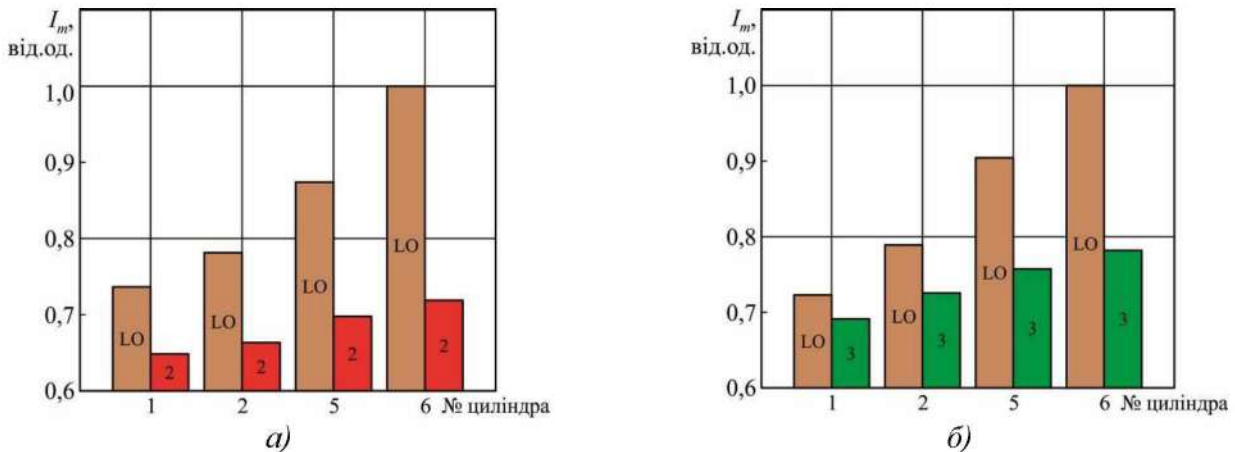


Рисунок 10 – Відносний знос вкладишів підшипників дизелів 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo за різних умов експлуатації: а – дизель № 1, епілам № 2; б – дизель № 2, епілам № 3

### Висновки.

Вкладиші підшипників ковзання відносяться до одного з найвідповідальніших вузлів суднових дизелів і забезпечують передачу поступального руху поршня в циліндрі в обертальний рух колінчатого валу. Забезпечення їх функціонування неможливе без використання мастильного матеріалу (моторного мастила), який створює мастильний шар і перешкоджає безпосередньому контакту поверхонь. Погіршення технічного стану вкладишів підшипників може призвести до підвищених механічних та теплових навантажень. Це, у свою чергу, збільшує втрати потужності на тертя та знижує ефективну потужність дизеля. Підвищення технічного стану вкладишів підшипників можливе шляхом їхньої попередньої (до експлуатаційної) обробки антифрикційними покриттями. До таких покриттів відносяться епілами – полімерні фторвмісні речовини, які наносяться на металеві поверхні. Після нанесення на металеву поверхню епілам утворює тонку плівку завтовшки кілька десятків нанометрів. Однак надалі ця плівка сприяє утворенню на її поверхні більш структурованих граничних шарів мастильного матеріалу (моторного масла). Комплекс цих взаємодій сприяє зниженню зношування поверхні вкладишів підшипника.

Нанесення епіламів на металеву поверхню можливе з хладонів. Час нанесення епіламів характеризується межею насичення, перевищення якої не збільшує товщину адсорбованого на поверхні шару. Для епіламів Aqualin, Efren-K, Polisam-20, які використовувалися під час проведення експерименту, найбільша інтенсивність утворення адсорбованої плівки відповідала початковому етапу

нанесення. При цьому в період перших 2...4 хв нанесення утворювалася плівка, товщина якої становила 74...88 % від повної товщини адсорбованого за весь період нанесення шару епіламу. За період 8...10 хв інтенсивність збільшення товщини адсорбованого шару знижується. Перевищення часу нанесення епіламу вище 10 хв. практично не впливає на товщину адсорбованого шару.

Збільшення дальнодіючих поверхневих сил (чому сприяє нанесення епіламу) підвищує структурну впорядкованість граничного шару мастила, утвореного на металевій поверхні. В даному випадку – товщину граничного шару мастила на поверхні вкладиша підшипника та крайового кута змочування. При цьому підвищуються пружнодемпфуючі властивості мастил, що є однією з причин подальшого зменшення зносу контактних поверхонь. Експериментально підтверджено, що епіламування вкладишів підшипників сприяє 1,23...1,48 кратному підвищенню товщини граничного шару та 1,55...1,70 кратному підвищенню крайових кутів змочування, що надалі сприяє зниженню зносу вкладишів підшипників на 6,1...27,6 % та покращує їх технічний стан.

## ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
3. Sagin S.V., Madey V.V., Stoliaryk T.A. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5(2(61)). – P. 26–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.
4. 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.
5. 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” - 2020 – P. 195–202. DOI: 10.34660/INF.2020.4.52991.
6. Zablotskiy 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.
7. Levinskiy M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2023. – Вып. 28. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
8. Sagin S.V., Zablotskiy Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // Water transport. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
9. Levinskiy M.V., Levinskiy V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // Automation of ship technical facilities. – 2020. – Вып. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
8. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
9. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.

10. Сагин С. В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
11. Сагин С.В., 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.
12. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.
13. Petrychenko O.O., Levynskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
14. 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>.
15. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
16. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78-88. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
17. 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.
18. 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.
19. Zablotskyi 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.
20. Petrychenko O., Levynskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
20. Petrychenko O., Levynskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
21. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // Water transport. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
21. Сагин С.С., Сагин С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
22. 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.
23. Сагин С.В., Сагин 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.
24. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

25. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
26. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. 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.
27. 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.
28. Petrychenko O., Levynskiy M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport systems and technologies. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
29. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 132-142.
30. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
31. 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.
32. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
33. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.
34. 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.
35. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
36. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи судових середньообертових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
37. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants/ – 2025. № 13. – P. 146. https://doi.org/10.3390/lubricants13040146.
38. 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.
39. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V., Gaichenia O.V. Supplying of marine diesel engine ecological parameters // Naše more: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – № 69(1). – P. 53–61. DOI: 10.17818/NM/2022/1.7.
40. 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.

41. 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.
42. 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). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
42. Сагін С.С., Сагін С.В. 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.
43. 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.
44. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
44. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
45. 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>.
46. Gorb S., Levynskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
46. Gorb S., Levynskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
47. 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>.
48. Sagin S.V., Karianskyi S.A., Madey V.A., Sagin A.S., Stoliaryk T.A., Tkachenko I.V. impact of biofuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Journal of Maritime Science and Engineering*. – 2023. – № 11(1). – P. 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.
49. 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.
50. 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.
51. 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>.
52. Sagin S.V., Madey V.A., Sagin A.S., Stoliaryk T.A., Fomin O.F., Kučera P.I. Ensuring reliable and safe operation of trunk diesel engines of marine transport vessels // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – № 10(10). – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
53. 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”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
54. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
55. 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.

56. 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.
57. 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.
58. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
59. 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.
60. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 187-197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
61. Куропятник А.А., Сагін С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник, 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
62. 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. –2019.– P. 146–153. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36259.
63. 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”. –2020.– P. 154–160. DOI: 10.34660/INF.2020.24.53689.

## REFERENCES

1. 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.
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., Madey V.V., Stoliaryk T.A. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5(2(61)). – P. 26–32. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698.
4. 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.
5. 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” - 2020 – P. 195–202. DOI: 10.34660/INF.2020.4.52991.
6. Zablotskyi 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.
7. 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
8. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // Water transport. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.

9. Levynskiy M.V., Levynskiy V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // Automation of ship technical facilities. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
10. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2018. – № 4(57). – P. 109–120.
11. 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.
12. 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.
13. Petrychenko O.O., Levynskiy M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
14. 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>.
15. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
16. Sagin S.V., Zablotsky 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Petrychenko O., Levynskiy M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
21. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // Water transport. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
22. 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.
23. 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.
24. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // Water transport. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
25. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // Water transport. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
26. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Ship power plants. – 2022. – № 45. – P. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
27. 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.

28. Petrychenko O., Levynskiy M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport systems and technologies*. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
29. Sagin S.V. Reduction of energy losses in precision steam fuel equipment of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2018. – № 38. – P. 132–142.
30. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
31. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
32. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.
33. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
34. 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.
35. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
36. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V., Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
37. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants* / – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
38. 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.
39. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V., Gaichenia O.V. Supplying of marine diesel engine ecological parameters // *Naše more: International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – № 69(1). – P. 53–61. DOI: 10.17818/NM/2022/1.7.
40. 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.
41. 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.
42. 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). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
43. 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.
44. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
45. 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>.
46. Gorb S., Levynskiy M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.

47. 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>.
48. Sagin S.V., Karianskyi S.A., Madey V.A., Sagin A.S., Stoliaryk T.A., Tkachenko I.V. impact of biofuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Journal of Maritime Science and Engineering.* – 2023. – № 11(1). – P. 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.
49. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants.* – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
50. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10).
51. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13).
52. Sagin S.V., Madey V.A., Sagin A.S., Stoliaryk T.A., Fomin O.F., Kučera P.I. Ensuring reliable and safe operation of trunk diesel engines of marine transport vessels // *Journal of Marine Science and Engineering.* – 2022. – № 10(10). – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
53. 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”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
54. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal.* – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
55. 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](https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131).
56. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21).
57. 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.
58. 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.
59. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22).
60. 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). – P. 187–197. [doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19).
61. 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.
62. 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.* –2019.– P. 146–153. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36259.
63. 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”.* –2020.– P. 154–160. DOI: 10.34660/INF.2020.24.53689.

*Sagin S.V., Zablotskiy Y.V. Sagin A.S.*

**RESEARCH ON THE INFLUENCE OF ORGANIC NANOCOATINGS ON ENSURING LUBRICATION PROCESSES OF BEARING ASSEMBLIES OF MARINE DIESEL ENGINES**

*The results of research on determining the influence of organic nanocoatings on ensuring the lubrication processes of bearing assemblies of marine diesel engines are presented. Experimental studies consisted of three stages. In the first and second, which were carried out in the research laboratory, the thickness of the adsorbed layer of various epilams on the metal surface was determined, as well as the thickness and edge wetting angles of the boundary layer of the lubricant formed on the metal surface under such conditions. The thickness of the adsorbed epilam layer, as well as the characteristics of the structured boundary layer of the lubricant were determined using an ellipsometric setup. It was found that with an epilam process duration of up to 10 minutes, an adsorbed epilam layer with a thickness of 10.9...17.7 nm is formed on the metal surface. This (for different epilams) contributes to an increase in the thickness of the boundary layer of the lubricant from values of 12.0...12.7 microns to 14.8...18.0 microns and an increase in the contact angle from values of 9.7...10.7 degrees to 15.4...17.8 degrees, which indicates an increase in the structural order of the lubricant near the metal surface. The third stage of research was carried out on two identical 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo marine diesel engines, which were part of the power plant of a Container Ship class vessel designed to transport 3780 TEU containers. The V-shaped design of the 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo diesel engine allowed applying an epilam coating to the liners of the sixth bearings of one row of cylinders. The liners of the sixth bearings of the other row of cylinders were left without applying an epilam coating. The presence of two 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo diesel engines on the vessel allowed the simultaneous use of two different epilams during the research. Epilams were selected, which (according to the results of stages 1 and 2) ensured the formation of more structured boundary layers of lubricant near the metal surface. The experiments were carried out for 3200 hours. During this time, the 12V32/40 MAN-Diesel & Turbo diesel engines operated in a wide range of loads - 35...85% of the nominal power. It was experimentally confirmed that epilaming of bearing liners contributes to reducing the wear of bearing liners by 6.1...27.6% and improves their technical condition.*

**Keywords:** bearing liner, boundary layer of lubricant, operation of marine diesel engines, marginal wetting angle, maritime transport, motor oil, organic coatings, lubrication process, lubrication system, marine diesel, technical condition

*Стаття прийнята 21.03.2025*

© Пізінцалі Л.В., Россомаха О.І.,  
Россомаха О.А., Шахов В.І.

## СУДНОВА УТИЛІЗАЦІЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПОДОЛАННЯ ДЕФІЦИТУ МЕТАЛОБРУХТУ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ

*У дослідженні висвітлюється критична ситуація в металургійній галузі України, яка характеризується значним падінням виробництва сталі (до 80 % порівняно з 2013 роком) та гострим дефіцитом металобрухту (20 - 40 %). Розглядається потенціал розвитку галузі утилізації суден як альтернативного джерела металобрухту, з оціненими загальними запасами 0,8 - 1,2 млн т.*

*Аналізуються конкурентні переваги України в цій сфері, включаючи нижчі витрати на енергоносії та робочу силу порівняно з країнами ЄС, а також наявність відповідної інфраструктури. Водночас відзначаються основні перешкоди розвитку галузі: адміністративні бар'єри, технічні обмеження та кадрові проблеми.*

*Дослідження містить прогнози розвитку галузі на 2025 рік та пропонує комплекс рекомендацій для державних органів, галузевих асоціацій та підприємств щодо подолання існуючих викликів та реалізації потенціалу галузі утилізації суден як важливого елементу відновлення української економіки.*

*Ключові слова: металургійна галузь, утилізація суден, металобрухт, судноремонтна галузь, промислова модернізація, металопереробка.*

**Актуальність дослідження** визначається критичним станом металургійної галузі України, яка протягом останніх років зазнала значних трансформацій та викликів. З початком повномасштабного вторгнення ситуація суттєво погіршилась – порівняно з 2013 роком Україна втратила близько 80 % обсягу виробництва сталі. При цьому найбільша частка цього падіння припала саме на 2022 рік, коли було втрачено контроль над ключовими металургійними активами в Маріуполі. В умовах, що склалися, пошук нових джерел металобрухту та розвиток альтернативних напрямків металопереробки стає стратегічним завданням для галузі.

Особливої актуальності набуває дослідження потенціалу утилізації морських суден як додаткового джерела металобрухту, враховуючи, що поточний рівень його дефіциту складає близько 20 %. Ця проблема посилюється тим, що традиційні джерела постачання металобрухту, такі як залізниця та промислові підприємства, значно скоротили обсяги через військові дії. Крім того, експортні обмеження та логістичні проблеми створюють додатковий тиск на галузь, що робить пошук нових джерел металобрухту критично важливим для збереження металургійного виробництва в Україні.

**Методологія дослідження** базується на комплексному підході з використанням методів статистичного аналізу, порівняльного аналізу, економічного моделювання та експертних оцінок. В ході дослідження були проаналізовані статистичні дані щодо обсягів виробництва сталі за період 2013 – 2024 років, детальні показники ринку металобрухту, включаючи динаміку цін, обсяги заготівлі та споживання. Особливу увагу автори приділили аналізу даних щодо утилізації суден в Україні та світі, включаючи технічні аспекти процесу, економічні показники та екологічні вимоги.

Проведено глибокий порівняльний аналіз конкурентних позицій України в басейні Чорного моря, зокрема порівняно з такими країнами як Туреччина, Болгарія та Румунія. Аналіз включав оцінку вартості робочої сили, енергоресурсів, логістичних витрат та регуляторних вимог. Автори використали експертні оцінки провідних фахівців галузі щодо потенціалу розвитку суднової утилізації та можливих перешкод, включаючи технічні, економічні та адміністративні аспекти.

**Результати дослідження** показали, що металургійна галузь України стикається з комплексом серйозних викликів. На сьогодні рівень дефіциту металобрухту коливається в межах 20 %, що змушує підприємства збільшувати витрати чавуну в мартенівських і конвертерних печах, що призводить до зростання собівартості продукції та зниження конкурентоспроможності українських виробників. Різниця між внутрішніми та європейськими цінами на брухт становить \$ 160 - 180 за тону, при цьому рівень цін СРТ в Україні складає \$ 200 – 210 / т, тоді як у Євросоюзі - \$ 360 – 380 / т.

Дослідження структури українського морського флоту показало, що майже весь український морський та річковий флот складається із суден малої водотоннажності: баржі, буксири, пасажирські та спеціальні плавзасоби. Більшість державного флоту – морально та фізично застарілі судна, які давно вичерпали свій ресурс експлуатації. Близько 90 % нових плавзасобів належать приватним власникам. Вантажні судна, що ходять під українським прапором, мають середній вік близько 40 років, при цьому 20 % (17 одиниць) мають вік понад 50 років, найстарішому – 63 роки. Загалом понад нормативний термін експлуатується понад 90 % загальної кількості суден.

Аналіз потенціалу розвитку галузі утилізації суден показав, що загальні доступні запаси суднового металобрухту оцінюються в 0,8 - 1,2 млн т. Щорічно в Україні переробляють на металобрухт близько 10 - 15 суден середньої та малої водотоннажності. Собівартість товарного металобрухту від утилізації суден великої водотоннажності становить \$ 250 – 280 / т, для суден малої водотоннажності – \$ 180 – 220 / т, при цьому додаткові витрати на переробку та логістику складають 25 – 30 % від собівартості.

Автори виділяють основні перешкоди розвитку галузі: складні процедури отримання дозволів, високі корупційні ризики, відсутність чіткої нормативної бази, дефіцит спеціалізованого обладнання, застаріла інфраструктура, брак сучасних технологій переробки, нестача кваліфікованих фахівців. Особливо гострою є проблема відсутності спеціалізованого обладнання для підйому затонулих суден та їх подальшої утилізації.

Важливим результатом дослідження стало виявлення конкурентних переваг України в сегменті утилізації суден у басейні Чорного моря. Хоча Туреччина залишається беззаперечним лідером у цій галузі, Україна має потенціал конкурувати з Болгарією та Румунією завдяки нижчим витратам на енергоносії та робочу силу. Крім того, наявність розвиненої мережі судноремонтних заводів створює додаткові можливості для розвитку галузі.

Прогнозні показники на 2025 рік, з урахуванням усіх факторів впливу, вказують на можливість досягнення наступних параметрів: виробництво сталі – 6,5 - 6,8 млн т, заготівля металобрухту – 1,45 - 1,65 млн т, внутрішнє споживання брухту – 1,1 - 1,2 млн т, експорт – до 350 тис т. Ці прогнози враховують як поточну геополітичну ситуацію, так і глобальні тенденції розвитку металургійної галузі.

**Висновки та рекомендації.** На основі проведеного дослідження автори роблять висновок, що утилізація суден є перспективним напрямком розвитку для української промисловості, що може частково вирішити проблему дефіциту металобрухту. Україна має значні конкурентні переваги в цій галузі, особливо в басейні Чорного моря, включаючи нижчі витрати на енергоносії порівняно з країнами ЄС, меншу вартість трудових ресурсів та наявність розвиненої інфраструктури судноремонтних заводів.

Для успішного розвитку галузі необхідне впровадження комплексу заходів на різних рівнях. На державному рівні необхідно розробити програму підтримки суднопереробної галузі, створити систему податкових стимулів, спростити процедури отримання дозволів та забезпечити захист інвестицій. Особливу увагу слід приділити створенню прозорої та ефективної системи екологічного контролю, яка б відповідала міжнародним стандартам.

На галузевому рівні важливо зосередитись на модернізації технічної бази, впровадженні сучасних технологій та розвитку системи підготовки кадрів. Існує необхідність розробки галузевих стандартів утилізації суден, які б враховували як економічні, так і екологічні аспекти. Важливим напрямком є, також, розвиток міжнародної співпраці, особливо з країнами ЄС, для обміну досвідом та залучення передових технологій.

На рівні підприємств рекомендується інвестувати в оновлення обладнання, розвивати співпрацю з науковими установами та впроваджувати екологічні стандарти. Особливу увагу слід приділити

підвищенню енергоефективності виробництва та впровадженню сучасних методів управління відходами.

Розвиток галузі сприятиме не лише зменшенню дефіциту металобрухту, але й створенню нових робочих місць, технологічній модернізації та покращенню екологічної ситуації в приморських регіонах.

Таким чином, розвиток галузі утилізації суден може стати важливим елементом відновлення української економіки та зміцнення її конкурентних позицій на міжнародному ринку. Особливо важливим це є в контексті післявоєнної відбудови України та необхідності модернізації промислового потенціалу країни.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Заготівля металобрухту в Україні у 2024 році ...[Електронний ресурс]. – URL: <https://gmk.center/news/> (дата звернення 27.01.2025).
2. Проблеми та перспективи розвитку стратегічних ...Національний інститут стратегічних досліджень [Електронний ресурс]. – URL: <https://niss.gov.ua/news/komentari-ekspertiv/problemy-ta-perspektyvy-rozvytku-stratehichnykh-haluzey-promyslovosti> (дата звернення 31.01.2025).
3. Мазур В.Л., Тимошенко М.В., Мазур С.В. Проблеми регулювання ринку брухту чорних металів в Україні. Економіка України. 2014. № 11. С. 39 – 50.
4. Гнагуш В.А. Світові тенденції ринку вторинної переробки відходів та брухту алюмінієвих сплавів. Процеси лиття. 2020. № 3. С. 56 – 69.
5. Гужва І.Ю. Механізми обмеження експорту брухту чорних металів у рамках СОТ. Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія : Міжнародні економічні відносини та світове господарство. 2016. Вип. 6 (1). С. 67 –70.
6. Пізінцалі Л.В., Александровська Н.І., Кошарська Л.В. Передумови розвитку системи утилізації брухту в Україні на прикладі залізничного та морського транспорту // Сборник научных трудов ДониЖТ. – 2014. – № 37. – С. 157–162.
7. Пізінцалі Л.В., Александровська Н.І., Варбанець Р.А. Вибір технологічного процесу утилізації корпусу судна методом експертних оцінок // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2015. – № 1. – С. 14–20.
8. Пізінцалі Л.В. Доцільність створення утилізаційного підприємства на базі судноремонтного заводу // Вісник ОНМУ. – 2015. – Вип. 4 (46). – С. 170–183.
9. Пізінцалі Л.В. Підготовка «зеленого паспорту» як процедури міжнародних вимог до організації підприємств з утилізації суден // Вісник ОНМУ. – 2015. – Вип. 2 (44). – С. 177–185.
10. Пізінцалі Л.В. Україна – проблеми утилізації суден // East European Scientific Journal. – 2016. – № 8. – С. 100 – 104.
11. Савич О.С., Дудніченко К.В. Правове регулювання утилізації суден // Прикарпатський юридичний вісник. – 2020. – № 5(34). – С. 160–165. – URL: <https://www.umba.org.ua/newsroom/articles/article13.htm> (дата звернення: 28.11.2024).
12. Іщук С.О., Созанський Л.Й. Структурні показники переробної промисловості України і держав-членів ЄС: порівняльна оцінка. Економіка промисловості. 2018. № 1 (81). С. 44-60. doi: 10.15407/econindustry2018.01.044.
13. Україна наростила виробництво сталі – «плюс 23% до показників минулого року... [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3936004-obsagi-virobnictva-stali-v-ukraini-vze-perevisili-sim-miljoniv-tonn.html> (дата звернення: 31.01.2025).
14. Ціни на світовому ринку сталі та сировини знизилися [Електронний ресурс]. – URL: <https://gmk.center/ua/posts/tsiny-na-svitovomu-rynku-stali-ta-syrovyny-pishly-vnyz/>. (дата звернення: 01.02.2025).
15. Заготівля брухту в Україні може сягнути 1,8 млн т у 2024 році [Електронний ресурс]. – URL: <https://gmk.center/opinion/zagotovka-metalloloma-v-ukraine-mozhet-dostignut-1-8-mln-t-v-2024-godu/> (дата звернення: 02.02.2025).
16. Перспективи металургії України у 2025 році [Електронний ресурс]. – URL: <https://gmk.center/ua/posts/perspektyvy-metallurhii-ukrainy-u-2025-rotsi/> (дата звернення: 02.02.2025).

17. За роки незалежності український флот скоротився у 16 разів [Електронний ресурс]. – URL: <https://gmk.center/ua/opinion/za-roki-nezalezhnosti-ukrainskij-flot-skorotivsvya-u-16-raziv/> (дата звернення: 07.02.2025).
18. Водні ресурси: запаси суднового брухту в Україні сягають 1,2 млн <https://gmk.center/ua/posts/vodni-resursi-zapasi-sudnovogo-bruhtu-v-ukraini-syagajut-1-2-mln-t/> (дата звернення: 31.01.2025).
19. Новини України, останні новини та події [Електронний ресурс]. – URL: <http://www.segodnya.ua> (дата звернення: 28.11.2024).
20. Пізінцалі Л.В. Методологічні основи організаційно-технологічних процесів утилізації суден: монографія. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. – 308 с. – ISBN 978-966-289-488-2.

*Pizintsali L.V., Rossomakha O.I.,*

*Rossomakha O.A., Shakhov V.I.*

### **SHIP RECYCLING AS A TOOL TO OVERCOME THE SHORTAGE OF SCRAP METAL IN THE METALLURGICAL INDUSTRY OF UKRAINE**

*The study highlights the critical situation in the metallurgical industry of Ukraine, which is characterized by a significant drop in steel production (up to 80% compared to 2013) and an acute shortage of scrap metal (20-40%). The potential for the development of the ship recycling industry as an alternative source of scrap metal, with estimated total reserves of 0.8-1.2 million tons, is considered.*

*The competitive advantages of Ukraine in this area are analyzed, including lower energy and labor costs compared to EU countries, as well as the availability of appropriate infrastructure. At the same time, the main obstacles to the development of the industry are noted: administrative barriers, technical limitations, and human resources problems.*

*The study provides forecasts of the industry's development for 2025 and offers a set of recommendations for government agencies, industry associations and enterprises to overcome existing challenges and realize the potential of the ship recycling industry as an important element of the Ukrainian economic recovery.*

**Keywords:** *metallurgical industry, ship recycling, scrap metal, ship repair industry, industrial modernization, metal recycling.*

*Стаття прийнята 15.03.2025*

© Сагін С.В., Поповський О.Ю., Куропятник О.А.

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ СИСТЕМУ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ

Наведені результати досліджень щодо забезпечення швидкісних режимів роботи суднових дизелів, які використовують систему рециркуляції випускних газів. Зазначено, що систем рециркуляції випускних газів низького та високого тиску відносяться до способів, що сприяють виконанню вимог Міжнародної конвенції МАРПОЛ відносно забруднення атмосфери оксидами азоту. Зазначено, що у системах рециркуляції низького і високого тиску кількість випускних газів, що повертають до циліндра дизеля, може досягати 15...20 % від їх загального обсягу. Це призводить до погіршення процесу згоряння та зниження пікових температур в циліндрі дизеля. При цьому з одного боку зменшують кількість оксидів азоту, що утворюється під час згоряння палива, з іншого – уповільнюють процес розширення газів. Це викликає зменшення крутного моменту та ефективної потужності дизеля та призводить до необхідності збільшення циклової подачі палива. Таким чином, зменшення кількості кисню, що потрапляє до циліндру дизелю в складі газоповітряної суміші, стає причиною додаткового зовнішнього збурення на систему автоматичного регулювання його частоти обертання. Через це ціллі статті було визначення оптимальних режимів роботи системи автоматичного регулювання частоти обертання суднового дизеля під час стрибкоподібних експлуатаційних навантажень в системі рециркуляції випускних газів. Дослідження виконувались шляхом моделювання відповідних процесів рециркуляції випускних газів та регулювання частоти обертання колінчатого валу для суднового малооборотного дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel, обладнаного системою рециркуляції газів високого тиску. До системи автоматичного регулювання були включені дизель 8G60ME та регулятор, що забезпечує пропорційно-інтегральний закон регулювання. Моделювання виконувалось для трьох різних відносних навантажень 1,0; 0,75; 0,5, що відповідало 20 %, 15 % та 10 % ступеню рециркуляції випускних газів. Зміна параметрів налаштування регулятора обривалась в діапазоні: коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою (0,5...2,5) з кроком зміни 1,0; час інтегрування (0,2...1,0) с з кроком зміни 0,4 с. Це дозволили визначити оптимальні режими, за якими спостерігається перебіг перехідних процесів з найменшим часом регулювання та найменшим закидом частоти обертання.

**Ключові слова:** випускні гази, емісія оксидів азоту, збурення, критерії оптимізації, математична модель, морський транспорт, навантаження, параметри налаштування регулятора, перехідний процес, регулювання, система автоматичного регулювання частоти обертання, система рециркуляції випускних газів, судновий дизель, чисельне моделювання, швидкісний режим суднового дизеля

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Двигуні внутрішнього згоряння / дизелі займають в суднової енергетики домінуюче положення в порівнянні з іншими типами теплових двигунів – паровими котлами та газовими турбінами. Перш за все це пов'язано з найменшою питомою витратою палива та найбільшим коефіцієнтом корисної дії, що характерні саме для дизелів [1-3]. Дизелі, що встановлюються на судах морського та внутрішнього водного транспорту, виконують функції головних та допоміжних двигунів, забезпечуючи рух судна та роботу суднових систем, механізмів та обладнання [4-6]. Отримання корисної роботи та ефективної потужності в суднових дизелях неможливо без спалювання в їхніх циліндрах

рідкого палива нафтового походження [7-9]. При цьому в результаті його згоряння в атмосферу викидаються випускні гази. Більшу частину випускних газів (до 99,0...99,2 %) складають нейтральні та нетоксичні компоненти – продукти неповного згоряння (більшою частиною яких є діоксид вуглецю  $\text{CO}_2$  і водяна пара  $\text{H}_2\text{O}$ ) та повітря зі зниженим вмістом кисню [10-12]. Невелику решту зі загальної частини випускних газів складають токсичні компоненти, які поділяються на дві групи. До першої групи відносяться продукти неповного згоряння палива – монооксид вуглецю  $\text{CO}$ , вуглеводні  $\text{C}_n\text{H}_m$ , альдегіди  $\text{R-CHO}$  та сажа  $\text{C}$ . Токсичні компоненти другої групи утворюються в результаті повного окислення хімічних елементів, що входять до складу палива та повітря – це оксиди азоту  $\text{NO}_x$  та сірки  $\text{SO}_x$ . Суднові ДВЗ, що знаходяться в експлуатації, вимагають постійного пошуку ефективних способів зниження токсичності випускних газів, насамперед викидів оксидів азоту  $\text{NO}_x$  [13-15]. Вміст оксидів азоту в випускних газах регламентується вимогами Annex VI Міжнародної конвенції MARPOL та залежить від року побудови судна та частоти обертання валу дизеля (табл. 1) [16-19].

Таблиця 1 – Максимальна концентрація оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ , г/кВт-год) в випускних газах судових дизелів відповідно до вимог Annex VI MARPOL

| Рівень   | Частоти обертання валу, об/хв |                  |            |
|--|-------------------------------|------------------|------------|
|  | $n < 130$                     | $130 < n < 2000$ | $n > 2000$ |
| Tier I – для суден, збудованих після 2000 р.   | 17,0                          | $45n^{-0,2}$     | 9,8        |
| Tier II – для суден, збудованих після 2011 р.  | 14,4                          | $44n^{-0,23}$    | 7,7        |
| Tier III – для суден, збудованих після 2016 р. | 3,4                           | $9n^{-0,2}$      | 2,0        |

Забезпечення вимог Tier I, Tier II можливо шляхом додаткової підготовки палива (наприклад, його гомогенізації, ультразвукової обробки та виготовлення водопаливних емульсій) та вдосконаленням робочого циклу (наприклад, управління фазами подачі повітря, випуску газів та впорскування палива). Забезпечення вимог Tier III можливо лише через використання додаткових технічних систем та пристроїв. Найбільш розповсюдженими з них є: система очищення випускних газів – Selective Catalytic Reduction (SCR); системи рециркуляції – Exhaust Gas Recirculation (EGR); система перепуску – Exhaust Gas Wastegate (EWR) [20-22].

В разі використання системи EGR частина випускних газів повертається до циліндру дизеля. При цьому у випадку, коли випускні гази спрямовують до циліндра після газотурбонагнітача (тобто коли вони втратили більшу частину енергії та тиску на лопатках газової турбіни) системи рециркуляції називають низького тиску [23-25]. В разі, коли випускні гази повертають до циліндра ще до їхнього потрапляння на лопатки газотурбонагнітача (тобто коли вони ще характеризуються тиском, з яким виходять з випускного колектора) системи рециркуляції називають високого тиску [26-28]. Обидві системи використовуються на дизелях суден морського транспорту та встановлюється незалежно від призначення або потужності дизеля [29-32].

Переваги системи рециркуляції низького тиску:

- проста конструкція газоходів і скрубера, зважаючи на порівняно низький тиск і низьку температуру випускних газів (порівняно з системою рециркуляції високого тиску);
- низька потужність додаткового газового нагнітача, з огляду на те, що випускні гази під час рециркуляції спрямовуються не в продувний ресивер (як у системі рециркуляції високого тиску), а в компресор газотурбонагнітача.

При цьому, компоненти системи низького тиску мають більш великі геометричні розміри ніж в системі високого тиску (у зв'язку з тим, що за умовою низького тиску випускних газів пропорційно збільшується їх об'єм).

Система рециркуляції високого тиску (порівняно із системою низького тиску) відрізняється більшою компактністю – високий тиск сприяє меншому питомому об'єму випускних газів. Однак, з огляду, як на високий тиск, так і високу температуру газів, скрубера, що забезпечує їх очищення, зазнає великі температурні і гідравлічні навантаження, тому має більш складну конструкцію. Крім того, з огляду на те, що в системі рециркуляції високого тиску випускні гази надходять безпосередньо в ресивер продувного повітря, потужність газового нагнітача повинна забезпечувати такий самий високий тиск,

як і основний повітряний компресор газотурбонагнітача. Також необхідно відзначити, що висока температура випускних газів зобов'язує використовувати додатковий охолоджувач, це ускладнює конструкцію системи рециркуляції високого тиску [33-35].

У системах рециркуляції низького і високого тиску кількість випускних газів, що повертають до циліндра дизеля, може досягати 15...20 % від їх загального обсягу [36-38]. Це призводить до погіршення процесу згоряння та зниження пікових температур в циліндрі дизеля. При цьому з одного боку зменшують кількість оксидів азоту, що утворюється під час згоряння палива, з іншого – уповільнюють процес розширення газів. Це викликає зменшення крутного моменту та ефективної потужності дизеля та призводить до необхідності збільшення циклової подачі палива. Таким чином, зменшення кількості кисню, що потрапляє до циліндру дизелю в складі газоповітряної суміші, стає причиною додаткового зовнішнього збурення на систему автоматичного регулювання (САР) його частоти обертання.

Нехтування явищем зменшення крутного моменту в разі використання системи EGR може призвести до виникнення аварійних ситуацій. Особливу актуальність це набуває в разі стрибкоподібної та максимальної зміни кількості випускних газів, що повертаються в циліндр дизеля системою EGR. Саме в цих випадках спостерігається найбільше зниження крутного моменту дизелю та саме ці випадки потребують миттєвого регулювання на зміну частоти обертання дизеля.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Регулювання частоти обертання колінчатого валу судових дизелів є обов'язковою складовою їх експлуатації [39, 40].

Підтримання частоти обертання в разі зовнішніх або внутрішніх збурень може виконуватися за статичним або астатичним принципом [41, 42]. В першому випадку САР встановлює новий швидкісний режим роботи дизеля, якій може відрізнитися від попереднього. При цьому відхилення у значенні частоти обертання для нового сталого режиму від попереднього може досягати 3...5 %. В разі астатичного регулювання САР встановлює заданий швидкісний режим без будь якого відхилення частоти обертання валу дизеля. В разі статичного регулювання до складу САР включають автоматичні регулятори, що забезпечують пропорційний закон регулювання. В разі астатичного регулювання використовуються пропорційно-інтегральні регулятори. Проектування САР здійснюється для умов, в яких як зовнішні збурення очікуються зміна навантаження на гребний гвинт та корпус судна [43-45]. Ці збурення призводять до збільшення опору. Що надається з боку гребного гвинта на судовий дизель [46-47]. Одночасно з цим не враховується, таке зовнішнє збурення як збільшення кількості випускних газів, що повертаються в циліндр дизеля системою EGR. При цьому це навантаження також призводить до зменшення крутного моменту та частоти обертання дизеля [48, 49].

Підтримання частоти обертання в встановленому діапазоні значень забезпечуються САР шляхом зміни кількості палива, що подається в циліндр дизеля. Несвоєчасно реагування на зміну складу газоповітряної суміші, що спрямовується в циліндр дизеля системою EGR, може стати причиною миттєвого критичного зниження частоти обертання дизеля та його зупинки. Виникнення подібної ситуації в акваторіях інтенсивного руху (в каналах, вузькостях, прибережних районах та портах) може викликати наслідки та стати погрозою довіллю та життю людини [50-52].

**Формулювання цілей статті.** Ціллю статті є визначення оптимальних режимів роботи системи автоматичного регулювання частоти обертання судового дизеля під час стрибкоподібних експлуатаційних навантажень в системі рециркуляції випускних газів.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження виконувались на судовому малообертовому дизелі 8G60ME фірми MAN Diesel, обладнаному системою рециркуляції газів високого тиску – HP-EGR. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску судового малообертового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel надана на рис. 1.

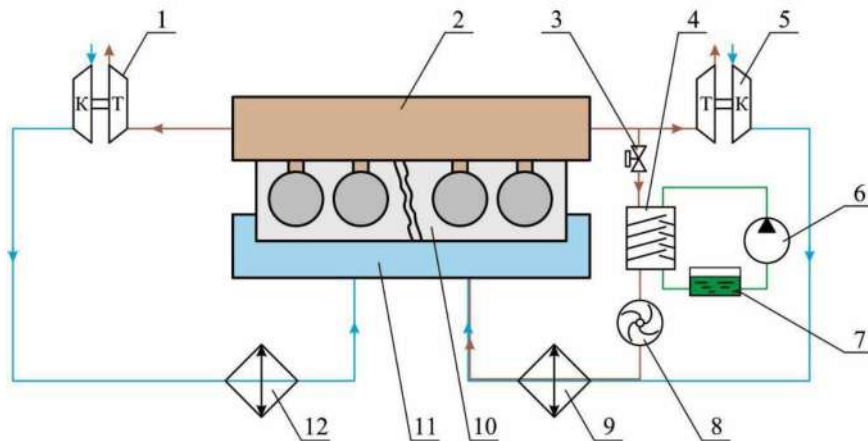


Рисунок 1 – Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску суднового малооборотового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel:

1, 5 – газотурбонагнітач; 2 – випускний колектор; 3 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів високого тиску; 4 – скруббер; 6 – насос подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів; 7 – цистерна прісної води системи очищення та охолодження випускних газів; 9, 12 – охолоджувач наддувального повітря;

10 – судновий дизель; 11 – продувний ресивер; Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітачів

Система працює в такий спосіб. Випускні гази з циліндрів дизеля 10 надходять у загальний випускний колектор 2 і далі до газотурбонагнетачів 1 і 5, після чого через газувипускную трубу видаляються в атмосферу. Газотурбонагнітачі 1 і 5 забирають повітря з машинного відділення та після стиснення спрямовують його через охолоджувачі 9 і 12 в повітряний (продувний) ресивер 11. При цьому газотурбонагнітач 5 обладнаний системою рециркуляції випускних газів високого тиску, до складу якої входять керуючий клапан 3, скруббер очищення газів 4, цистерна 7 прісної води системи очищення та охолодження випускних газів та насос 6 подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів. Під час експлуатації системи рециркуляції випускних газів високого тиску їх кількість, що повертається через систему очищення до продувного ресиверу та циліндрів дизеля, регулюється клапаном 3. Випускні гази очищуються і попередньо охолоджуються в скруббері 4, після чого додатковим нагнітачем 8 подаються на змішування з повітрям (що надходить з повітряного компресору газотурбонагнітувача 5) і далі прямують до продувного ресиверу 11. Відповідно до технічних характеристик системи EGR, що встановлена на дизелі, можливий діапазон зніми ступені рециркуляції випускних газів знаходився в межах 0...20 % та регулювався за допомогою клапана рециркуляції, встановленого у випускній магістралі (позиція 3 на рис. 1).

Як вказувалось раніше, використання системи EGR надає збурюючу дію на САР частоти обертання дизеля та призводить до відхилення частоти обертання від встановленого завдання. Для аналізу характеру дії зовнішнього навантаження на замкнену САР частоти обертання дизеля (що складається з об'єкта регулювання та автоматичного регулятора, який підключений у від'ємний зворотний зв'язок до об'єкту) було виконано чисельне моделювання та визначені оптимальні параметри налаштування регулятора. Як об'єкт регулювання був прийнятий судновий двигун (дизель), для якого головним завданням регулювання є стабілізація частоти (швидкості) обертання колінчатого валу. В зв'язку з цим вихідним сигналом об'єкту є відносне значення швидкості, де одиничному значенню відповідає номінальний режим обертання.

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

$$T \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = [\mu - \lambda(t)] \quad (1)$$

де значення характеристик об'єкту регулювання – часу розгону  $T$  та коефіцієнту підсилення  $k$  вибиралися згідно експериментальним спостереженням, навантаження (сигнал збурюючої дії) моделювалося сходинко-подібною функцією із можливістю варіювання висоти сходинки та тривалості фронту зростання (останнє значення дорівнювало 0,1 с).

В САР використався ізодромний астатичний регулятор з можливістю роздільного варіювання параметрів налаштування. Зміна з часом вихідного сигналу регулятора – відносного значення регулюючої дії визначалося як розв'язок інтегрального рівняння

$$\mu(t) = - \left[ \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t (\varphi(t') - v) \cdot dt' + k_p \cdot \varphi(t) \right], \quad (2)$$

де  $v$  – значення уставки регулятора.

Система інтегрально-диференціальних рівнянь розв'язувалася чисельно (із додатковими ненульовими початковими умовами  $\varphi(0)=v$  у середовищі комп'ютерної математики Matlab / Simulink з вибором методу чисельного інтегрування у вигляді алгоритму Рунге-Кутта із адаптованим кроком розбиття інтервалу моделювання (але з умовою того, щоб максимальне значення кроку розбиття не перевищувало 0,01 с для забезпечення гладкості вітворюємої функції). Врахування ненульових початкових умов забезпечувалося використанням спеціальних блоків з пакету Simulink Extras.

Схема візуального моделювання представлена на рис. 2.

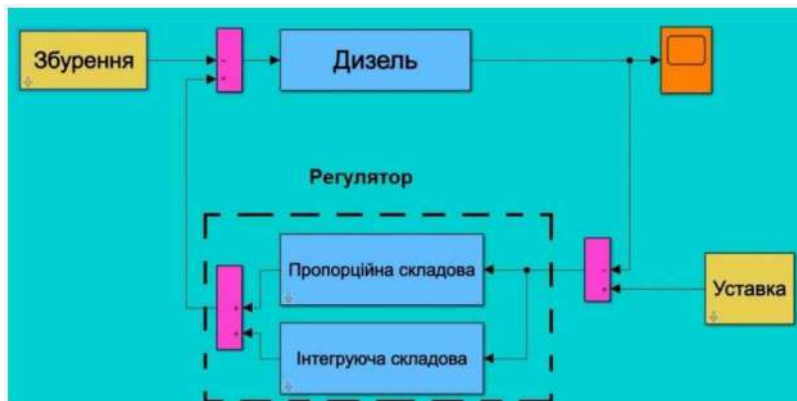


Рисунок 2 – Візуалізація САР частоти обертання колінчатого валу дизеля

На рис. 2 позначені наступні елементи САР:

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

Моделювання виконувалося для трьох різних відносних навантажень –  $f_0=1,0$ ;  $f_0=0,75$ ;  $f_0=0,5$ , що відповідало 20 %, 15 % та 10 % ступеню рециркуляції випускних газів. Зміна параметрів налаштування регулятора обиралися в діапазоні: коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою  $k_p=[0,5 \dots 2,5]$  з кроком зміни  $\Delta k_p=1,0$ ; час інтегрування  $T_i=[0,2 \dots 1,0]$  с з кроком зміни  $\Delta T_i=0,4$  с.

Налаштування режиму роботи САР відбувалося шляхом поелементної оптимізації, де як критерії оптимізації приймалися тривалість перехідного процесу  $t_p$ , с, та динамічне закидання  $\sigma$ , %. Варійованими параметрами були параметри налаштування регулятора – коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою  $k_p$  та час інтегрування  $T_i$ .

Зміни у характеру перебігу переходного процесу для різних параметрів навантаження та зовнішнього збурення проілюстровані на рис. 3-5.

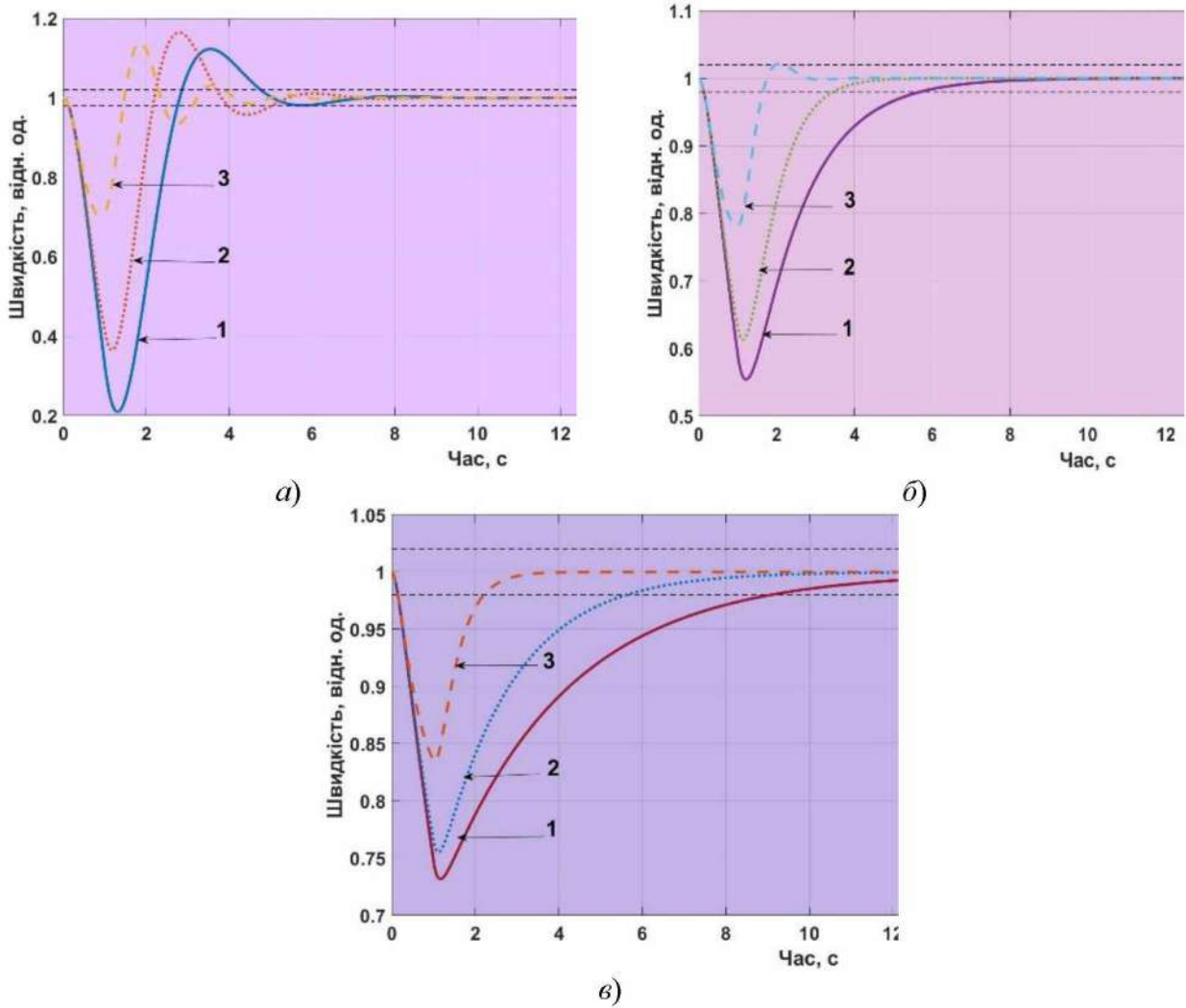
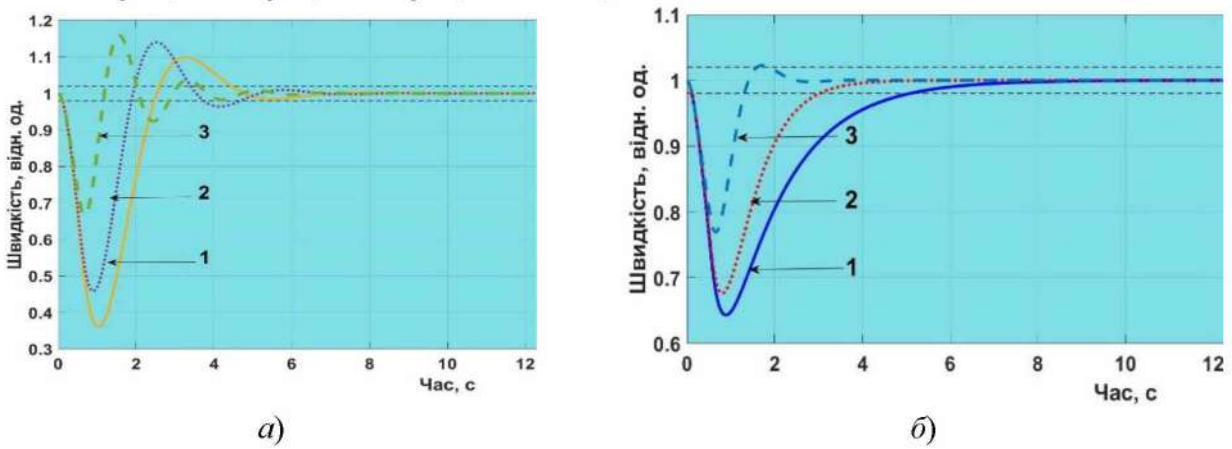
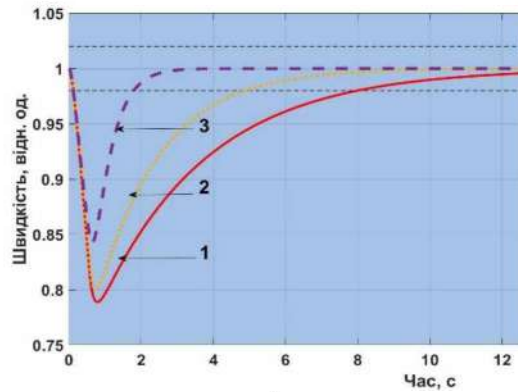


Рисунок 3 – Перехідні процеси в САР частоти обертання колінчатого валу дизеля.

Рівень навантаження (відносно значення сигналу збурення)  $f_0=1,0$ :

$a - k_p=0,5$ ;  $б - k_p=1,5$ ;  $в - k_p=2,5$ ; 1 –  $T_i=1,0$  с; 2 –  $T_i=0,6$  с; 3 –  $T_i=0,2$  с



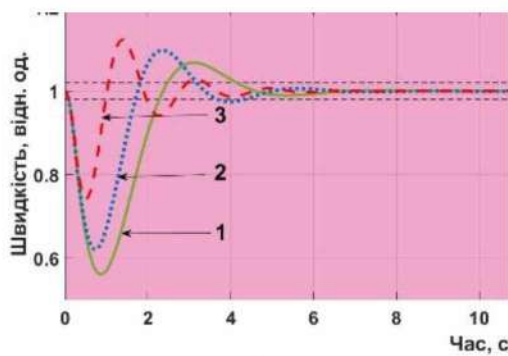


в)

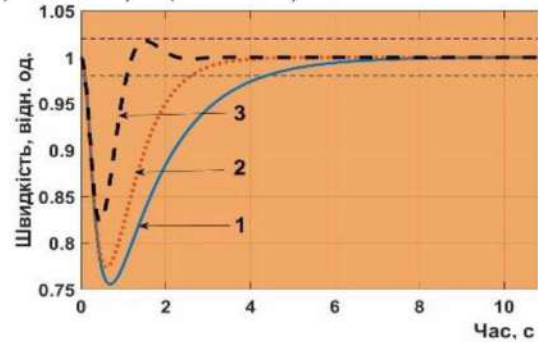
Рисунок 4 – Перехідні процеси в САР частоти обертання колінчатого валу дизеля.

Рівень навантаження (відносно значення сигналу збурення)  $f_0=0,75$ :

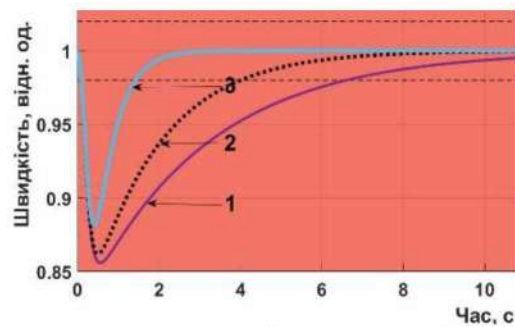
$a - k_p=0,5$ ;  $б - k_p=1,5$ ;  $в - k_p=2,5$ ;  $1 - T_i=1,0$  с;  $2 - T_i=0,6$  с;  $3 - T_i=0,2$  с



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Перехідні процеси в САР частоти обертання колінчатого валу дизеля.

Рівень навантаження (відносно значення сигналу збурення)  $f_0=0,5$ :

$a - k_p=0,5$ ;  $б - k_p=1,5$ ;  $в - k_p=2,5$ ;  $1 - T_i=1,0$  с;  $2 - T_i=0,6$  с;  $3 - T_i=0,2$  с

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

Результати, що наведені в табл. 2, свідчать, що для покращення якості перехідних процесів в САР в цілому (з деякими незначними відхиленнями внаслідок коливального характеру перехідних процесів) слід зупинитися на значеннях  $k_p=1,5$  та  $T_i=0,2$  с. Для цих значень час регулювання (в залежності від рівня навантаження) знаходиться у межах –  $t_p=(1,08...2,28)$  с, а відносне динамічне закидання – у межах  $\sigma=(17,7...21,7)$  %.

Таблиця 2 – Якість регулювання для різних значень параметрів налаштувань регулятора

| Відносне навантаження $f_0$ | Параметри налаштування |           | Параметри оптимізації |           |
|-----------------------------|------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
|                             | $k_p$ , відн. од.      | $T_i$ , с | $\sigma$ , %          | $t_p$ , с |
| 1,0                         | 0,5                    | 1,0       | 79,0                  | 6,00      |
|                             |                        | 0,6       | 63,5                  | 5,02      |
|                             |                        | 0,2       | 29,0                  | 3,87      |
|                             | 1,5                    | 1,0       | 43,6                  | 5,67      |
|                             |                        | 0,6       | 38,6                  | 3,54      |
|                             |                        | 0,2       | 21,8                  | 2,28      |
|                             | 2,5                    | 1,0       | 26,8                  | 9,01      |
|                             |                        | 0,6       | 24,6                  | 5,65      |
|                             |                        | 0,2       | 17,3                  | 2,21      |
| 0,75                        | 0,5                    | 1,0       | 64,0                  | 4,41      |
|                             |                        | 0,6       | 54,0                  | 4,70      |
|                             |                        | 0,2       | 32,9                  | 3,63      |
|                             | 1,5                    | 1,0       | 35,7                  | 5,00      |
|                             |                        | 0,6       | 32,4                  | 3,02      |
|                             |                        | 0,2       | 22,8                  | 1,31      |
|                             | 2,5                    | 1,0       | 18,7                  | 7,98      |
|                             |                        | 0,6       | 19,9                  | 4,92      |
|                             |                        | 0,2       | 15,6                  | 1,80      |
| 0,5                         | 0,5                    | 1,0       | 43,9                  | 4,15      |
|                             |                        | 0,6       | 37,5                  | 4,37      |
|                             |                        | 0,2       | 25,7                  | 3,40      |
|                             | 1,5                    | 1,0       | 24,5                  | 4,40      |
|                             |                        | 0,6       | 22,4                  | 2,60      |
|                             |                        | 0,2       | 17,7                  | 1,08      |
|                             | 2,5                    | 1,0       | 14,4                  | 6,58      |
|                             |                        | 0,6       | 13,7                  | 4,02      |
|                             |                        | 0,2       | 11,7                  | 1,46      |

**Висновки.** Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Під час використання системи рециркуляції випускних газів (що забезпечує зниження викидів в атмосферу оксидів азоту газами до рівню Tier III) здійснюється уповільнення процесу розширення газів. Це викликає зменшення крутного моменту та ефективної потужності дизеля та призводить до необхідності збільшення циклової подачі палива. Таким чином, зменшення кількості кисню, що потрапляє до циліндру дизелю в складі газоповітряної суміші, стає причиною додаткового зовнішнього збурення на систему автоматичного регулювання його частоти обертання. Це призводить до відхилення частоти обертання валу дизеля від встановленого завдання та сприяє виникненню перехідних процесів в автоматичній системі регулювання швидкісного режиму його роботи. Нехтування раптовим та стрибкоподібним збуренням, що виникає через використання системи рециркуляції випускних газів може призвести до критичного зменшення частоти обертання та відповідного зменшення крутного моменту дизеля. На деяких експлуатаційних режимах це може бути причиною зупинки дизеля та виникнення аварійної навігаційної ситуації.

2. Завдання забезпечення якості стабілізації частоти обертів роботи дизеля розв'язується класичним шляхом варіювання налаштувальних параметрів аналогового лінійного регулятора, алгоритм роботи якого відповідав пропорційно-інтегруючому закону. Обидва з варійованих параметрів – коефіцієнти підсилення за пропорційною та інтегруючою складовою (час інтегрування) мали можливість незалежної зміни, що зводило задачу мінімізації критерію оптимальності до класичної двопараметричної задачі. Як критерії оптимізації процесу регулювання

використовувалися найважливіші прямі показники перехідних процесі – відносна величина динамічного закиду регульованої характеристики (частоти обертання) та тривалість процесу регулювання.

3. Шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання (у програмному середовищі Matlab / Simulink) були визначені оптимальні параметри налаштування регулятора, які близькі до оптимальних значень: коефіцієнт підсилення за пропорційною компонентою – 1,5 та обернений коефіцієнт пропорційності (час інтегрування) за інтегруючою складовою – 0,2 с. При цьому забезпечуються найменші значення критеріїв оптимальності. В залежності від рівня зовнішнього навантаження вони знаходилися у наступних діапазонах час регулювання –  $t_p=(1,08 \dots 2,28)$  с та величина відносного перерегулювання –  $\sigma=(17,7\dots 21,7)\%$ . Це, у свою чергу, забезпечує оптимальний процес виходу швидкісного режиму головного двигуна на новий сталий режим з використанням системи вибіркового каталітичного відновлення.

### ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport systems and technologies. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
3. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
4. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньооборотних дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
5. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – 187-197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
6. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // International Journal of GEOMATE. – 2023. – Vol. 25. – N 109. – Pp. 125-132. DOI: https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312.
7. 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.
8. 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.
9. Petrychenko O., Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96-106. https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8.
10. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
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: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
12. 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.
13. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
14. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
15. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
16. 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.
17. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>
18. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V 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.
19. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
20. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
21. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
22. Сагін С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
23. 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.
24. 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>.
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. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
27. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
28. 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.

29. 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.
30. 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.
31. Сагин С. В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
32. 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.
33. 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.
34. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 84-103.
35. 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. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
36. 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. – Одеса: ОГМА. – С.102-104.
37. 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.
38. 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” – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
39. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
40. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // Scientific Horizons. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
41. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
42. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
43. Petrychenko O.O., Levinskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
44. 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>.
45. 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>.

46. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
47. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
48. Sagin S., Sagin A., Zablotskiy Y., Fomin O., Pišček V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants*. – 2025. – № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
49. 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.
50. Сагін С.В., Зabloцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.
51. 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). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
52. 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.

## REFERENCES

1. 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.
2. Petrychenko O., Levynskiy M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport systems and technologies*. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
3. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
4. Sagin S.V., Zablotskiy Y.V., Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
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). – P. 187-197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
6. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // *International Journal of GEOMATE*. – 2023. – Vol. 25. – № 109. – P. 125-132. DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312>.
7. 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.
8. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
9. 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>.
10. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
11. 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.

12. 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.
13. Petrychenko O., Levynskiy M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // *Sustainability*. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
14. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determining the optimal operating modes of marine internal combustion engines when using biodiesel fuel // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 48. – P. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
15. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
16. 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.
17. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>
18. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – № 45. – P. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
19. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
20. 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.
21. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
22. Sagin S.V. Rheology of motor oils in start-up and reverse modes of marine low-speed diesel engines // *Universum: Technical sciences*. – 2018. – № 3(48). – P. 67-71.
23. 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.
24. 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>.
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. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
27. Levynskiy M.V., Levynskiy V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // *Automation of ship technical facilities*. – 2020. – Вып. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
28. 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.
29. 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.

30. 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.
31. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2018. – № 4(57). – P. 109–120.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
38. 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”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
39. 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
40. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
41. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.
42. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
43. Petrychenko O.O., Levinskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – №41. – P.96-106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
44. 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>.
45. 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>.
46. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – C. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
47. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
48. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišček V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants*/ – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
49. 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.

50. 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.
51. 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.
52. 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.

*Sagin S.V., Popovskii O.Y., Kuropyatnyk O.A.*

### **ENSURING HIGH-SPEED OPERATING MODES OF MARINE DIESEL ENGINES USING AN EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEM**

*The results of research on ensuring high-speed operating modes of marine diesel engines using an exhaust gas recirculation system are presented. It is noted that low- and high-pressure exhaust gas recirculation systems are methods that contribute to the fulfillment of the requirements of the International MARPOL Convention on atmospheric pollution by nitrogen oxides. It is noted that in low- and high-pressure recirculation systems, the amount of exhaust gases returning to the diesel cylinder can reach 15–20 % of their total volume. This leads to a deterioration in the combustion process and a decrease in peak temperatures in the diesel cylinder. At the same time, on the one hand, the amount of nitrogen oxides formed during fuel combustion is reduced, and on the other hand, the process of gas expansion is slowed down. This causes a decrease in torque and effective power of the diesel engine and leads to the need to increase the cyclic fuel supply. Thus, the reduction in the amount of oxygen entering the diesel cylinder as part of the gas-air mixture causes additional external disturbance to the system of automatic control of its speed. Therefore, the aim of the article was to determine the optimal operating modes of the system of automatic control of the speed of a marine diesel engine during sudden operational loads in the exhaust gas recirculation system. The research was carried out by modeling the corresponding processes of exhaust gas recirculation and crankshaft speed control for a low-speed marine diesel engine 8G60ME from MAN Diesel, equipped with a high-pressure gas recirculation system. The automatic control system included the 8G60ME diesel engine and a controller that provides a proportional-integral control law. The simulation was performed for three different relative loads 1.0; 0.75; 0.5, which corresponded to 20 %, 15 % and 10 % of the exhaust gas recirculation degree. The change in the regulator setting parameters was in the range: gain for the proportional component (0.5–2.5) with a change step of 1.0; integration time (0.2–1.0) s with a change step of 0.4 s. This allowed us to determine the optimal modes, under which the course of transient processes is observed with the shortest regulation time and the smallest speed overshoot.*

**Keywords:** *automatic speed control system, disturbances, exhaust gas recirculation system, exhaust gases, high-speed mode of marine diesel, load, marine diesel, maritime transport, mathematical model, nitrogen oxide emissions, numerical modeling, optimization criteria, regulation, regulator setting parameters, transient process.*

*Стаття прийнята 19.03.2025*

© Кучерук Г.Ю., Лучко О.С.

## ЕКЗИСТЕНЦІАЛЬНІ ПЕРЕШКОДИ В ПРОФЕСІЙНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ МОРЯКІВ

У статті висвітлено особливості професійної діяльності моряків крізь призму екзистенційних перешкод, зокрема соціальної ізоляції, страху смерті та кризи смислу. Розкрито сутність екзистенційних труднощів, що виникають в умовах тривалої відсутності на березі, монотонності роботи та підвищеного ризику для життя. На основі аналізу сучасних наукових досліджень і напрацювань екзистенційної психотерапії визначено ключові психологічні чинники, які сприяють формуванню екзистенційних криз та емоційного виснаження моряків. Окрему увагу приділено логотерапевтичним підходам і методикам (пошук та переосмислення смислу, парадоксальна інтенція, дерефлексія), а також груповим формам психологічної підтримки для подолання відчуття ізоляції та порожнечі. Запропоновано конкретні напрямки профілактики екзистенційного вигорання. Порушено питання професійної підготовки судового персоналу, зокрема необхідності інтеграції елементів екзистенційно орієнтованої психотерапії в системи психологічного супроводу моряків. Реалізація таких заходів може підвищити життєстійкість моряків, сприяти гармонійному поєднанню професійного та особистого життя, а також підтримувати їхню психоемоційну рівновагу в екстремальних морських умовах.

**Ключові слова:** екзистенціальні перешкоди, ізоляція, логотерапія, сенс життя, професійна адаптація, професійна діяльність моряків.

**Постановка проблеми.** Екзистенціальні перешкоди в професійній діяльності моряків є однією з важливих та малодосліджених проблем сучасної морської психології та професійної підготовки. Моряки, які тривалий час перебувають у відриві від родини, у замкненому просторі та в умовах високого фізичного й психоемоційного навантаження, стикаються з кризами сенсу життя, почуттям ізолюваності та екзистенційною самотністю.

Зміна умов праці через технологічний прогрес, глобальні соціальні та політичні виклики, а також підвищення рівня невизначеності в морській сфері спричиняють посилення екзистенційної напруги у моряків. Це, своєю чергою, впливає на рівень їхньої професійної мотивації, психологічної стійкості та здатності приймати ефективні рішення в критичних ситуаціях. Вивчення екзистенціальних перешкод дозволить глибше зрозуміти внутрішній світ моряка, своєчасно діагностувати потенційні кризи та розробити психопрофілактичні заходи для підтримки особистісного та професійного благополуччя фахівців морської галузі.

Аналіз наукових джерел свідчить про підвищений науковий інтерес до проблеми психологічних та екзистенційних перешкод у професійній діяльності моряків, зумовлених особливостями морської служби, ізоляцією, монотонністю праці та підвищеними професійними ризиками. Зокрема, **Волкова О.О.** у своїх дослідженнях зосереджується на аналізі **копінг-поведінки моряків**, які працюють в умовах невизначеності та ризику [1]. Авторка підкреслює, що в умовах тривалого перебування у замкненому середовищі на борту судна важливими є здатність до адаптації, гнучкість у подоланні стресогенних ситуацій та розвиток екзистенційної стійкості як одного з ключових факторів збереження психічного здоров'я моряків. **Бабатіна Г.В. та Кудрявченко Г.В.** у своїй роботі акцентують увагу на **життєстійкості та стресостійкості майбутніх моряків**, доводячи, що саме ці психологічні характеристики є важливими детермінантами їхньої професійної успішності [2]. Вони визначають, що формування екзистенційних смислів та усвідомлення значущості своєї праці сприяють збереженню мотивації та внутрішньої рівноваги під час тривалих рейсів. Особливий інтерес становлять дослідження **Горбенко Л.В.**, яка вивчає **життєву стійкість моряків, які пережили піратський полон** [3].

Авторка звертає увагу на трансформацію екзистенційних смислів після пережитого екстремального досвіду та підкреслює важливість психологічного супроводу моряків після повернення з рейсів, пов'язаних із небезпекою для життя. **Слободяник Н.В. та Шатирко Л.О.** прирв'ятили свої роботи вивченню **психологічних особливостей професійної діяльності військових моряків** [4]. Зокрема, дослідники звертають увагу на вплив тривалої соціальної ізоляції, високої відповідальності та обмежених контактів із родиною на формування **екзистенційної фрустрації** та пошук нових сенсів у професійній діяльності.

Значна увага проблемам психологічного стану, стресостійкості та екзистенційних викликів у професійній діяльності моряків приділяється також у закордонних дослідженнях. Іноземні науковці розглядають моряків як одну з найбільш **вразливих професійних груп**, яка функціонує в умовах соціальної ізоляції, високого рівня невизначеності та психологічного стресу [5-9].

Більшість досліджень зосереджуються на адаптації, стресостійкості та життєстійкості, але екзистенційні кризи, екзистенційна самотність та питання втрати сенсу професійної діяльності в умовах тривалих рейсів досліджено фрагментарно. Попри значну увагу науковців до проблем стресостійкості, адаптації та життєстійкості моряків, залишається недостатньо вивченим вплив тривалого перебування в умовах соціальної ізоляції, монотонності праці та підвищеного рівня невизначеності на формування екзистенційних криз та екзистенційного вигорання моряків у процесі їхньої професійної діяльності. Потребує подальшого дослідження питання трансформації екзистенційних смислів та пошук ефективних психологічних технологій екзистенційної підтримки моряків на різних етапах професійного становлення.

**Виклад основного матеріалу.** Професійна діяльність моряків супроводжується численними **екзистенційними перешкодами**, серед яких: соціальна ізоляція, обмеженість соціальних контактів, загрози для життя, втрата екзистенційних смислів у монотонній праці, невизначеність майбутнього та порушення балансу між особистим і професійним життям. Вивчення цих факторів є необхідним для розробки програм психологічної підтримки моряків на всіх етапах їхньої кар'єри.

У психології екзистенційними перешкодами називають внутрішні бар'єри та кризові стани, що виникають унаслідок усвідомлення фундаментальних аспектів буття. До них відносять страх неминучості смерті, переживання самотності та ізольованості, тягар повної свободи вибору і відповідальності за власне життя, а також відчуття втрати смислу існування. Екзистенційні перешкоди проявляються у формі глибокої тривоги, екзистенційної кризи, почуття порожнечі чи апатії. Наприклад, екзистенційний вакуум (за В. Франклом) [10] – це стан, коли людина не здатна знайти сенс життя; він супроводжується відчуттями спустошеності, відчуженості, марності та безцільності буття. Для моряків зазначені переживання можуть стати особливо гострими через специфіку їхньої роботи, що постійно випробовує їх на міцність перед обличчям згаданих граничних даностей.

Розглянемо основні екзистенційні труднощі моряків. Професійна діяльність моряка характеризується умовами, що актуалізують екзистенційні питання. По-перше, це самотність та ізоляція. Місяці, проведені далеко від дому і близьких, обмеженість соціального кола на борту судна, розлука з родиною підсилюють відчуття екзистенційної ізольованості. Моряки часто почуваються емоційно відрізаними від світу на березі. Дослідження підтверджують, що ізоляція є одним з ключових факторів, що підриває психічне здоров'я моряків. Нерідко члени екіпажу характеризують свій психологічний стан як «внутрішню порожнечу» і безвихідь, особливо якщо на борту немає можливості отримати емоційну підтримку. Холості (неодружені) моряки сприймають самотність найбільш драматично – як тупиковий, безвихідний стан, що вказує на глибину їх екзистенційного страждання.

*По-друге*, значним викликом є криза смислу та мотивації. Монотонність повсякденних обов'язків на судні, багаторазове повторення одних і тих самих робочих операцій протягом тривалих контрактів можуть призводити до відчуття безсмысленності. Моряк може запитувати себе: «Заради чого я це роблю? Поки я в морі, життя вдома минає повз мене». Пропущені сімейні свята, народження дітей, важливі життєві події – все це підсилює відчуття втрати сенсу. У таких умовах може виникати екзистенційна фрустрація: людина сумнівається в значущості своєї професії та жертвах, на які йде

заради неї. Довгі періоди бездіяльності (наприклад, під час штилю чи очікування в порту) породжують нудьгу та апатію, що є проявами екзистенційного вакууму за Франклом. Якщо моряк не бачить в своїй праці глибшого смислу – наприклад, забезпечення добробуту родини або служіння суспільству через перевезення важливих вантажів – то мотивація різко падає. Це підтверджується опитуваннями, де низька задоволеність роботою і нудьга названі серед причин дострокового залишення морської кар'єри.

По-третє, моряки постійно мають справу з небезпекою для життя та здоров'я, що актуалізує екзистенційний страх смерті. Море є середовищем підвищеного ризику: шторм, аварія, пожежа або піратський напад – реальні загрози, з якими моряк змушений рахуватися щоденно. Усвідомлення крихкості життя та можливості раптової загибелі може породжувати постійну тривогу. Кожен вихід у відкрите море екзистенційно нагадує людині про її смертність. До цього додається обмежений контроль над ситуацією: моряк залежить від стихії та технічної справності судна, багато в чому покладаючись на долю і професіоналізм колег. Свобода вибору в морських умовах обмежена судовою дисципліною і регламентом – кожен член екіпажу мусить підкорятися наказам, чітким графікам та морським правилам. Це може викликати внутрішній конфлікт між потребою в автономності та вимушеною покірністю (відповідальністю перед командою). Втрата контролю над власною долею і відчуття несвободи є серйозними екзистенційними випробуваннями особистості. Моряк може переживати безсилля перед силами природи та обставинами, що формує стан екзистенційної тривоги. Ситуація ускладнюється культурними та мовними бар'єрами на суднах із міжнародними екіпажами: нерозуміння між колегами підсилює відчуття відчуженості та самотності. Таким чином, професійне життя моряка концентрує в собі цілу низку екзистенційних стресорів – ізоляцію, безсмысленність, страх смерті та несвободу – які можуть негативно впливати на його психіку і поведінку.

Подолання екзистенційних перешкод моряків потребує цілеспрямованої психологічної роботи, що враховує глибинні потреби у смислі, зв'язку та самореалізації. Екзистенційна психотерапія пропонує низку підходів, здатних допомогти людям, які стикаються з екзистенційними кризами. Центральним завданням є віднайдення особистісного сенсу в ситуації моряка. Як зазначав В. Франкл, навіть у найважчих обставинах життя завжди має потенційний сенс – потрібно його розкрити. Психолог, працюючи з моряком, може застосувати методи логотерапії Франкла: наприклад, сократичний діалог – шляхом м'якого ставлення запитань спонукати клієнта самостійно сформулювати, заради чого він живе і працює. Моряки часто знаходять сенс своєї праці у забезпеченні добробуту сім'ї, у відданості морській справі чи релігійних переконаннях. Виявлення та усвідомлення цього сенсу здатне нейтралізувати почуття порожнечі і апатії. Ще один прийом – дерефлексія, тобто переключення уваги з власних переживань на зовнішні цілі та цінності. Моряку можна порадити зосередитися не на особистому дискомфорті, а на професійному завданні або навчанні нового (наприклад, вивчити додатково мову, опанувати нові навички під час рейсу). Це зменшує зайву сконцентрованість на негативних думках і допомагає знову відчутти залученість у справу.

Для подолання екзистенційного страху і тривоги корисно використовувати техніки, що допомагають змінити ставлення до неконтрольованих обставин. Однією з таких є метод парадоксальної інтенції (за В. Франклом), коли людині пропонується відпустити свій страх і навіть уявно перебільшити його до абсурду. Наприклад, моряку, який боїться шторму, можна порадити уявити гірший сценарій і прожити його в думках, одночасно іронізуючи над собою. Це часто послаблює панічний страх і повертає відчуття контролю над власною реакцією. В екзистенційній психотерапії також наголошується на прийнятті неминучого: усвідомлення, що смерть і небезпека – невід'ємна частина життя моряка, дозволяє перестати витрачати надмірні душевні сили на постійні побоювання. Замість цього акцент робиться на тому, що моряк має свободу вибору ставлення до цих обставин. Він не може змінити погоду чи скасувати розлуку з домом, але може змінити своє сприйняття: побачити в рейсі можливість перевірити себе, загартувати характер, заробити на майбутнє сім'ї. Така переінтерпретація ситуації – теж одна з технік логотерапії, відома як пошук конкретного смислу у стражданні. Якщо моряк знайде особистісний смисл у пережитих труднощах (наприклад, «я витримаю цю розлуку, щоб забезпечити дітям освіту»), то психологічно він стає стійкішим до екзистенційної кризи.

Важливим напрямом роботи є подолання ізоляції. Ірвін Ялом вказував, що екзистенційна ізоляція пом'якшується через глибинні міжособистісні контакти та автентичне спілкування. Тому в рамках

підтримки моряків доцільно створювати умови для відкритого обговорення їхніх переживань. На практиці це може реалізовуватися у формі групової терапії або взаємопідтримки серед членів екіпажу. Якщо команда обговорює психологічні труднощі колективно (наприклад, в присутності суднового психолога чи капелана), моряки бачать, що не вони одні відчувають страх чи тугу. Такий обмін досвідом знижує відчуття унікальної покинутості, дає відчуття спільності («ми разом проходимо через це»). Елементи екзистенційно-орієнтованої групової роботи можуть включати обговорення смисложиттєвих питань, листи додому як терапевтична вправа, ведення щоденника думок і почуттів під час рейсу тощо. Керівництво суден і судноплавних компаній може сприяти психологічному благополуччю екіпажів, залучаючи професійних психологів для проведення тренінгів стрес-менеджменту з екзистенційним ухилом. Наприклад, тренінги з розвитку резиліентності (психологічної стійкості) все частіше включають компонент пошуку позитивного смислу в стресових подіях та формування навичок усвідомленого проживання моменту. Таким чином, методики екзистенційної психотерапії – логотерапевтичні техніки (пошук смислу, парадоксальна інтенція, дерефлексія), групова підтримка, розвиток автентичної комунікації – можуть бути успішно застосовані для психологічної допомоги морякам. Вони сприяють переосмисленню важких ситуацій, прийняттю неминучого та акцентуванню на тому, що навіть у морі людина не втрачає свою внутрішню свободу та здатність знайти сенс.

**Висновки.** Професійна діяльність моряків є середовищем з високим рівнем екзистенційного стресу, що обумовлений ізоляцією, монотонністю праці, ризиками для життя та розривом між особистим і професійним життям. Це може призводити до втрати смислу, екзистенційної тривоги та фрустрації. Для збереження психологічного благополуччя моряків необхідне впровадження цілеспрямованих методик психологічної підтримки. Екзистенційна психотерапія, зокрема логотерапія Франкла, демонструє ефективність у подоланні цих викликів через пошук смислу, розвиток внутрішньої стійкості та підтримку соціальної взаємодії. Важливим є також залучення суднових психологів, створення програм групової підтримки та впровадження тренінгів з управління стресом. Комплексний підхід до психологічного супроводу моряків може суттєво покращити їхнє психоемоційне здоров'я та професійну адаптацію.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Волкова Олена Олександрівна. «Копінг-поведінка моряків в умовах невизначеності та ризику». Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії. – Одеса: Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, 2021. – 250 с. [Dissertation Volkova Olena.pdf](#)
2. Бабатіна Г.В., Кудрявченко Г.В. "Емпіричний аналіз стресостійкості й життєстійкості як чинників професійної успішності майбутніх моряків". Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Психологічні науки, 2020, №4, с. 56-61. <https://pj.journal.kspu.edu/index.php/pj/article/view/659#:~:text=%D0%A3%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%96%20%D0%B7%D0%B4%D>
3. Горбенко Л.В. "Психологічні особливості життєвої стійкості моряків – жертв піратства". Монографія. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2017. – 180 с. [Вивчення життєстійкості моряків, які пережили піратський полон](#)
4. Слободяник Н.В., Шатирко Л.О. "Психологічні особливості професійної діяльності моряків". Вісник Національного університету оборони України, 2022, №1, с. 123-128. [Аналіз психологічних аспектів професійної діяльності військових моряків](#)
5. Sampson, H., & Ellis, N. (2019). Seafarers' mental health and wellbeing. Cardiff University Seafarers International Research Centre. – 54 p. <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/127214/1/seafarers-mental-health-wellbeing-full-report.pdf>
6. Thomas, M., & Bailey, N. (2009). Work and life at sea: Understanding the impacts of stress and social isolation on seafarers. International Maritime Health, 60(2), 88-95 [https://www.researchgate.net/publication/7186553\\_The\\_social\\_isolation\\_of\\_seafarers\\_causes\\_effects\\_and\\_remedies](https://www.researchgate.net/publication/7186553_The_social_isolation_of_seafarers_causes_effects_and_remedies)

7. Lucas, D. (2020). Existential isolation among seafarers: A qualitative study of life at sea. *Maritime Policy & Management*, 47(3), 325-339.  
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/25725084.2024.2421708>
8. Zhang, P., & Zhao, X. (2021). Coping strategies for seafarers' mental health issues during long voyages. *Journal of Occupational Health Psychology*, 26(4), 285-298.  
[https://www.researchgate.net/publication/369472497\\_Empowering\\_Seafarers\\_as\\_Agents\\_of\\_Their\\_Mental\\_Health\\_The\\_Role\\_of\\_Information\\_and\\_Communication\\_Technology\\_in\\_Seafarers%27\\_Well-Being](https://www.researchgate.net/publication/369472497_Empowering_Seafarers_as_Agents_of_Their_Mental_Health_The_Role_of_Information_and_Communication_Technology_in_Seafarers%27_Well-Being)
9. Alderton, T., & Winchester, N. (2021). Globalisation and dehumanisation of seafarers: What does the future hold? *International Transport Workers' Federation Report*. – 32 p. <https://ijomeh.eu/pdf-111339-43700?filename=43700.pdf>
10. Поняття екзистенційного вакууму. URL:  
[https://vuzlit.com/2298500/ponyattya\\_ekzistentsialnogo\\_vakuumu](https://vuzlit.com/2298500/ponyattya_ekzistentsialnogo_vakuumu) (дата звернення: 10.03.2025).

*Kucheruk G.Yu., Luchko O.S.*

### **EXISTENTIAL OBSTACLES IN THE PROFESSIONAL ACTIVITY OF SAILORS**

*The article highlights the features of the professional activity of sailors through the prism of existential obstacles, in particular social isolation, fear of death and a crisis of meaning. The essence of existential difficulties that arise in conditions of prolonged absence from shore, monotony of work and increased risk to life is revealed. Based on the analysis of modern scientific research and developments in existential psychotherapy, key psychological factors that contribute to the formation of existential crises and emotional exhaustion of sailors have been identified. Special attention is paid to logotherapeutic approaches and techniques (search and rethinking of meaning, paradoxical intention, dereflection), as well as group forms of psychological support to overcome the feeling of isolation and emptiness. Specific directions for the prevention of existential burnout are proposed. The issue of professional training of ship personnel is raised, in particular, the need to integrate elements of existentially oriented psychotherapy into the systems of psychological support for seafarers. The implementation of such measures can increase the resilience of seafarers, promote a harmonious combination of professional and personal life, and also maintain their psycho-emotional balance in extreme maritime conditions.*

**Keywords:** *existential obstacles, isolation, logotherapy, meaning of life, professional adaptation, professional activity of seafarers.*

*Стаття прийнята 20.03.2025*

## МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

УДК 004.92:378.14

doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.19

© Лопатюк С.П.

**ВИКОРИСТАННЯ КОМАНД «SLICE», «SECTIONPLANE» ПРИ 3D-МОДЕЛЮВАННІ В AUTOCAD**

Система автоматизованого проектування AutoCAD має розвинений інструментарій для розв'язання конкретних задач практичної інженерної графіки. Однією із таких задач є виявлення внутрішньої структури складного об'єкта моделювання. Стандартно цю проблему вирішують за допомогою нанесення розрізів, побудови перерізів об'єкта-моделі. Команди «Slice» і «Sectionplane» призначені саме для виконання таких функцій.

Стаття присвячена питанням використання інструментарію команд «Slice» і «Sectionplane» при моделюванні простих і складних просторових об'єктів в процесі вивчення дисципліни «Комп'ютерна графіка та 3D-моделювання». Пропонується методика динамічного моделювання при викладанні тем: «Криві лінії другого порядку», «Конічні перерізи» дисципліни «Нарисна геометрія та інженерна графіка». Розглядаються можливості та особливості застосування різних опцій команд.

**Ключові слова:** моделювання складних просторових об'єктів, січна площина, розріз, переріз.

**Постановка проблеми:** Технічне креслення має надавати повне уявлення про зовнішню та внутрішню форму об'єкта. Для розкриття внутрішньої будови предмета в інженерній графіці використовують розрізи і перерізи [1,2]. В AutoCAD формування розрізів і перерізів виконується за допомогою команд «Slice» (розріз) і «Sectionplane» (січна площина). Пропонується методика використання цього інструментарію в процесі вивчення розділу аксонометричного моделювання простих і складних об'єктів.

**Вступ.** Команди «Slice», «Sectionplane», які в системі AutoCAD використовуються для побудови розрізів і перерізів трьохвимірних об'єктів, мають свої особливості і відмінності [5,6].

За допомогою команди «Slice» створюється двовимірний об'єкт (фігура) перетину тривимірного тіла площиною.

Команда «Sectionplane» використовується для створення об'єкта-перерізу, що виконує функції січної площини для 3D-об'єктів. Об'єкти січної площини створюють перерізи 3D-тіл, поверхонь і мережових поверхонь. Об'єкт січної площини використовується для аналізу 3D-моделі разом з інструментом «Pseudosection псевдорозріз».

Розглядаються можливості і особливості застосування команд «Slice», «Sectionplane» в практиці комп'ютерного моделювання.

**Мета дослідження** полягає у створенні методики використання команд «Slice», «Sectionplane» при моделюванні складних просторових об'єктів.

**Основні матеріали дослідження.** В технічному кресленні застосовують розрізи і перерізи для уточнення побудови 3D-моделі [1,2]. Розрізи поділяють на прості (одна січна площина) і складні (кілька площин). Складні розрізи бувають східчастими (січні площини паралельні) і ламаними (січні площини перетинаються). Горизонтальні, фронтальні та профільні розрізи можуть бути зображені на місці відповідних основних виглядів. Перерізи поділяють на такі, що входять до складу розрізів, і такі, що існують як самостійні зображення. Для зображення розрізів і перерізів на кресленнях існують відповідні правила СКД. В AutoCAD створений зручний інструментарій для утворення і аналізу розрізів і перерізів [5,6].

Створення розрізу розпочинається з побудови лінії розрізу (проекції січної площини) на моделі об'єкта. Існують декілька способів визначення січної площини:

- за трьома точками;
- за допомогою використання стандартних площин  $XY$ ,  $YZ$ ,  $ZX$ .

За замовченням використовується січна площина, що проходить через дві точки перпендикулярно площині  $XY$  поточної системи ПСК. Нижче надані приклади побудови розрізів стандартних для AutoCAD простих поверхонь (циліндра і конуса). Послідовність дій для виконання розрізу 3D-тіла:

- активізувати команду «Slice»;
- виділити об'єкт (або набір об'єктів);
- в командному меню вибрати необхідну опцію.

Можливі такі опції:

- січна площина задається 3 точками;
- задається 3 точки, за двома точками утворюється слід-проекція площини розрізу і третя точка визначає напрямок погляду з наступним вилученням непотрібної частини 3D-об'єкта, що розрізається (можливий варіант, коли залишаються обидві частини);
- січна площина задається слідом-проекцією на площині проєкцій  $XY$ ;
- січна площина задається слідом-проекцією на площині проєкцій  $YZ$ ;
- січна площина задається слідом-проекцією на площині проєкцій  $ZX$ ;
- січна площина задається слідом-проекцією на певному вигляді 3D-об'єкта, що розрізається;
- січна площина задається слідом-проекцією, якій є перпендикулярним до осі  $Z$ ;
- 3D-об'єкт розрізається деяким плоским об'єктом (січна площина визначається такими кривими: коло, еліпс, дуга, 2D-сплайн, 2D-полілінія);
- 3D-об'єкт розрізається поверхнею.

При моделюванні розрізняють об'єкти-поверхні, 3D-тіла, мережеві поверхні. Поверхні можна розрізати тільки площинами. 3D-тіло можна розрізати за допомогою заданих площин або об'єктів-поверхонь. Мережеві поверхні неможливо розрізати або використовувати в якості січних поверхонь.

Розглянемо застосування команди «Slice» на прикладі простих стандартних тіл: циліндра і конуса.

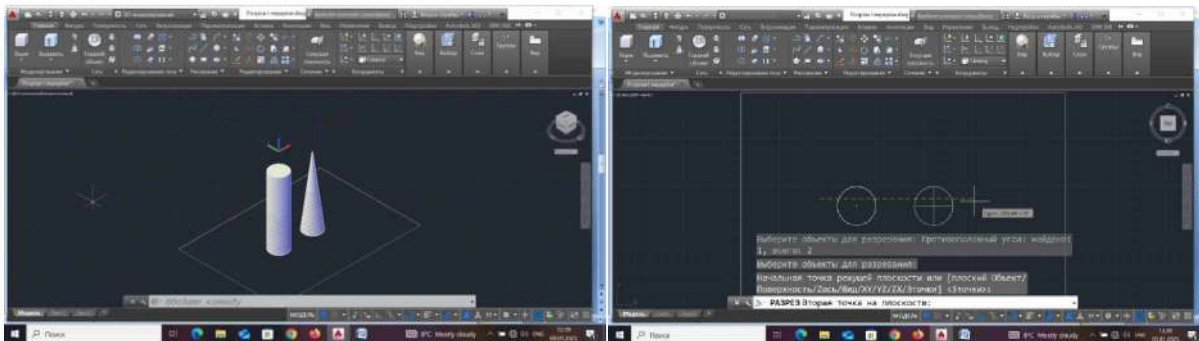


Рисунок 1 – Слід січної площини на вигляді зверху

Слід січної площини задається двома точками на площині  $XY$  (або вигляді зверху) і обирається необхідний напрямок погляду, із збереженням частини об'єкта перед січною площиною або без неї (рис. 2).

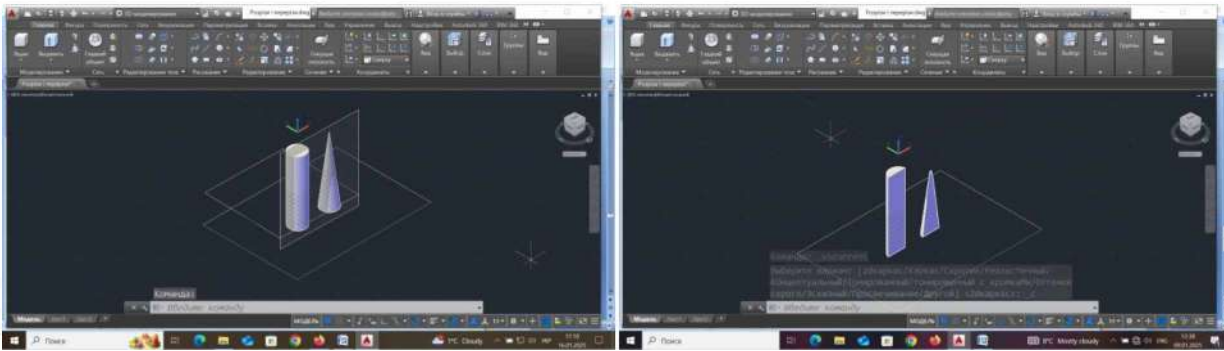


Рисунок 2

Використання опції «площина XZ (вигляд спереду)» дає змогу швидко і зручно демонструвати результати перетину площиною циліндра і конуса, наприклад, при опрацюванні теми: «Криві лінії другого порядку» (рис. 3).

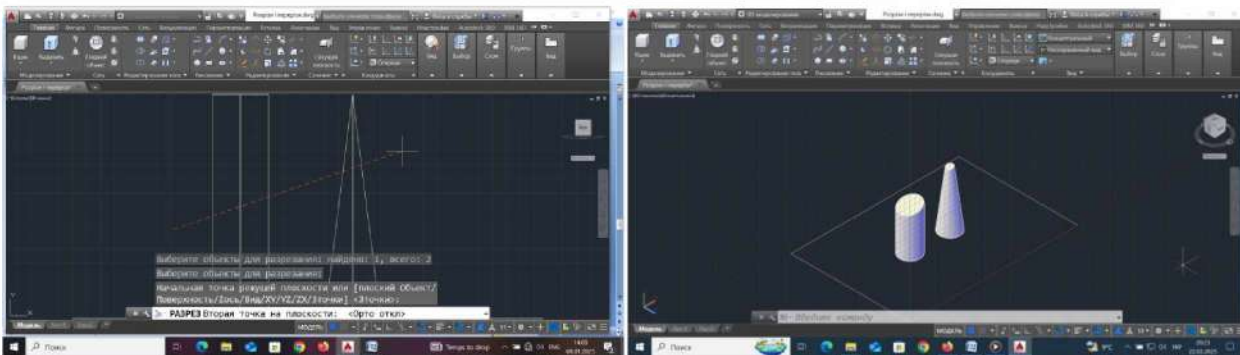


Рисунок 3 – Перетин циліндра і конуса фронтально-проекціуючою площиною

Опція «вісь Z» надає можливість розрізати поверхню (тіло) на певній висоті вздовж осі Z системи координат та обрати необхідну частину поверхні (тіла). Вісь Z при цьому є нормаллю січної площини (рис. 4). Сторона поверхні (тіла) обирається вказуванням точки з потрібної сторони (можна залишити обидві частини). Опція є зручною і корисною при моделюванні складних поверхонь.

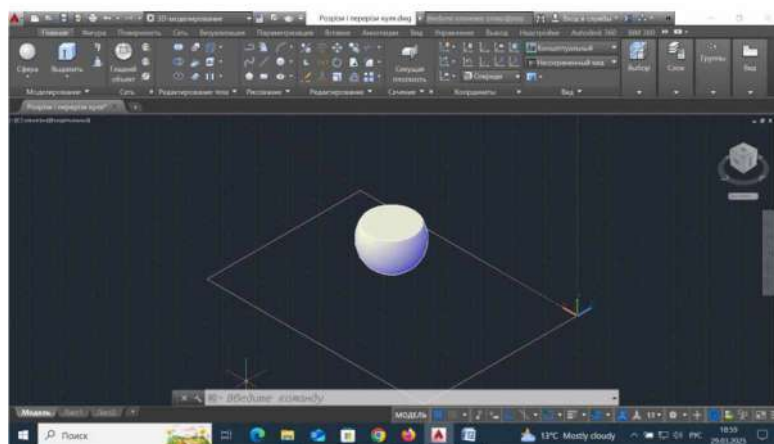


Рисунок 4

Нижче наведений приклад побудови перерізів циліндра і конуса сферою (опція «поверхня»):

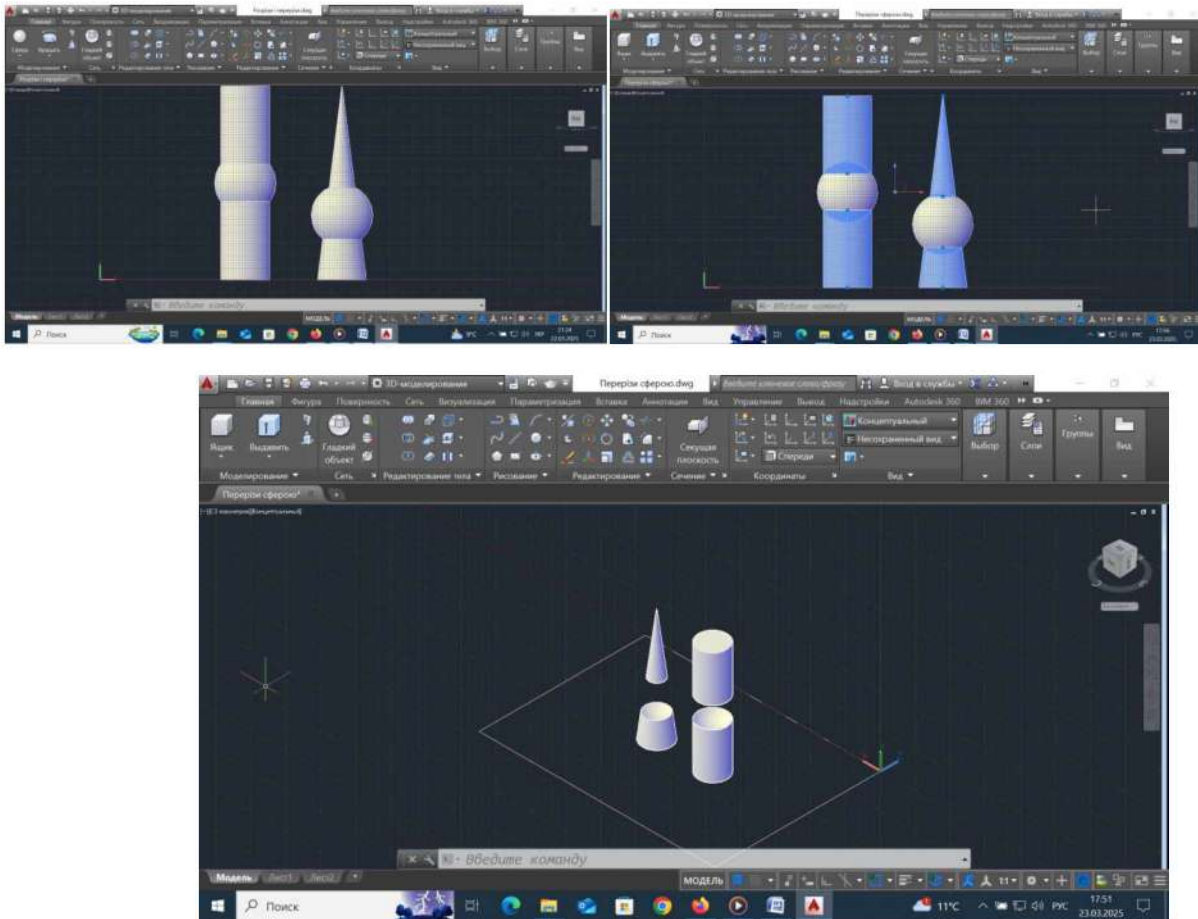


Рисунок 5 – Перетин тіл поверхню

За допомогою команди «Slice» можна коригувати геометричну форму 3D-тіла:

- змінити властивості 3D-тіла за рахунок зміни його форми (непотрібне видаляється);
- підготувати 3D-тіло для наступного формування спряжень або зняття фасок на гранях цього тіла.

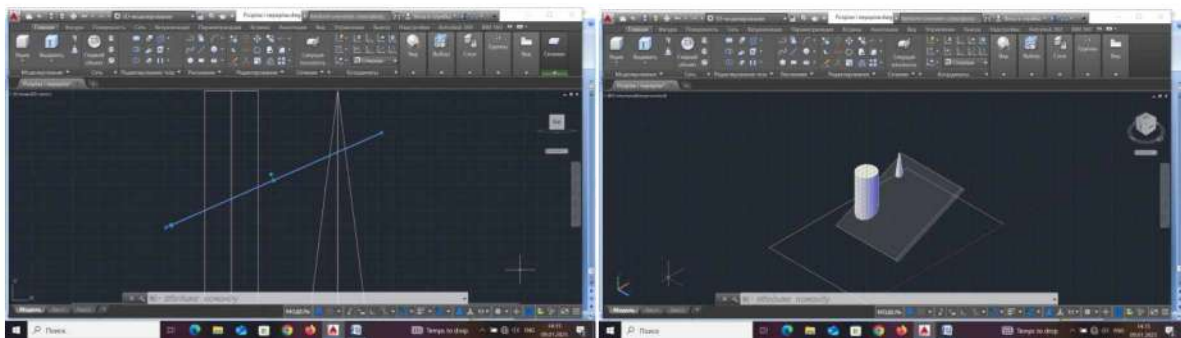


Рисунок 6

Об'єкт «січна площина» має так звані «ручки», важелі, які дозволяють змінювати розташування перерізу, регулювати довжину, ширину і висоту області січної площини. На рис. 6, 7 представлена можливість вибору точки зору на розріз за допомогою простої зміни напрямку стрілки на сліди-проекції січної площини (виділений яскраво синім кольором).

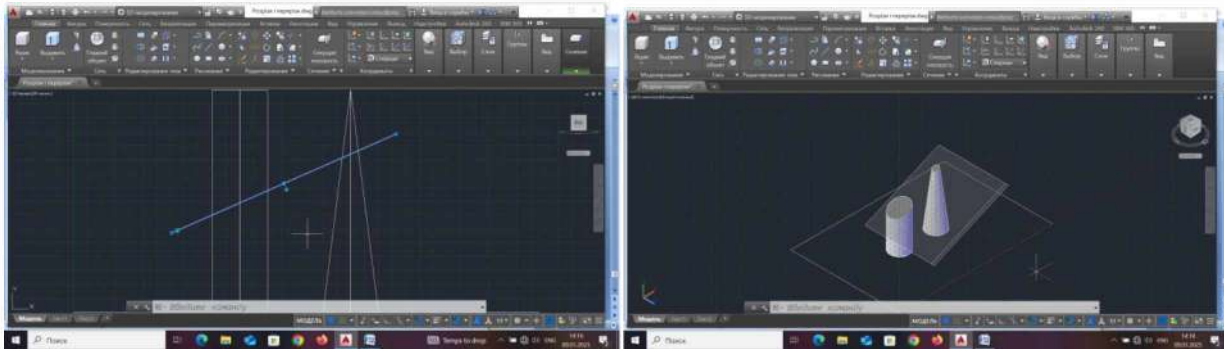


Рисунок 7

Команда «Sectionplane» дозволяє будувати переріз, динамічно змінювати параметри січної площини та аналізувати при цьому зміни форми перерізу, утворювати розріз зі зломом. Інструментарій «Sectionplane» складається з таких опцій: «Livesection» (псевдорозріз), «Додати злам», «Створення перерізу» та ін.

Якщо включена опція «Sectionplane», можна переміщувати об'єкт-січна площина через 3D-модель тіла в режимі реального часу, отримуючи відповідний переріз. При цьому саме 3d-тіло не змінюється. «Sectionplane» використовується для динамічного аналізу внутрішньої побудови деталі. Можливо сховати або вирізати фрагмент деталі, що знаходиться на стороні перегляду і заважає наочності.

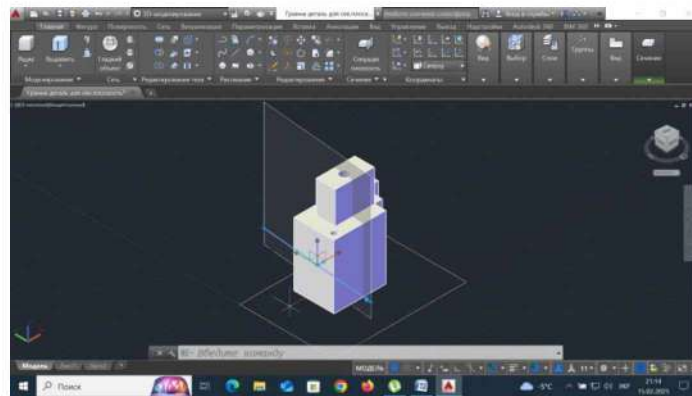


Рисунок 8

Команда «Sectionplane» дозволяє вибрати грань або будь яку точку, щоб вказати місцезнаходження лінії розрізу. Будується розріз площиною, перпендикулярною XY (рис. 8), задано 2 точки, без вибору напрямку погляду:

«Ручки» січної площини надають такі можливості:

- **1 точка** – базова точка об'єкта-січної площини – є базовою точкою повороту в площині XY (рис. 9):

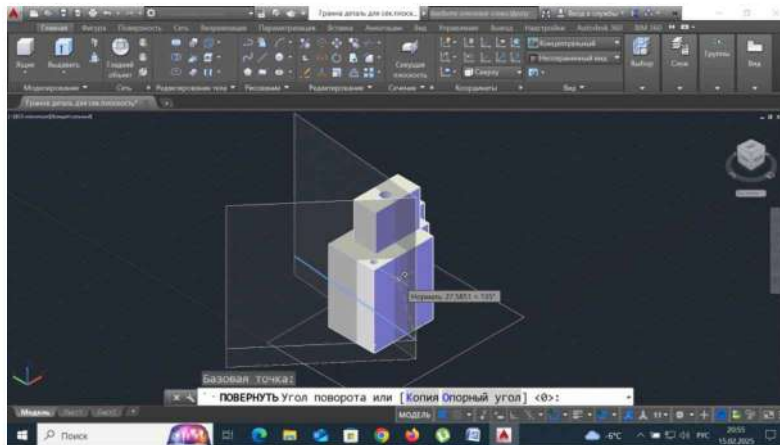


Рисунок 9

- обертання за допомогою **точки 2** (базова точка - на місці) як ручки (рис. 10):

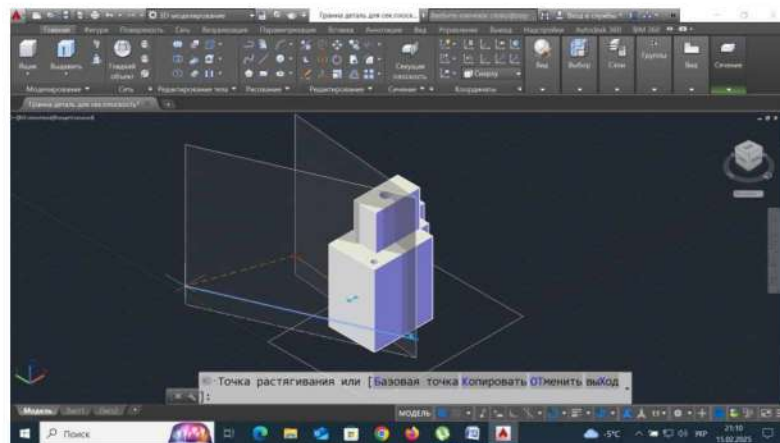


Рисунок 10

- **точка «меню»** (площина, контур, об'єм) на рис. 11:

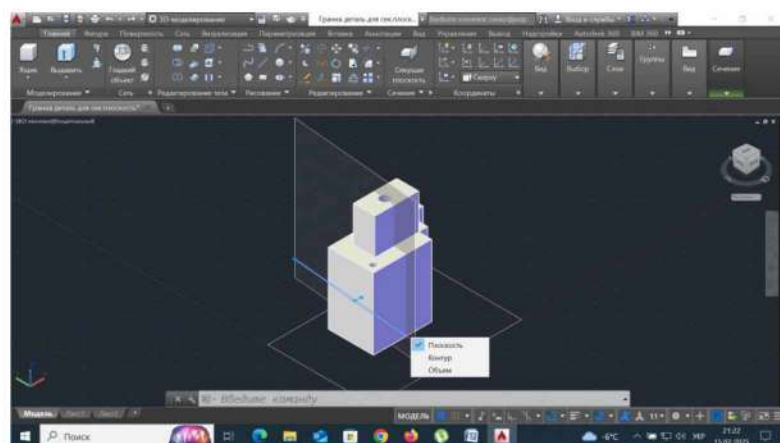


Рисунок 11

- **точка «стрілка»** на рисунку 12 змінює об'єкт-переріз (форму і розташування, дозволяє ортогональні зсуви в напрямку, вказаному стрілкою):

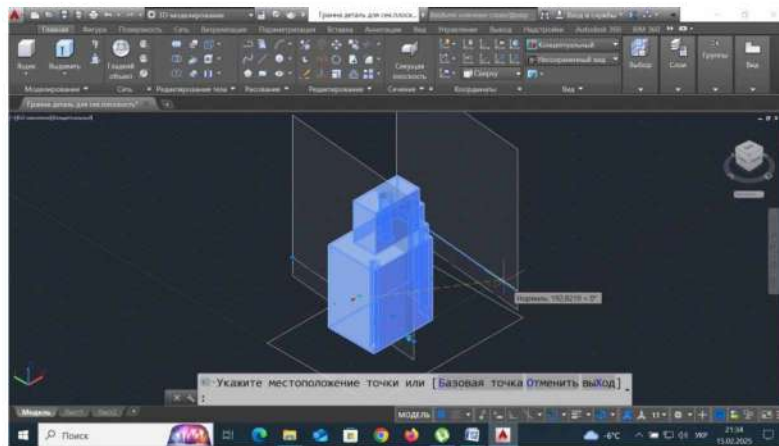


Рисунок 12

Додавання зламу до об'єкта «січна площина» здійснюється на вже побудованій лінії перерізу. Спочатку будується об'єкт-переріз (наприклад, лінія через 2 точки в площині XY, вигляд зверху), злам створюється під кутом 90 градусів до цієї лінії (рисунок 13):

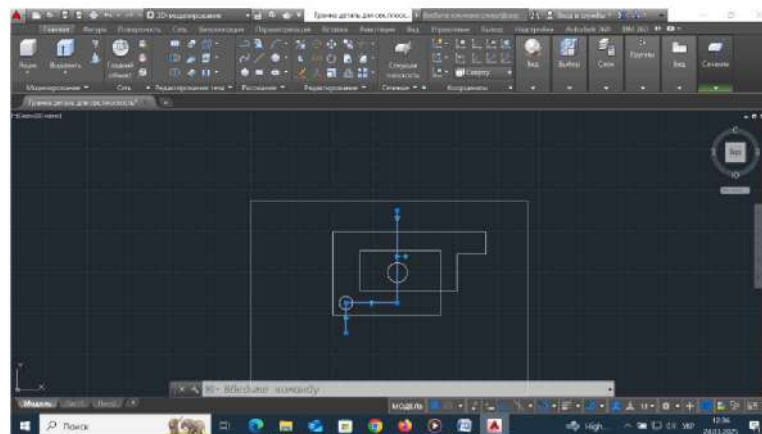


Рисунок 13

Команда «Створити січну площину» має 2 опції: створення 3D-розрізу, створення 2D-перерізу.

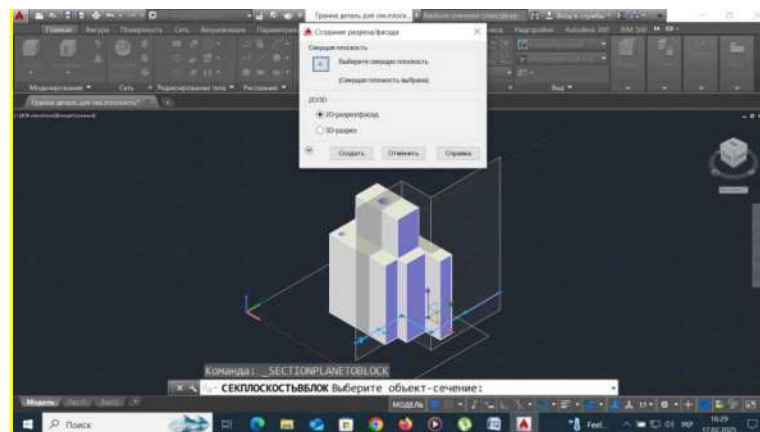


Рисунок 14

Вигляд створеного розрізу в ізометрії:

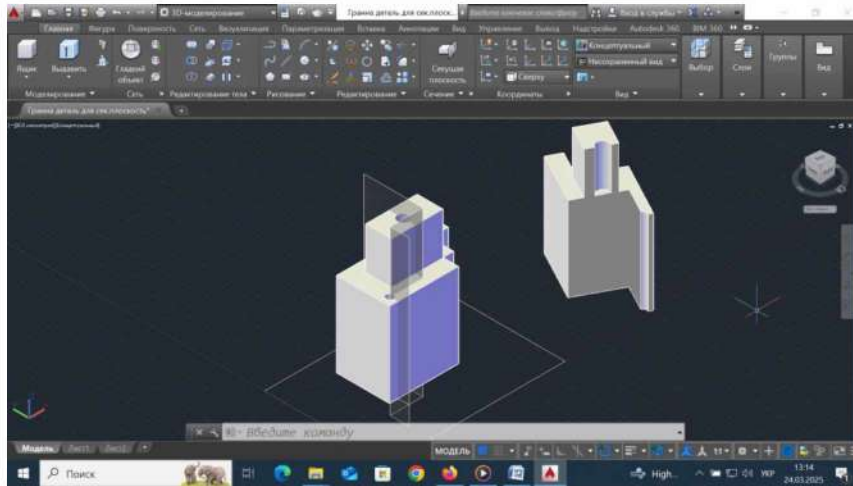


Рисунок 15

Створення перерізу:

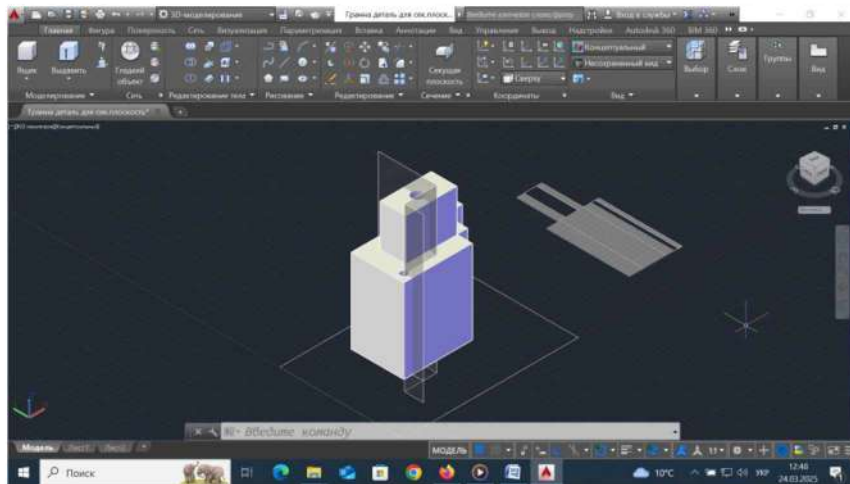


Рисунок 16

Команда «Sectionplane» дозволяє динамічно аналізувати форму перерізу, змінювати параметри січної площини, ускладнювати розріз в разі необхідності перевірки відповідності внутрішньої будови 3D-моделі бажаним вимогам.

**Висновки.** Інструментарій команд «Slice» і «Sectionplane» системи автоматизованого проектування AutoCAD має зручні опції для моделювання і вивчення простих і складних просторових об'єктів. Можливості динамічного переміщення січної площини, зміни її геометричних параметрів сприяють розвитку просторового уявлення, спрощують процес 3D-моделювання. Привабливою є опція побудови розрізу 3D-тіла поверхнею. Доцільним є використання її в процесі викладання розділу «Взаємний перетин поверхонь» дисципліни «Нарисна геометрія», особливо для ілюстрації способу сферичних посередників, способу ексцентричних сфер, особливих випадків перетину поверхонь [3,4].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Михайленко В.Є., Ванін В.В., Ковальов С.М. М 69 Інженерна та комп'ютерна графіка: Підручник / За ред. В.Є. Михайленка. - К.: Каравела, 2010. 360 с.
2. Морозенко О.П., Малишко Г.В. Правила виконання та оформлення креслень. Навчальний посібник.- Дніпропетровськ, НМетАУ, 2012. – 49с.
3. Лопатюк С.П. Модернізації навчання інженерної графіки з використанням можливостей САПР AUTOCAD. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2020. – Випуск 1(29). С.58-66
4. Лопатюк С.П. Конспект лекцій з дисципліни «Нарисна геометрія та інженерна графіка» для студентів напряму підготовки 271 «Річковий та морський транспорт» усіх форм навчання. – К.: ДУІТ, 2024.– 96с.
5. SLICE (Command) AutoCAD 2025  
<https://help.autodesk.com/view/ACD/2025/ENU/?guid=GUID-27593C5E-4B89-41F2-872B-927D69517CBF>
6. SECTIONPLANE (Command) AutoCAD 202525  
<https://help.autodesk.com/view/ACD/2025/ENU/?guid=GUID-3AC2CA12-2085-4782-B66A-7964B73B55EA>

## REFERENCES

1. Mykhaylenko V.E., Vanin V.V., Kovalev S.M. M 69 Engineering and computer graphics: Textbook / Ed. V.E. Mykhaylenko - K.: Karavela, 2010. 360 p.
2. Morozenko O.P., Malysheko G.V. Rules for the execution and design of drawings.. - Training manual/ Dnipropetrovsk, NMetAU, 2012. - 49p.
3. Lopatyuk S.P. Modernization of training in engineering graphics using AUTOCAD CAD capabilities. Water transport. Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies. - K.: DUIT, 2020. - Issue 1(29). P.58-66
4. Lopatyuk S.P. Lecture notes on the discipline “Descriptive Geometry and Engineering Graphics” for students of the direction of training 271 “River and Sea Transport” of all forms of study.– K.: DUIT, 2024.– 96p.
5. SLICE (Command) AutoCAD 2025  
<https://help.autodesk.com/view/ACD/2025/ENU/?guid=GUID-27593C5E-4B89-41F2-872B-927D69517CBF>
6. SECTIONPLANE (Command) AutoCAD 202525  
<https://help.autodesk.com/view/ACD/2025/ENU/?guid=GUID-3AC2CA12-2085-4782-B66A-7964B73B55EA>

**Lopatuk S.P.**

**USING THE «SLICE» AND «SECTIONPLANE» COMMANDS IN 3D MODELING IN AUTOCAD**

*The AutoCAD computer-aided design system has a developed toolkit for solving specific problems of practical engineering graphics. One of such problems is to identify the internal structure of a complex modeling object. This problem is usually solved by applying cuts and constructing cross-sections of the model object. The "Slice" and «Sectionplane» commands are designed to perform such functions.*

*The article is devoted to the issues of using the tools of the «Slice» and «Sectionplane» commands when modeling simple and complex spatial objects in the process of studying the discipline «Computer Graphics and 3D Modeling2. The method of dynamic modeling is proposed when teaching the topics: «Second-order Curves», «Conic Sections» of the discipline «Descriptive Geometry and Engineering Graphics». The possibilities and features of using various command options are considered.*

**Key words:** modeling of complex spatial objects, cutting plane, section, cross-section.

*Стаття прийнята 22.03.2025*

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 658.012.4:621

doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.20

© Тупкало В.М., Богом'я В.І., Ярмолатій А.В.

**КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ СИСТЕМОТЕХНІКИ КІБЕРЗАХИЩЕНИХ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ АПАРАТУ СИНТЕЗУ СИГНАТУРНОЇ АЛГЕБРИ**

*Гарантування безпеки та стійкості національної критичної інфраструктури сьогодні є пріоритетним напрямком безпекової політики України, оскільки критична інфраструктура забезпечує життєвоважливі для населення, суспільства та держави, без яких неможливо безпечно існування та забезпечення належного рівня національної безпеки. Головні причини критичності інформаційної складової інфраструктури випливають зі стрімкого поширення інформаційних технологій у всіх сферах нашого життя та, відповідно, до зросту уразливостей і потенційних загроз різного характеру. Очевидно, що за таких умов забезпечення кібертехнологій у критичних інфраструктурах (інфраструктурах державного управління, фінансового, банківського, транспортного, енергетичного, ресурсного, комунального та продуктового забезпечення) сучасного суспільства стає одним з головних питань.*

*В контексті необхідності рішення комплексної проблеми забезпечення кіберстійкості цифрових систем управління критичної інфраструктури запропонований новий сигнатурний логіко-поліноміальний підхід до синтезу апаратної надмірності функціонального у реальному масштабі часу контролю арифметичних та логічних операцій цифрових систем, який зводиться до побудови апаратної надмірності комбінаційного типу. Синтез ґрунтується на математичному апараті авторської сигнатурної логіко-поліноміальної алгебри поля  $TSF[2^n, P^m(x)]$ .*

*Ключові слова:* кіберстійкість, критична інфраструктура, інформаційна безпека, методи функціонального контролю цифрових систем.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Сьогодні існує декілька напрямків рішення комплексної проблеми забезпечення інформаційної безпеки функціонування цифрових систем критичної інфраструктури (ЦСКІ), наприклад, шляхом використання методів багаторазового резервування баз даних, резервування апаратних частин цифрових систем і систем в цілому, введення різноманітної інформаційної надлишковості в програмне забезпечення та у процес передачі цифрових даних. З цього приводу слід зазначити, що при побудові математичних моделей функціонального контролю складних систем, до яких відносяться ЦСКІ, неминучим є ряд проблем. Зокрема, ці моделі пов'язані з наявністю асинхронних паралельних процесів, численних внутрішніх зв'язків між елементами системи, великої кількості її параметрів, різноманітних нелінійних обмежень. Тому застосування наведених вище методів для аналізу характеристик контролю таких систем призводить до суттєвого спрощення реальних процесів і, як наслідок, ставить під сумнів адекватність розробленої моделі функціонального контролю за цими методами щодо синтезу ефективних систем оперативного моніторингу стану інформаційної безпеки (кібербезпеки). Виходячи з цього, в першу чергу, актуальною у теоретичному і практичному сенсі стає пошук нового системотехнічного підходу до синтезу кіберзахисених цифрових систем критичної інфраструктури на основі дослідження механізму функціонального (оперативного у часі) контролю

реалізації арифметичних і логічних операцій над двійковими числами (операндами) на єдиній методологічній основі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання проблеми функціонального контролю і на які спирається автор.**

Сьогодні одним із факторів стримування розвитку ефективних методів функціонального (у реальному часі) контролю (ФК) цифрових автоматів є подальше прагнення вибору та обґрунтування моделі ФК шляхом введення апаратної надмірності у вигляді багаторазового дублювання (резервування) ЦА [1]) та інформаційної (кодової) надмірності [2]. Істотним недоліком такого введення інформаційної (кодової) надмірності для кожного двійкового коду є залежність контрольного коду від кратності прояву помилок (ступеню спотворення інформації). Тому найбільш поширеним методом ФК різних типових пристроїв обчислювальної техніки та цифрових керуючих автоматів є **контроль парності-непарності коду двійкового числа (додавання до значущих розрядів кодів чисел не більше одного контрольного розряду)**. Цей метод ФК не забезпечує виявлення кратних помилок [3].

В контексті визначеної проблеми забезпечення ефективного ФК цифрових систем різного призначення відомий ряд робіт [4-11], в яких розглянуті питання вибору моделей апаратного контролю шляхом введення апаратної надмірності (надлишковості). Як правило, кожний автор (автори) формують свою задачу дослідження ФК відносно розгляду окремого конкретного типу та призначення цифрового пристрою. При цьому не враховується, що ці пристрої по своєму функціональному призначенню можуть знаходитись у нерозривному системному єднанні апаратних та програмних засобів цифрових систем відповідного цільового призначення.

**Мета статті.** Обґрунтування та формування пропозиції щодо подальшого напрямку розвитку системотехніки кіберзахистених ЦСКІ шляхом введення уніфікованої структурної (апаратної) надмірності ФК комбінаційного (булевого) типу на основі використання авторського апарату синтезу «сигнатурна логіко-поліномійна алгебра» [12].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Відомо, що єдиною методологічною (системотехнічною) основою всіх арифметичних операцій в цифрових системах є елементарні операції додавання та регістрового зсуву [13]. При цьому слід зауважити, що регістрова операція зсуву знижує швидкість виконання арифметичних операцій. Тому, в контексті сформульованої вище загальної проблеми, пропонується моделі абстракції синтезу апаратної надмірності для функціонального контролю обраних операцій (арифметичних так і булевих логічних) ЦСКІ визначити відповідними (адекватними) їм описами у інфіксній нотації (інфіксними моделями), у вигляді детермінованих контрольних арифметичних функцій. Правомірність такої пропозиції виходить з тенденції розвитку сучасних ЦСКІ на принципах глибокої уніфікації, стандартизації структур сигналів та інтерфейсів.

*Постановка задачі.* Згідно поставленої мети пропонується наступне визначення.

**Визначення 1.** Функціональна кіберконтролепридатність цифрової інформаційно-вимірювальної системи комплексу управління об'єктом критичної інфраструктури — це властивість системи, яка характеризує придатність частини або всіх властивих їй виконуваних цільових обчислювальних операцій  $f_i \in F(X_{[n]})$  над  $n$ -розрядними операндами  $X_{[n]}$  до виявлення заданими засобами функціонального контролю хакерських втручань (інцидентів) в процесі виконання функцій  $f_i$  у реальному масштабі часу.

В контексті сутності визначення 1 модель функціонального контролю ЦСКІ представлена на рис. 1.

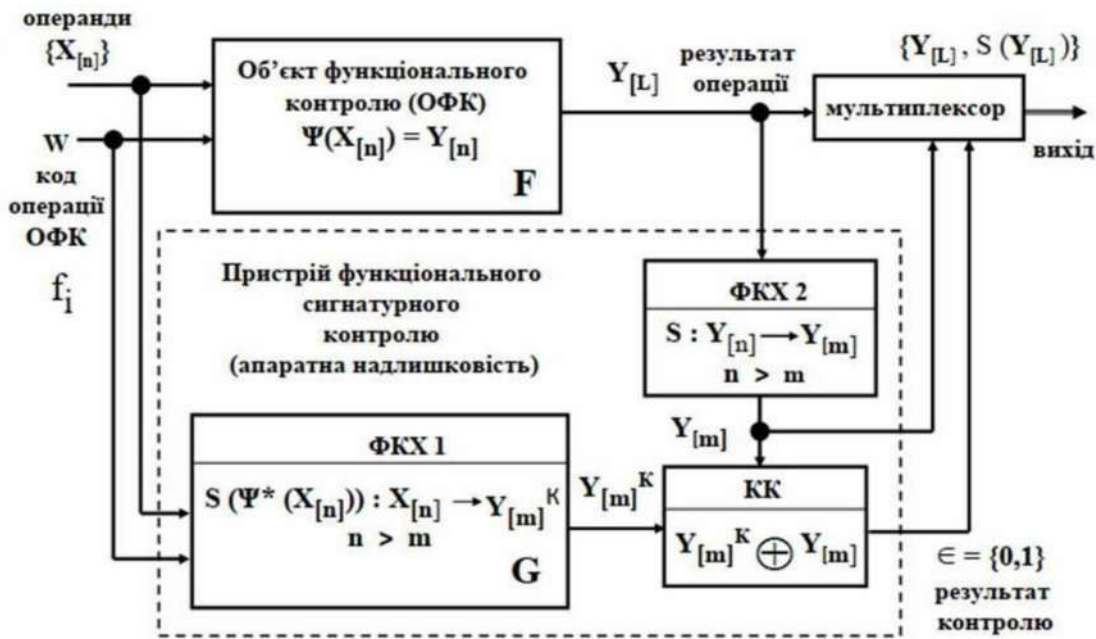


Рисунок 1 – Модель функціонального контролю (авторська модель)

Щодо цієї моделі: об’єкт функціонального контролю (ОФК) — цифровий автомат (арифметико-логічний модуль ЦСКІ) з передавальною функцією  $\Psi$ ; пристрій контролю складається з трьох комбінаційних схем (апаратна надмірність), який в залежності від виду контрольованої функції  $f_i$  здійснює формувачем контрольних характеристик ФКХ 1 сюр’єктивне відображення:

$$S(\Psi^*(X_{[n]})) : X_{[n]} \rightarrow Y_{[m]}^K \tag{1}$$

вхідних двійкових векторів  $X_{[n]}$  довжини  $n$  у вихідні двійкові вектори  $Y_{[m]}^K$  довжини  $m$  ( $n > m$ ) відповідно до повідомлених йому від ОФК іменами (кодами)  $f_i$  контрольованих операцій з множини  $F$ ; здійснює формувачем контрольних характеристик ФКХ 2 сюр’єктивне відображення:

$$S: Y_{[n]} \rightarrow Y_{[m]} \tag{2}$$

вхідних двійкових векторів  $Y_{[n]}$  довжини  $n$  у вихідні двійкові вектори  $Y_{[m]}$  довжини  $m$ ; оператор  $S$  необхідний для кодування векторів довжини  $n$  у відповідні їм вектори довжини  $m$ , щоб забезпечувалася задана достовірність функціонального контролю; компаратор  $m$  — розрядних кодів (КК) здійснює відображення:

$$\delta_{КК} : (Y_{[m]}^K \square Y_{[m]}) \rightarrow \epsilon = \{0,1\} \tag{3}$$

шляхом ідентифікації відповідності кожного вектора виходу ОФК  $y_i \in Y_{[m]}$  з відповідними векторами  $y_{ki} \in Y_{[m]}^K$ .

Згідно встановленим вище вимогам пошуку стандартного набору комбінаційних елементів для синтезу ВК залежність між функціями  $\Psi(X_{[n]})$  та  $\Psi^*(X_{[n]})$  визначимо у інфіксному вигляді (нотації):

$$\Psi(X_{[n]}) = \Psi^*(X_{[n]}) = (\psi_1 * \psi_2 * \dots * \psi_q), \tag{4}$$

де  $*$  та  $\psi_j$  — відповідно логічна операція суперпозиції (комутації) та  $j$ -та елементарна логічна складова універсального представлення логіко-поліноміальним еквівалентом множини  $F$  цільових контролюємих арифметичних та логічних операцій ЦСКІ.

Виходячи з вищезазначеного, сутність задачі забезпечення функціональної кіберконтролепридатності ЦСКІ визначимо так: нехай для заданого ОФК доступними для контролю



$H(A+B)$  — число, код якого характеризує перехід одиниць перенесення при операції складанні чисел  $A$  і  $B$ . Оскільки  $H(A+B)$  встановлює по суті взаємний поліноміальний зв'язок між числами  $A$  і  $B$ , то в сигнатурній алгебрі  $H(A+B)$  визначено як взаємну поліноміальну характеристику двох чисел, які вступають в операцію арифметичного складання.

Приклад 1.  $A = 1011011, B = 0111011$ .

$$H(A+B) = \left( \begin{array}{r} 1011011 \\ \hline 0111011 \\ \hline 11110110 \end{array} \right) \quad \left. \begin{array}{r} 1011011 \\ 0111011 \oplus \\ 11110110 \\ \hline A+B = 10010110 \end{array} \right\}$$

Слід зауважити, якщо операнди  $A$  і  $B$  операції арифметичного складання описуються поліномами  $n$ -го ступеню, а їх характеристика  $H(A+B)$  може описуватися поліномом  $(n + 1)$  ступеню. При цьому задача синтезу формувача характеристики  $H(A+B)$  зводиться до побудови комбінаційного (булевого) вузла, який реалізує на своїх виходах систему булевих функцій:

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 0; \\ h_2 = a_1 b_1; \\ h_{i>2} = h_{i-1}(a_{i-1} \vee b_{i-1}). \quad i = 3, \dots, n+1. \end{array} \right\} \quad (8)$$

В контексті твердження 1 відносно вимоги щодо лінійності оператора  $S$  слід зазначити наступне. В роботі [6] показано, що цей оператор може бути лінійним у разі його векторної інтерпретації (sig) як унарної операції сюр'єктивної згортки двійкового числа  $A$  довжини  $n$  у його контрольну характеристику (сигнатуру) довжини  $m$  по модулю незвідного примітивного полінома  $P^m(x)$  ступеню  $m$  при умові дотримання співвідношення  $n = (2^m - 1)$ . Тобто, сигнатура числа  $A_{[n]}$  є сюр'єктивним відображенням:

$$\text{sig}A_{[n]} = A_{[n]} \text{ mod } P^m(x). \quad (9)$$

Виходячи з цього, у разі логіко-поліноміального еквіваленту арифметичної функції складання  $F^{(+)}$  (7) суперпозиційна формула (алгоритм) функціонального сигнатурного контролю операції арифметичного складання двійкових операндів має вигляд:

$$\text{sig}(A+B) = \text{sig}A \oplus \text{sig}B \oplus \text{sig}H(A+B). \quad (10)$$

Слід зауважити, що у разі, коли розрядність операндів  $n$  значно перевищує ступінь  $m$  полінома формування сигнатур, запропонований авторський метод коректного рішення цієї ситуації - блоково-композиційний метод формування контрольних сигнатур функціонування цифрових систем на основі властивостей сигнатурного поля  $\text{TSF}[2^n, P^m(x)]$  (Turkalo signature field) [17, 18].

З вищезазначеного, в контексті моделей (7) і (10) доказано:

1. Оскільки операція арифметичного складання двійкових чисел є основою операцій віднімання, множення і ділення двійкових чисел, то результат будь-якої арифметичної функції (операції) може бути представлений її логіко-комбінаційним еквівалентом і, як слідство, – сигнатурним поліномом (права частина рівняння (10)) згідно визначенню: *сигнатурна формула у вигляді суми по модулю два сигнатур називається сигнатурним поліномом, якщо хоча б одна з сигнатур пов'язана з взаємною поліноміальною характеристикою двох операндів  $H[A+B]$ .*

2. Алгоритм функціонального сигнатурного контролю будь-якої бінарної двійкової логічної операції в функціонально повній системі логіко-поліноміальної сигнатурної алгебри В.Тупкало може бути представлений як *сигнатурний поліном*.

**Висновки.** Наукова новизна отриманих теоретичних результатів по суті закладає новітній напрямок системології розвитку цифрових систем критичної інфраструктури - функціональний сигнатурний контроль цифрових систем шляхом введення в об'єкти контролю уніфікованої структурної (апаратної) надмірності комбінаційного (булевого) типу на основі використання апарату синтезу «сигнатурна логіко-поліноміальна алгебра поля  $\text{TSF}[2^n, P^m(x)]$ ».

## ЛІТЕРАТУРА

1. Методи підвищення надійності. Основні поняття та види резервів. URL: Резервування.pdf (ztu.edu.ua) (дата звернення: 14.03.2025)
2. Блейхут Р. 1986 Теорія и практика кодов, контролюючих ошибки. Мир. 576 с.
3. Ашаріна І. В. Проблеми організації обчислювань в багатомашинних обчислювальних системах з програмно-керуємою збої та відмовостійкістю, 2021. Частина I. АТ «НДІ«Субмікрон». 20 с.
4. Контроль роботи цифрового автомату. Систематичі коды. URL: [https://koralexand.ua/?page\\_id=129](https://koralexand.ua/?page_id=129) (дата звернення: 15.03.2025)
5. Застосування контролю інформаційних слів та їх адрес по mod 3 в цифрових пристроїв автоматики. URL: <https://works.doklad.ru/view/MWsnkSFwF8/all.html> (дата звернення: 15.03.2025)
6. Якимець Н., Харченко В. Відмовостійкі цифрові системи управління з програмованою логікою на основі частково працездатних автоматів: моделі та реалізація. НАУ ім. Н.С. Жуковського, "ХАІ". Системи броби інформації. Випуск 4 (62), 2007. С. 134-138.
7. Федухін А., Сеспедес Гарсія П. До питання про структури стійких до відмов комп'ютерів фірми stratus computer inc. Математичні машини та системи. № 4, 2018. С. 87-100.
8. Методи апаратного контролю. URL: <https://studfile.net/preview/9099982/page:17/> (дата звернення: 10.03.2025)
9. Програмно-логічні методи контролю. URL: <https://studfile.net/preview/9099982/page:18/> (дата звернення: 10.03.2025)
10. Числовий та цифровий контроль. URL: <https://studfile.net/preview/4354159/page:15/> (дата звернення: 10.03.2025)
11. Окремі випадки контролю за модулем. Способи побудови схем згорток. URL: <https://studfile.net/preview/4354159/page:16/> (дата звернення: 12.03.2025)
12. Тупкало В.М. Розробка моделей кіберстійких інформаційних систем управління на основі використання математичного апарату сигнатурної алгебри: *авторське свідоцтво* № 131020; заяв. 31.10.2024; опубл. 29.11.2024, Бюл. № 84.
13. Самофалов К., Корнейчук В., Романкевич А. Прикладна теорія цифрових автоматів. Київ: Вища шк. Головне вид-во, 1987. 375 с.
14. Тупкало В.М. Розробка моделей кіберстійких інформаційних систем управління на основі використання математичного апарату сигнатурної алгебри. V Міжнарод. наук.-практ. конф. «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», зб. тез доп. Львів: ЛА «Піраміда», 2021. С. 186-187.
15. Вітушкін А.Г. 2004 13-а проблема Гільберта та суміжні питання. УМН. Т. 59, № 1(355), 2004. С. 11–24.
16. Тупкало В.М. Основи теорії сигнатурного контролю цифрових систем: монографія. МінОборони України, 1994. 324 с.
17. Тупкало В.М. Блоково-композиційний метод формування контрольних сигнатур функціонування цифрових систем на основі властивостей сигнатурного поля  $TSF[2^n, P^m(x)]$ : авторське свідоцтво № 133106. Дата реєстрації 04.03.2025..
18. Tupkalo V. Block-composition method of forming control signatures of digital systems operation based on the properties of the signature field  $TSF[2^n, P^m(X)]$ . Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. № 4, 2024. P. 206-215.

## REFERENCE

1. Methods for increasing reliability. Basic concepts and types of reserves. URL: Reserve.pdf (ztu.edu.ua) (access date: 14.03.2025)
2. Bleikhut R. 1986 Theory and practice of error-controlling codes. Mir. 576 p.
3. Asharina I. V. Problems of organizing calculations in multi-machine computing systems with software-controlled failure and fault tolerance, 2021. Part I. JSC «NDI» Submicron. 20 p.

4. Control of the operation of a digital automaton. Systematic codes. URL: [https://koralexand.ua/?page\\_id=129](https://koralexand.ua/?page_id=129) (access date: 15.03.2025)
5. Application of control of information words and their addresses by mod 3 in digital automation devices. URL: <https://works.doklad.ru/view/MWsnkSFwF8/all.html> (access date: 15.03.2025)
6. Yakimets N., Kharchenko V. Fault-tolerant digital control systems with programmable logic based on partially operational automata: models and implementation. NAU named after N.E. Zhukovsky, "KHAI". Information processing systems. Issue 4 (62), 2007. P. 134-138.
7. Fedukhin A., Cespedes Garcia P. On the question of structures of fault-tolerant computers of the company stratus computer inc. Mathematical machines and systems. No. 4, 2018. Pp. 87-100.
8. Methods of hardware control. URL: <https://studfile.net/preview/9099982/page:17/> (date of access: 10.03.2025)
9. Software-logical control methods. URL: <https://studfile.net/preview/9099982/page:18/> (date of access: 10.03.2025)
10. Numerical and digital control. URL: <https://studfile.net/preview/4354159/page:15/> (date of access: 10.03.2025)
11. Certain cases of control by module. Methods of constructing schemes convolutions. URL: <https://studfile.net/preview/4354159/page:16/> (date of access: 12.03.2025)
12. Tupkalo V.M. Development of models of cyber-resistant information systems management based on the use of mathematical apparatus of signature algebra: author's certificate №. 131020; application. 31.10.2024; publ. 29.11.2024, Bull. No. 84.
13. Samofalov K., Korneychuk V., Romankevych A. Applied theory of digital automata. Kyiv: Higher school. Main publishing house, 1987. 375 p.
14. Tupkalo V.M. Development of models of cyber-resistant information systems management based on the use of mathematical apparatus of signature algebra. V International scientific and practical conference "Quality management in education and industry: experience, problems and prospects", collection of abstracts of additional Lviv: LA "Pyramid", 2021. P. 186-187.
15. Vitushkin A.G. 2004 Hilbert's 13th problem and related issues. Uspekhi Mater. Vol. 59, No. 1(355), 2004. P. 11–24.
16. Tupkalo V.M. Fundamentals of the theory of signature control of digital systems: monograph. Ministry of Defense of Ukraine, 1994. 324 p.
17. Tupkalo V.M. Block-composition method for forming control signatures of the functioning of digital systems based on properties of the signature field  $TSF[2n, Pm(x)]$ : author's certificate №. 133106. Registration date 04.03.2025.
18. Tupkalo V. Block-composition method of forming control signatures of digital systems operation based on the properties of the signature field  $TSF[2n, Pm(X)]$ . Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. No. 4, 2024. R. 206-215.

*Tupkalo V.M., Bogomya V. I., Yarmolatiy A. V.*

## **CONCEPTUAL BASIS OF SYSTEMS ENGINEERING OF CYBER-PROTECTED DIGITAL SYSTEMS BASED ON THE USE OF THE APPARATUS FOR SYNTHESIS OF SIGNATURE ALGEBRA**

*Ensuring the security and sustainability of national critical infrastructure is a priority area of security policy today, since critical infrastructure provides vital services for the population, society and the state, without which safe existence and ensuring an adequate level of national security are impossible. The main reasons for the criticality of the information component of the infrastructure stem from the rapid spread of information technologies in all areas of our lives and, accordingly, the growth of vulnerabilities and potential threats of various kinds. It is obvious that in such conditions, ensuring cyber technologies in critical infrastructures (infrastructures of public administration, financial, banking, transport, energy, resource, utilities and food supply) of modern society is becoming one of the main issues.*

*In the context of the need to solve the complex problem of ensuring cyber resilience of digital control systems of critical infrastructure, a new signature logical-polynomial approach to the synthesis of functional hardware redundancy in real time for monitoring arithmetic and logical operations of digital systems is proposed, which is reduced to the construction of hardware redundancy of a combinational type. The synthesis is based on the mathematical apparatus of the author's signature logical-polynomial algebra of the  $TSF[2n, Pm(x)]$  field.*

**Keywords:** *cyber resilience, critical infrastructure, information security, methods of functional control of digital systems.*

*Стаття прийнята 20.03.2025*

## Автори випуску

Богом'я В.І., д.т.н., професор, професор кафедри кібербезпеки, інформаційних технологій та економіки, <https://orcid.org/0000-0003-4403-3130>, e-mail: bog2603@ukr.net, Київський університет інтелектуальної власності та права

Богом'я В.І., д.т.н., професор, професор кафедри кібербезпеки, інформаційних технологій та економіки, <https://orcid.org/0000-0003-4403-3130>, e-mail: bog2603@ukr.net, Київський університет інтелектуальної власності та права

Боріна Маргарита Вікторівна – здобувачка кафедри навігації та управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій <https://orcid.org/0009-0007-4859-8477>

Васалатій Надія Василівна, Одеський національний морський університет. Кафедра «Навігація і керування судном», к.геогр.н., доцент каф. навігації і керування судном, Одеський національний морський університет. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7188-9922>; e-mail: [vnv79100@ukr.net](mailto:vnv79100@ukr.net).

Головань Андрій Ігорович, доктор технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, ORCID: 0000-0001-6589-4381, e-mail: [g.onmu@ukr.net](mailto:g.onmu@ukr.net),

Гончарук Ірина Павлівна, кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, ORCID: 0000-0002-5306-4206, e-mail: [irina\\_pavlovna\\_goncharuk@ukr.net](mailto:irina_pavlovna_goncharuk@ukr.net).

Гусак Ірина Леонідівна - доктор філософії спеціальність Морський та внутрішній водний транспорт, заступник директора з навчальної роботи ВСП «Київський фаховий коледж морського і річкового флоту та транспортних технологій ДУІТ», orcid 0009-0007-9619-3271

Калініченко Григорій Євгенович, к.т.н., викладач фахового коледжу морського транспорту, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: [nsgrphon@gmail.com](mailto:nsgrphon@gmail.com), ORCID 0009-0008-8201-3441

Калініченко Євгеній Володимирович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри навігації і керування судном, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: [kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com](mailto:kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com), ORCID 0000-0003-2898-7313

Капочкін Борис Борисович – к.г.-м.н., провідний науковий співробітник Науково-дослідного центру ЗС України “Державний океанаріум” Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, ORCID <https://orcid.org/0009-0009-9461-1411>; email: [tsb1@ukr.net](mailto:tsb1@ukr.net);

Капочкіна Маргарита Борисівна – к.т.н., доцент каф. навігації і керування судном, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7004-3503>; email: [margo-92@ukr.net](mailto:margo-92@ukr.net);

Капочкіна Маргарита Борисівна – к.т.н., доцент каф. навігації і керування судном, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна ORCID Link: <https://orcid.org/0000-0002-4893-2523>; email: [margo-92@ukr.net](mailto:margo-92@ukr.net);

Кириллова Олена Вікторівна – д.т.н., проф., зав. каф. «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт», Одеський національний морський університет ORCID <http://orcid.org/0000-0002-3414-7364>

Кириченко Олександр Сергійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, ORCID 0000-0003-0545-4493; [oskyrychenko@gmail.com](mailto:oskyrychenko@gmail.com)

Колеснік Олександр Володимирович, старший викладач кафедри навігації і керування судном, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, E-mail: [capt.vandalex@gmail.com](mailto:capt.vandalex@gmail.com), ORCID 0009-0003-3713-2015

Куропятник Олексій Андрійович – доктор філософії, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри судових енергетичних установок Заблоцький Юрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри судових енергетичних установок, [orcid.org/0000-0002-6207-8802](https://orcid.org/0000-0002-6207-8802)

Кучеренко Наталія Василівна – к.г.н., доцент, провідний науковий співробітник Науково-дослідного центру ЗС України “Державний океанаріум” Інституту Військово-Морських Сил Національного університету “Одеська морська академія”, м. Одеса, Україна, ORCID [orcid.org/0009-0009-9461-1411](https://orcid.org/0009-0009-9461-1411); email: [tulp230247@ukr.net](mailto:tulp230247@ukr.net)

Кучерук Галина Юріївна, д.е.н., професор, професор кафедри психології Київського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури і технологій ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6716-6791>

Ларіна Ірина Миколівна – аспірант кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт», Одеський національний морський університет ORCID <http://orcid.org/0009-0005-1169-7223>

Лопатюк Світлана Петрівна – доцент, к.т.н., доцент кафедри природничо-технічного забезпечення діяльності водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, <https://orcid.org/0000-0003-3669-6110>

Лучко Олександра Сергіївна, здобувачка 4 курсу спеціальності 053 Психологія ОПП «Практична психологія» Київського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури і технологій

Мазур Тетяна Миколаївна – ст. викладач каф. «Суднові енергетичні установки і системи», Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», ORCID <https://orcid.org/0009-0008-7816-145X>

Монюшко Марина Михайлівна, к.геогр.н., доцент каф. навігації і управління судном, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія». ORCID <https://orcid.org/0009-0009-1488-8972> e-mail: [Moniuszko@ukr.net](mailto:Moniuszko@ukr.net)

Науменко Андрій Вікторович – аспірант кафедри навігації і керування судном, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8025-2790>, e-mail: [capitannaumenko@gmail.com](mailto:capitannaumenko@gmail.com);

Сагін Сергій Сергійович – доктор філософії, капітан далекого плавання, [orcid.org/0009-0008-4147-5172](https://orcid.org/0009-0008-4147-5172)

Сагін Сергій Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія». [orcid.org/0000-0001-8742-2836](https://orcid.org/0000-0001-8742-2836)

Тарасенко Тетяна Владиславівна – к.т.н., доцент, зав. каф. «Інженерні дисципліни», Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8107-3524>

Томчаковський Георгій Георгійович – КДП, ст. викладач каф. навігації і керування судном, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна ORCID Link: <https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>; email: [gtomchakovsky@gmail.com](mailto:gtomchakovsky@gmail.com)

Тупкало В.М., д.т.н., професор, професор кафедри кібербезпеки, інформаційних технологій та економіки, <https://orcid.org/0000-0002-6594-530X>, e-mail: [tvn.prof@gmail.com](mailto:tvn.prof@gmail.com), Київський університет інтелектуальної власності та права

Тупкало В.М., д.т.н., професор, професор кафедри кібербезпеки, інформаційних технологій та економіки, <https://orcid.org/0000-0002-6594-530X>, e-mail: [tvn.prof@gmail.com](mailto:tvn.prof@gmail.com), Київський університет інтелектуальної власності та права

Черой Людмила Іванівна – старший викладач кафедри навігації і управління судном, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія». ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5413-4464> e-mail: [cheroi@dinuoma.com.ua](mailto:cheroi@dinuoma.com.ua)

Ярмолатій Андрій Вікторович., викладач кафедри кібербезпеки, інформаційних технологій та економіки, <https://orcid.org/0009-0004-8655-9928>, e-mail: [ayarmolatii@gmail.com](mailto:ayarmolatii@gmail.com), Київський університет інтелектуальної власності та права.

Ярмолатій Андрій Вікторович., викладач кафедри кібербезпеки, інформаційних технологій та економіки, <https://orcid.org/0009-0004-8655-9928>, e-mail: [ayarmolatii@gmail.com](mailto:ayarmolatii@gmail.com), Київський університет інтелектуальної власності та права