

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

Збірник наукових праць

випуск 2 (36)

**Київ
2022**

Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2022. – Випуск 2(36). – 258 с. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36>

У збірнику публікуються матеріали, що відображають наукову й методичну роботу викладачів і аспірантів Державного університету інфраструктури та технологій, 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 чотири тематичні розділи: «Судноводіння та енергетика суден», «Методика навчання», «Інформаційні технології», «Екологічна безпека».

Засновник: Державний університет інфраструктури та технологій

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

Телефон: +38(044) 482-51-38; +38(050) 398-47-96

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

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

Головний редактор – доктор технічних наук, професор **Тимошук О.М.**

Редакційна колегія:

Слезаров О.П., к.ю.н., доцент (ДУІТ); Сьомін О.А., к.т.н (ДУІТ); Горобченко О.М., д.т.н., професор (ДУІТ); Дубинець О.І., д.т.н., професор (ДУІТ); Фомін О.В., д.т.н., професор (ДУІТ); Ганношина І.М., к.т.н., доцент (ДУІТ); Скляренко І.Ю., к.пед.н., доцент (ДУІТ); Сагін С.В., д.т.н., професор (Одеська національна морська академія); Сербін С.І., д.т.н., професор (Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв); Соломенцев О.В., д.т.н., професор (Національний авіаційний університет, Київ); Варбанець Р.А., д.т.н., професор (Одеський національний морський університет); Тихонов І.В., д.т.н., с.н.с., к.д.п. (ДУІТ); Кравченко Ю.В., д.т.н., професор (Київський національний університет імені Т.Г. Шевченко); заслужений діяч науки і техніки України Оніщенко О.А. д.т.н., професор (Національний університет «Одеська морська академія»); Шаріфов З. З., д.т.н., професор (Азербайджанська морська державна академія); Гафаров А. М., д.т.н., професор (Міністерство з надзвичайних ситуацій Азербайджана); Мамедов А.Т., д.т.н., професор (Азербайджанський технічний університет); Прієднієкс В. Р., д.т.н., професор (Латвійська морська академія); Діасамідзе М. Р., д.т.н., професор (Батумська 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 № 4 від 6 грудня 2022 р.)

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 23216-13056ПР від 23.02.2018 р.

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 (Наказ Міністерства освіти і науки України від 28.12.2019 № 1643).

ЗМІСТ

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

Горбань А.В., Сагіова К. Інтегральне оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій у морських перевезеннях.....	5
Калініченко Є. В., Бойко А.Д., Постников Є.Є. Метод оцінки узагальненого ризику виникнення аварійних морських подій у системі управління безпекою судноплавства.....	20
Давидов В.С., Доронін В.В., Любарець І.О. Особливості управління та навігації великогабаритних контейнеровозів при їх експлуатації у складних навігаційних та гідрометеорологічних умовах.....	30
Грецьких Д.В., Алексєєв В.О., Гомозов А.В., Катрич В.О., Нестеренко М.В. Розробка практичних рекомендацій для проектування реконфігурованих ректен, які використовуються в різних системах безпровідної передачі енергії	38
Ревенко В. Ю. Порівняльне оцінювання впливу атмосферного середовища на зміну радіолокаційної дальності до об'єктів, що спостерігаються, на двох діапазонах хвиль судновою РЛС	54
Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малообертового двигуна в умовах сучасної тенденції щодо зниження експлуатаційної швидкості суден	72
Савчук В.П., Білоусов Є.В., Курносенко Д.В., Тулученко Г.Я. Вплив технічного стану елементів масляної системи високообертового дизеля Д 246.4 на параметри пульсацій тиску моторного масла	84
Сьомін О.А., Кукалець Л.М. Врахування критерію купівельної спроможності при проектуванні та оновленні пасажирських суден внутрішнього і змішаного плавання.....	97
Сапіга В. В., Онищенко О. А., Шуміло О. М. Розвиток сучасних військово-морських сил збройних сил України: модульні концепції.....	104
Мельник О.В., Сорока В.В., Довгаль І.І. Математична модель оцінювання змашувальної здатності суднових дистилятних палив	120
Ганношина І.М., Калініченко Т.В., Нікітін П.В. Дослідження методів прогнозування руху, пошуку та супроводження морських об'єктів.....	135

Маслов І.З., Фуклев О.І. Дослідження моделі та методи розрахунку гідродинаміки судна на хвилюванні	150
Горалік Є.Т., Крюков М.М., Лупіна Т.О. Оцінка впливу зміщення центру мас рятувальної шлюпки вільного падіння відносно опорної поверхні на її рух при скиданні з судна	165
Бажак О.В., Іваненко В.М., Рященко О.І., Лігагенко В.В. Охоронні заходи на судах і в портах у призьмі протидії тероризму і піратству на морі	176
Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах	184
Дубинець О.І., Гімпель Р.М., Бойко С.О., Маннапова О.В. Дослідження можливостей теплотехнічного контролю парового котла у складі суднової енергетичної установки на основі машинного навчання	194
Трофименко І.В., Бажак О.В., Іваненко В.М., Рященко О.І. Кодекс з охорони суден і портових засобів як методична основа для підвищення якості охоронних заходів на судах і портових об'єктах	203
МЕТОДИКА НАВЧАННЯ	
Голікова В.В., Крайнова В.І., Парменова Д.Г., Сінюта К.О. Особливості ергономіки робочого місця майбутніх фахівців водного транспорту.....	218
Коскіна Ю.О. Особливості викладання дисципліни «фрахтування» бакалаврам з транспортних технологій (на морському та річковому транспорті).....	224
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА	
Лопатюк С.П. Взаємозалежність зміни клімату і безпеки нашого майбутнього.....	232
Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності судових енергетичних установок у водному середовищі	240
АВТОРИ ВИПУСКУ	253
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ	257

Горбань А.В., Carjova K.

ІНТЕГРАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ У МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

Забезпечення безпеки на водному транспорті є одним із пріоритетних завдань транспортних стратегій підприємств. Оскільки виникнення надзвичайних ситуацій (НС) у процесі переміщення вантажів/пасажирів у часі та просторі відбувається внаслідок негативного впливу різної природи факторів, актуальним є завдання запобігання або зниження їх негативного впливу. Слід зазначити, що до процесу мультимодальних перевезень залучені, як правило, кілька видів транспорту, технологічних ліній, засобів малої механізації, спеціалістів різних напрямків. Для виконання перевезень необхідно реалізувати значну кількість різнопланової діяльності, серед яких важливе значення має проектування транспортно-логістичних систем (ТЛС) вантажів. Важливим розділом проектів ТЛС є опрацювання питань забезпечення безпеки, що і визначає актуальність виконання магістерської роботи. у ході дослідження виконані такі завдання: визначено та систематизовано структуру факторів ризику надзвичайних ситуацій у морських та мультимодальних вантажоперевезеннях; розроблено методичні підходи до оцінювання ризику та прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій у процесі морських та мультимодальних вантажоперевезень; розроблено метод інтегральної оцінки ризиків надзвичайної ситуації, критерії оцінки, ефективності та безпеки транспортно-логістичних схем морських та мультимодальних вантажоперевезень

Ключові слова: морські перевезення, навігація, надзвичайні ситуації

Мета дослідження полягає у підвищенні рівня безпеки при організації морських перевезень за рахунок методу інтегральної оцінки ризиків та способів управління ними при надзвичайних ситуаціях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, і на які спираються автори. Проблеми безпеки вантажоперевезень на транспорті розглядалися у роботах багатьох вітчизняних та зарубіжних науковців. Так, Желібо Є.П. [1] розглянув деякі методичні підходи до управління ризиками та можливість їх застосування для вирішення практичних завдань у галузі мореплавання.

Лук'янова В.В. розглядає проблеми виникнення природних і техногенних надзвичайних ситуацій, акцентуючи особливу увагу на їх запобігання та ліквідацію наслідків в умовах мирного та воєнного часу. Питання державного регулювання у сфері захисту населення та територій від НС розглядаються у відповідних нормативних документах. Аналіз проблем безпеки морських вантажоперевезень показує, що рівень аварійності морського флоту залишається високим.

На даний час проблема управління ризиками та їх оцінка у різних галузях, зокрема, в мореплаванні є актуальною, їй присвячені роботи багатьох вітчизняних та зарубіжних авторів. Теоретичні та практичні аспекти управління ризиками досліджували багато вчених. Проте саме аналіз стану управління ризиками на транспортних підприємствах недостатньо висвітлений у літературі.

Діяльність транспортних підприємств тісно пов'язана з екологічними ризиками. Тому праця О.О. Бакуліч, І.Р. Кіс, В.О. Занори [3] про тенденції управління екологічними ризиками транспортних проектів є досить актуальною, але містить обмежене коло

аналітичної інформації.

Теоретичні аспекти ризиків у транспортних процесах висвітлює І.О. Ткаченко [4]. Управління ризиками та змінами у процесах прийняття управлінських рішень розглядають О.Б. Данченко та В.О. Занора [5], проте саме ризики на транспорті не розкриті. Ризики на транспортних підприємствах через призму оцінки їх інтегральної стійкості досліджено у праці С.М. Семенової, І.С. Ковової, С.М. Шуляренко, О.М. Шпирко, Т.О. Букорос [6], де серед основних показників зазначено обсяги перевезень, кількість підприємств, чисельність працівників, рентабельність діяльності.

У своїй праці І.В. Федулова та Г.Т. П'ятницька [7] основну увагу приділяють методиці та інструментам управління ризиками щодо фінансової безпеки підприємства, виділяючи причини (ідентифікація ризиків) та наслідки (ідентифікація кризи).

Серед наслідків ризику: втрати, збитки, порушення ліквідності, платоспроможності, погіршення рентабельності та стійкості визначаються як ідентифікатори кризи, які в подальшому можуть посилювати ризик продовження негативних тенденцій на підприємстві. Висвітлюючи питання інформаційного забезпечення аналізу ризиків, О.А. Зоріна [8] наголошує на складності ідентифікації та класифікації ризиків через їх різноманітність і неоднозначність трактування, неоднорідність й динамічність інформації про бізнес-процеси, залежність від внутрішніх і зовнішніх факторів. Поділяємо ці погляди науковця і пропонуємо оцінювати стан управління ризиками транспортних підприємств на основі результативних внутрішніх і зовнішніх показників.

Виклад основного матеріалу. Транспорт впливає на розвиток виробничої та будівельної галузей, торгівлі, сільського господарства та науки, а також цілого ряду інших галузей, сталий розвиток яких залежить від нього.

Сьогодні як ніколи є актуальними проблеми безпеки. Саме тому на державному рівні розробляються законодавчі акти, що визначають правові основи безпеки діяльності людини і вантажних перевезень на всіх видах транспорту. У дослідженнях, присвячених надійності та безпеці вантажоперевезень наголошується, що безпека є специфічною властивістю технологічних процесів, яку не слід змішувати із властивістю надійності [9; 10].

Останнім часом в Україні і за кордоном викликає тривогу збільшення кількості техногенних аварій та стихійних лих. Розвиток транспорту в останні роки здійснювався відповідно до окремих цільових державних та галузевих програм. Проте ці програми, розроблені без належної ув'язки одна з одною, не підкріплювалися відповідною бюджетною підтримкою.

Що стосується морського транспорту, то з недавнього часу у діяльності ряду класифікаційних товариств та великих судноплавних компаній застосовується методичний підхід до зменшення кількості аварій на морі – формалізована оцінка безпеки (ФОБ) або (Formal Safety Assessment, FSA). Міжнародна морська організація (ІМО) визначає його так: «Структурована і систематична методологія, що має на меті підвищити безпеку на морі, включаючи захист життя, здоров'я, середовища та майна шляхом оцінювання ризиків та співвідношення витрат та вигід» [33].

Питанням управління ризиками на транспортних підприємствах присвячено небагато праць, зокрема аналітична складова оцінювання стану управління ризиками висвітлена недостатньо. Більшість публікацій та досліджень зосереджують увагу на розкритті теоретичних та методологічних аспектів, механізмів, інструментів управління, проте питання оцінки, аналізу стану управління ризиками на транспортних підприємствах практично не розкриті. Це пов'язано зі складністю проведення такого оцінювання, вибором показників та індикаторів, які спирались би на доступну інформацію та дозволяли сформулювати висновок про ефективність управління ризиками на транспортних підприємствах. Крім того, ризики є не повністю детермінантною категорією, їх не завжди

можна кількісно оцінити, вони тісно пов'язані з низкою інших аспектів діяльності компаній.

Ризик, будучи невід'ємною частиною економічного, політичного, соціального життя суспільства, неминуче супроводжує всі сфери діяльності та напрямки будь-якої організації, у тому числі, що займається перевезеннями на морському транспорті. Тому головним та неодмінним критерієм нормальної дієздатності сучасного підприємства морського транспорту є вміння вищого керівництва, спираючись на суворо наукову основу, прогнозувати, проводити профілактику, раціонально контролювати та ефективно керувати ризиками.

Аналіз тенденцій і перспектив розвитку міжнародних морських перевезень показує, що зі збільшенням обсягів вантажоперевезень підвищується рівень аварійності. Разом з тим, при розробці ТЛС доставки вантажів недостатня увага приділяється оцінці факторів ризику та зниженню ступеня їх впливу на процес перевезення. Значною мірою це пояснюється недостатньо розробкою питань кількісної оцінки ризиків. У більшості методиках оцінки рівня ризику, що використовуються на практиці, акцент робиться на характеристиці ймовірності настання несприятливої події, а не на величині можливих втрат.

Розглянемо існуючі методичні підходи до оцінки ризиків під час морських перевезень, які використовуються в даний час на будь-якому підприємстві з метою управління безпекою мореплавання.

1. Методика формальної оцінки безпеки (FSA).

Шкала ризику має три сфери. Одну їх утворює зневажливий ризик, іншу – ризик настільки великий, що він вважається надмірним чи неприйнятним. Між ними розташовується область прийняттого ризику, розмір якого не настільки малий, щоб з ним не зважати, але в той же час і не настільки великий, щоб вважати його надмірним. Прийнятним є рівень ризику техногенної діяльності, який суспільство готове прийняти задля одержуваних економічних та соціальних вигод.

Відповідно до прийнятих у світовій практиці підходів неприпустимим вважається індивідуальний ризик, що перевищує $1 \cdot 10^{-4}$ 1/рік (протягом року від аварій гине 1 особа з 10 000). Якщо рівень ризику лежить у діапазоні $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ 1/рік, необхідно вжити спеціальних заходів для управління ним. Значення ризику $1 \cdot 10^{-6}$ 1/рік в економічно розвинених країнах зазвичай приймається як допустимий рівень ризику. У цьому випадку вважається, що заходи безпеки, вжиті в цій сфері діяльності, знаходяться на такому високому рівні, що їм не потрібно спеціального втручання для подальшого їх вдосконалення.

2. Застосування теорії нечітких множин з метою оцінки ризику виникнення аварій на морських судах.

При оцінці безпеки на основі концепції прийняттого ризику виникає необхідність визначення частоти реалізації аварій, можливих при експлуатації судових технічних засобів. Для цього зазвичай використовуються «дерева відмов», при побудові яких необхідно мати дані про частоту відмов елементів, що входять до складу механічних установок та систем. За наявності достатньої кількості статистичних даних частота відмов може бути знайдена з використанням виразу:

$$\lambda_A = N/n * T, \quad (1)$$

де N – кількість аварійних відмов; n – кількість обладнання одного типу в однакових умовах експлуатації; T – період розгляду.

Однак залежність (2.2), що широко використовується в теорії надійності, застосовна лише в тому випадку, якщо події, що розглядаються, однорідні і мають масовий характер. Але, вивчаючи статистичні дані про роботу судового обладнання, що експлуатується в різних умовах і режимах навантаження, недоречно говорити про статистичну однорідність

подій, і, отже, допустимість застосування цієї формули може бути поставлена під сумнів. При оцінці ризику внаслідок відсутності необхідної кількості статистичних даних та їх низької достовірності, відчувається дефіцит інформації про безпомилковість дій членів суднового екіпажу, силу та частоту несприятливих впливів на судно з боку навколишнього середовища.

Необхідність урахування наближеної інформації викликана нестаціонарністю та неергодичністю процесів у людино-машинних системах. Вихід із цих проблем можна знайти за допомогою теорії нечітких множин. Найперспективніший шлях полягає у заміні точкових оцінок частот чи ймовірностей конкретних передумов їх інтервальними оцінками, вираженими у вигляді нечітких величин і чисел.

3. Ранжування як базовий елемент оцінки ризиків

Існує чотири основні способи ранжування ризиків (рис. 1):

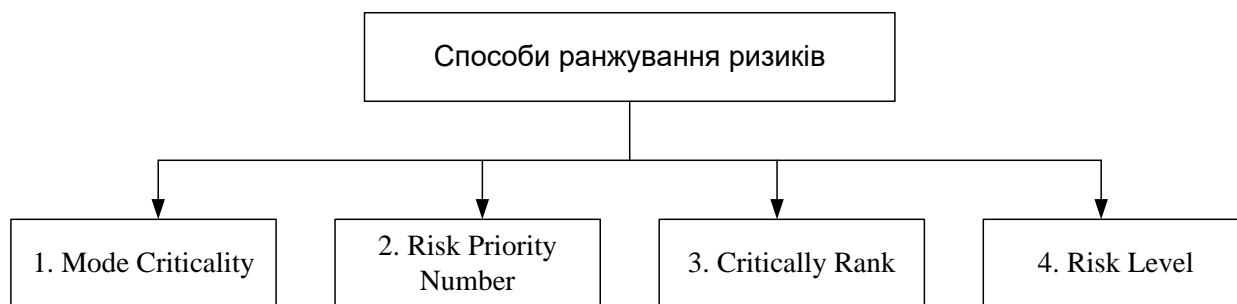


Рисунок 1 – Способи ранжування ризиків

Критичність виду відмови (Mode Criticality) – кількісний показник ризику, що використовується в аналізі критичності для кожного виду відмов. Відмова є подією, що передує ряду небажаних подій з різним ступенем тяжкості результату.

Умовна величина ризику (RPN – Risk Priority Number) – чисельний параметр, що характеризує ризик, і вимірюється в інтервалі 1 – 1 000. Вона є добутком трьох величин, значення яких визначає експерт в інтервалі 1 – 10: серйозність наслідків відмови S, можливості виникнення відмови Q та можливості його виявлення D.

Ранг критичності (Critically Rank) – показник, що описує величину ризику, яка є систематизацією критичності різних видів відмов, здійснювану з допомогою відомого принципу ранжування по Парето, коли виконується послідовне зменшення обсягу аналізованої вибірки. Вид відмови описується експертом одночасно з погляду серйозності його наслідків і ймовірності появи. Ранг критичності визначається всім видам відмов у вигляді встановлення виду відмови, має найменшу величину ризику з усіх досліджуваних, тобто здійснюється пошук того виду відмови, в якого, наприклад, величина ризику є найменшою (якщо за шкалу прийнята величина ризику).

При цьому здійснюється послідовне зменшення на один вид відмови, що розглядається, зі складу групи досліджуваних. Відмові, яка має найменшу критичність, присвоюється ранг критичності 1, далі розглядаються відмови, що залишилися, і відмові з найменшою критичністю присвоюється ранг критичності 2 й т. д. Таким чином, кількість рангів критичності в цьому випадку збігається з кількістю видів відмов, а процедура полягає в упорядкуванні видів відмов за рангом критичності. При встановленні шкали, за допомогою якої виду відмови надається той чи інший ранг критичності, найбільшого поширення набуло визначення ризику як добутку ймовірності настання несприятливої події f Q на його наслідки C;

Величина (рівень) ризику (Risk Level) – величина, що дозволяє одночасно ранжувати всі види відмов, фактично є розбиття величин ризиків на встановлену кількість категорій,

на відміну від способу, наведеного раніше, коли кількість категорій дорівнювало кількості видів відмов.

4. Матриця ризиків

Широке поширення набув спосіб встановлення категорії ризику за допомогою матриці ризику. Застосування матриці ризиків дозволяє ранжувати ризики, які важко виражати у вартісному еквіваленті, так само як ризики, пов'язані із забрудненням навколишнього середовища. Кількість областей у матриці ризиків пов'язана з наявним набором можливих управлінських рішень. Природно, що мінімальна кількість альтернативних рішень дорівнює двом, тому матриця ризику принаймні повинна включати мінімум дві області.

Американське бюро судноплавства передбачило лише три області у матриці ризиків: 1 – область високих ризиків; 2 – область середніх ризиків та 3 – область низьких ризиків. Ймовірність настання несприятливого наслідку може ранжуватися як: 1 – часте (частіше 1 на рік); 2 – можливе (від 0,1 до 1 разу на рік); 3 – рідкісне (від 0,01 до 0,1 випадку на рік); 4 – малоймовірне (від 0,001 до 0,01 випадків на рік); 5 – неймовірне (рідше 0,001 випадку на рік). Щодо величин наслідків та їх ранжування бюро вважає, що кожна судноплавна компанія має це виконати, виходячи з наявного досвіду експлуатації судна. Приклад матриці ризиків, використовуваної на підприємствах морського транспорту, наведено на рис. 2.

Частота	Часті				Високий ризик
	Дуже ймовірні	Низький ризик			
	Малоймовірні				
	Вкрай малоймовірні				
		Мінімальні	Значні	Тяжкі	Катастрофічні
	Наслідки				

Рисунок 2 – Матриця ризиків

5. Оцінка ризику з позиції страхування

Страхові компанії часто займаються оцінкою ризиків морських перевезень, використовуючи у роботі таку методику [14]. Позначимо можливість аварії буквою p , суму страхового внеску b , а страхову премію, яку страхова компанія зобов'язується виплатити у разі аварії, C .

Очікуваний виграш страхової компанії складається із двох частин:

1. Якщо трапиться аварія, страхова компанія повинна виплатити премію та задовольнитись лише отриманням страхового внеску, її виграш буде від'ємний та дорівнює $p(-C + b)$.

2. Якщо аварії не трапиться, страхова компанія отримує чистий виграш за рахунок страхового внеску; він буде позитивний і дорівнює $(1 - p)b$.

Очевидно, що страхова компанія буде йти на ризик укладання договору лише в тому випадку, якщо загальна сума її виграшу виявиться позитивною:

$V_{с.с.} = p(-C + b) + (1 - p)b > 0 \rightarrow b > pC$ – умова укладання договору страховою компанією.

Якщо говорити про інтереси власника судна, то для нього головне питання – в яких випадках варто ризикувати своїм внеском, а в яких – ні. Очікуваний виграш власника судна також складається з 2 частин:

– якщо трапляється аварія, власник отримає страхову премію за вирахуванням страхового внеску, його виграш позитивний: $p(C - b)$;

– якщо аварії не станеться, власник втратить страховий внесок, його виграш буде від'ємний та дорівнює $(1 - p)(-b)$.

Загальна сума виграшу власника судна складе:

$$V_{с.с.} = p(C - b) + (1 - p)(-b) = pC - b.$$

Оскільки страхова компанія укладатиме договір лише при $b > pC$, що відповідає $pC - b < 0$, то загальна очікувана сума виграшу власника судна буде негативною.

6. Оцінка ризику при колективному прийнятті управлінських рішень.

Історія прийняття рішень, пов'язаних з оцінкою ризику, у групі полягає у переході від індивідуальних рішень, що приймаються кожним її членом, до колективних, що виражають думку групи в цілому. Можна виділити кілька типів такого переходу [14].

6.1. Стратегія простої більшості.

Переваги стратегії – простота та очевидність. Недоліки – думка меншості зовсім не впливає на вибір, відсутність узгодженості переваг цієї альтернативи в окремих осіб.

6.2. Стратегія підсумовування рангів. Розглянемо приклад. Нехай рішення, пов'язане з ризиком, виробляється малою групою з трьох осіб. Можливі чотири альтернативні рішення: a_1, a_2, a_3, a_4 . Насамперед, проводиться ранжування – вибудовування як перевагу альтернатив кожною особою групи. Ранги з кожної альтернативи складаються. Групове рішення відповідає тій альтернативі, яка має суму рангів виявляється найменшою.

6.3. Стратегія мінімізації відхилень. Ідея стратегії – зробити відхилення між перевагою групи та індивідуальними рішеннями, якнайменшими.

Скажімо, мала група із трьох осіб оцінює три альтернативи a_1, a_2, a_3 , за допомогою трибальної системи оцінок. Щоб мінімізувати наявні відхилення рішень членів групи від групового рішення, будується матриця розбіжності результатів розв'язання. При цьому спочатку робляться припущення про вибір групою тієї чи іншої альтернативи, а потім оцінюються розбіжності між цим груповим та індивідуальними рішеннями.

6.4. Стратегія оптимального передбачення. Отримане групове рішення дозволяє передбачати індивідуальні переваги. Для цього необхідно, щоб перевага між будь-якими парами альтернатив, зроблена на основі групового рішення, відповідала дійсній перевазі. Допустимо, при розробці особливих правил плавання у певному районі приймається групове рішення, коли судноводії підуть на певний ризик, а коли – не підуть. Стратегія зробленого групового вибору визнається найкращою, якщо судноводії у своїх дійсних рішеннях дотримуються передбаченого вибору якнайчастіше.

7. Теоретико-ігрові методи в оцінці ризиків.

Теорія статистичних рішень служить для вироблення рекомендацій щодо раціональних дій в умовах невизначеності та пов'язаного з ними ризиками, викликаними незалежними причинами: непоінформованістю про умови майбутніх дій, а також випадковим характером цих умов. На відміну від теорії ігор, замість противника тут ми маємо справу з об'єктивними обставинами – «природою». У цьому розуміється, що природа свідомо протидіє. В іграх з «природою» припущення, що противник побудує свою тактику, зробити не можна, саме це посилює невизначеність обстановки, посилює ризик і тим самим ускладнює прийняття рішення.

Теоретично для статистичних рішень вводиться спеціальний показник, який називається «ризик». «Ризик» показує, наскільки вигідною є застосована стратегія в даній обстановці з урахуванням її невизначеності. «Ризик» дорівнює різниці між очікуваним результатом дій за наявності точних даних обстановки та результатом, який може бути досягнутий, якщо ці дані достеменно невідомі.

Вибір найкращого рішення в умовах невизначеності даних про обстановку

здійснюється за трьома можливими варіантами [14]:

7.1. Вибір найкращого рішення, коли ймовірність можливих умов обстановки відома.

У цьому випадку має обиратися спосіб дій, при якому середнє очікуване значення результату, тобто сума добутків ймовірностей на відповідні результати розв'язання завдання є максимальною.

7.2. Вибір найкращого рішення, коли ймовірності можливих умов обстановки не відомі, але є міркування їх відносних значень.

Якщо вважати, що будь-яка з умов обстановки не більш ймовірна, ніж інші, то ймовірності різних умов обстановки можна прийняти рівними й робити вибір способу вказаним вище способом (це – принцип недостатньої основи Лапласа).

7.3. Вибір найкращого рішення, коли ймовірності можливих умов обстановки невідомі, але є принципові підходи до оцінки результату дій.

7.3.1. Критерій Вальда. Необхідна гарантія, що результат у будь-яких умовах виявиться не меншим, ніж найбільший можливий у найгірших умовах. Тактика – «розраховуй на найгірше». Оптимальний спосіб дій – той, при якому результат виявиться максимальним з мінімальних за різних типів.

7.3.2. Критерій Севіджа. Оптимальний спосіб дій – той, для якого ризик, максимальний за різних типів дії зовнішнього середовища, виявиться мінімальним.

7.3.3. Критерій Гурвіца. Компроміс між тактикою «розраховуй на найгірше» та тактикою «розраховуй на краще». Оптимальний метод дій – той, для якого критерій песимізму-оптимізму виявиться максимальним. На даний час існує множина підходів до оцінки ризиків, проте жоден з них не дає цілісної картини впливу ризику на транспортування.

Більшість підприємств морського транспорту використовують якісні методи оцінки ризику без урахування їх кількісної складової, а також неформальні та інтуїтивні методи без застосування математичного апарату, що зрештою призводить до низької ефективності управління ризиками.

Таким чином, з одного боку, підвищення безпеки морських перевезень є актуальним соціально-економічним завданням, але з іншого, питання оцінки факторів ризику, розрахунки інтегральних оцінок рівня ризику як основних критеріїв для прийняття рішень розроблено недостатньо. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки комплексного, всебічного підходу до ризик-менеджменту, який координуватиметься в рамках усього підприємства, забезпечуючи його успішне функціонування, фінансову стійкість, високу конкурентоспроможність та стабільну прибутковість. Для досягнення цієї мети повинні бути розроблені методики, які б дозволили керівництву підприємств морського транспорту управляти ризиками, використовуючи певні засоби та методи, що дозволяють максимально прогнозувати настання ризикової події та проводити відповідні заходи щодо зниження ступеня ризику. Оцінка небезпеки виникнення аварій на транспорті має включати дві взаємопов'язані групи показників небезпеки. Перша група характеризує наслідки аварій (матеріальні та соціальні збитки), друга – ймовірнісні показники її реалізованості (ймовірність аварії внаслідок дії деякого/деяких факторів ризику) [11].

Відповідно до прийнятих у світовій практиці підходів неприпустимим вважається індивідуальний ризик, що перевищує $1 \cdot 10^{-4}$ 1/рік (протягом року від аварій гине 1 людина із 10 000). Якщо рівень ризику лежить у діапазоні $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ 1/рік, необхідно вжити спеціальних заходів з управління ним. Значення ризику $1 \cdot 10^{-6}$ 1/рік в економічно розвинутих країнах зазвичай приймається як допустимий рівень ризику. Оцінюючи прийнятність ризику, необхідно враховувати сумарні збитки, викликані як загибеллю людей, так і матеріальними втратами та шкодою навколишньому середовищу. З цієї метою слід завжди розглядати відповідність матеріальних збитків у грошовому вираженні збитків

від загибелі людини. У роботі [1] дано визначення поняттю “Прийнятний ризик аварії” – ризик, рівень якого допустимий та обґрунтований, виходячи з соціально-економічних міркувань. Більшість фахівців з природних небезпек визначають ризик як “імовірнісні втрати”, які можуть бути встановлені шляхом множення ймовірності (частоти) негативної події на величину можливої шкоди від нього.

Внаслідок такої операції можливі збитки трансформуються в умовну середню шкоду за одиницю часу, що можна вважати виправданим для подій з відносно великою повторюваністю. Для подій, що рідко повторюються, ризик слід оцінювати одночасно двома показниками: величиною можливої одномоментної шкоди та ймовірністю (частотою) його реалізації. У цьому випадку результат оцінки ризиків можна висловити у ймовірнісній, вартісній та комбінованій (збитки та ймовірність) формі.

Схема, що відображає взаємозв'язок факторів, що діють на систему, і виникають під впливом цих факторів ризиків, набуде вигляду, зображеного на рис. 3.

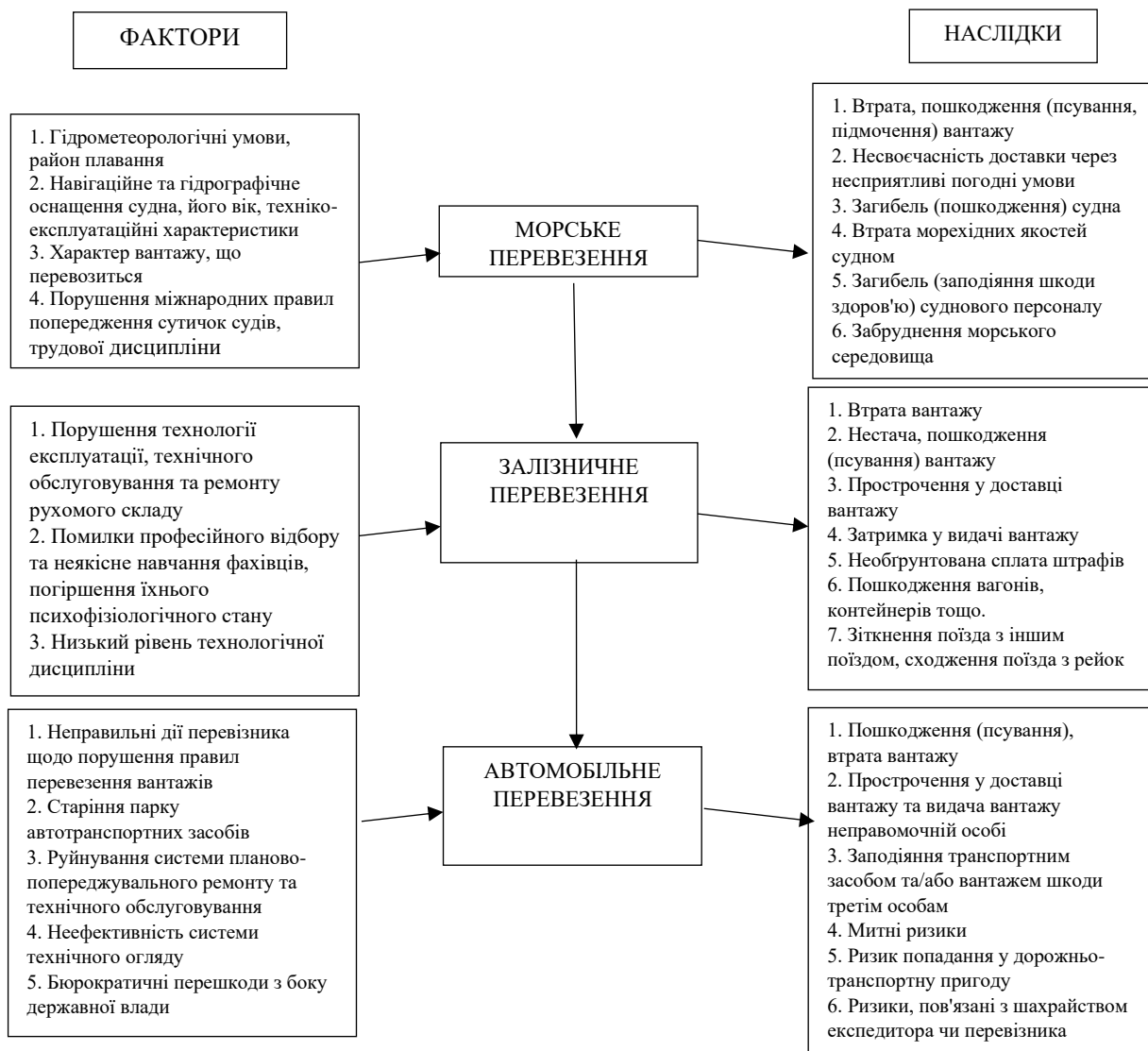


Рисунок 3 – Причинно-наслідкові зв'язки ризиків мультимодальних перевезень

Обставини у нашому дослідженні – це умова чи сукупність умов, які безпосередньо чи опосередковано можуть сприяти виникненню аварійної ситуації чи безпосередньо з'явитися причиною аварії. Так, знеструмлення судна, що йде по фарватеру, часто є причиною виникнення аварійної ситуації та аварії.

У певних умовах може виникнути ситуація відсутності необхідної інформації про погоду, наближення урагану, цунамі тощо. У таких випадках причиною виникнення аварійної ситуації можуть бути тяжкі погодні умови, внаслідок чого судно може втратити керування, бути викинуте на рифи та конструктивно зруйновано.

Таким чином, обставини/умови породжують ризики відмов, помилок, виникнення непереборних сил природи, що стає причиною аварій (зіткнень, посадки на мілину, загибелі судна та вантажу).

Аналіз аварій (НС) наземного транспорту (автомобільний, залізничний), що перевозить різні вантажі, показує, що сценарій розвитку НС/аварій може відрізнятись від викладеного лише в незначних деталях. Отже, таке уявлення сценарію розвитку НС та аварій можна використовувати як загальну модель для розрахунку інтегральної оцінки ризику виникнення аварійних НС у процесі мультимодальних вантажоперевезень.

Методика розрахунку ризику будується на основі використання статистичної моделі безпеки перевезень різними видами транспорту та загальної моделі сценарію розвитку НС (див. рис. 3). Аналіз статистичних даних дозволяє визначити тип потоку випадкових подій, рівняння тренду та вибрати конкретну модель, що описує стан безпеки руху за допомогою отримання кількісних оцінок показників ризику.

Теорія статистичних рішень служить для вироблення рекомендацій щодо раціонального образу дій в умовах невизначеності та пов'язаного з нею ризику. Тут ми маємо справу з об'єктивними обставинами – “природою”. У іграх з “природою” допущення зробити не можна, саме це посилює невизначеність обстановки, посилює ризик і ускладнює прийняття рішення.

Враховуючи, що аварійність і ризик виникнення НС мають яскраво виражений випадковий характер, для оцінки ризику використовуються методи теорії ймовірності та математичної статистики.

При дослідженнях аварійності в різних галузях технічні підходи до оцінки ризику можуть бути різними. Серед найпоширеніших:

- подання аварій та НС у вигляді потоку випадкових подій, що дозволяє прогнозувати стан системи на основі використання теорії Марківських процесів (оскільки аварія – це складний ергодичний процес);

- метод оцінки ризику аварій, заснований на припущенні існування допустимих і небезпечних значень параметрів досліджуваних технологічних процесів, тобто ймовірність НС інтерпретується як параметрична відмова системи.

Головний недолік експертних оцінок – неможливість визначення ступеня ризику. Саме імовірнісні методи дозволяють визначити ступінь ризику, а й дати досить точний прогноз. Основними завданнями оцінки ризику аварій на транспорті є:

- оцінка частот (середньорічних ймовірностей) виникнення та розвитку аварій на транспорті за всіма основними сценаріями;

- оцінка наслідків виникнення та розвитку основних сценаріїв аварій на транспорті;

- узагальнення отриманих оцінок.

У практиці вантажоперевезень зустрічаються ситуації, коли кількість рейсів, що виконуються флотом/або іншим транспортом, досить велика, а ймовірність аварії, псування або втрати вантажу мала. Це, так звані, рідкісні події. У випадках, коли ймовірність рідкісних подій незначна, вони наслідують розподіл Пуассона [3].

Таким чином, аварії транспортних засобів та пов'язані з цим випадки втрати/псування вантажу відносяться до рідкісних подій, які розподіляються згідно із законом Пуассона. Справді, ймовірність окремої аварії транспортного засобу (наприклад, судна) протягом порівняно невеликого інтервалу часу, наприклад 1 місяця, мала, але оскільки кількість суден велике, то в середньому в цьому інтервалі часу може статися деяка аварія. Якщо

вважати, що аварія одного судна не виключає ймовірність аварії іншого судна, то можна стверджувати, що аварійність слідує розподілу Пуассона.

Численні експерименти та використання статистичних даних (рядів динаміки) свідчать, що за наявною статистичною інформацією про аварії на транспорті реально можливо оцінити тільки відповідність показників стану безпеки руху за експоненційним або пуасонівським законом розподілу з постійною та змінною інтенсивністю подій [12; 3]. Система статистичних даних про аварії, марковані за часом, розглядається як одна реалізація якогось абстрактного пуасонівського процесу [12, 3].

Розглянемо стаціонарний пуасонівський потік подій, для якого ймовірність того, що на відрізку часу довжини τ настане рівно k подій, може бути розрахована за формулою [3]:

$$P_m(k) = \frac{a^k e^{-a}}{k!}. \tag{2}$$

Тоді статистична модель безпеки вантажоперевезень має вигляд:

$$P\{X(t, \tau) = k\} = \frac{a^k e^{-a}}{k!}, \tag{3}$$

де P – ймовірність появи події; m – число випробувань, од.; $X(t, \tau)$ – функція кількості випадкових небезпечних подій; k – кількість небезпечних випадкових подій протягом розглянутого часу; $a = \lambda\tau$ – параметр, що залежить від інтервалу часу та кількості небезпечних випадкових подій; λ – інтенсивність потоку небезпечних подій; τ – розглянутий інтервал часу (розмірність вибирається виходячи з конкретного завдання.)

Формула (3) використовується у випадках, коли кількість випробувань велика, а ймовірність появи події P у кожному випробуванні дуже мала, що відповідає даним аварійної статистики на транспорті.

Оскільки загальний потік небезпечних подій на транспорті складається з часткових потоків випадкових подій з низки причин (на різних етапах вантажоперевезень), то стає можливим використання фундаментального положення теорії потоків: сума незалежних пуасонівських потоків є також пуасонівським потоком.

Під час розробки методики оцінки ризику для морських суден приймалися наступні припущення:

1. Виникнення та розвиток НС протікає за сценарієм.
2. Аварійні події проявляються у вигляді двох груп послідовних подій A_j^l та B_i .
3. Група початкових подій A_j представляє собою небезпечні відмови j -го виду ($j = 1, 2, \dots, J$) l -го класу ($l = 1, 2, \dots, L$) відмов об'єктів технічної системи морського транспорту, що є причиною сутичок суден та їх посадки на мілину. Події A_j^l є повною групою несумісних подій. Іншими словами, лише одна подія A_j^l може бути в рейсі причиною зіткнення, затоплення, посадки на мілину під час руху суден.
4. Друга група подій B_i є спільними подіями, одна з яких виникає з певною ймовірністю після настання події A_j^l і проявляється як до зіткнення, посадки на мілину судна в рейсі з i -м видом наслідків (B_1 – аварія; B_2 – зіткнення; B_3 – посадка на мілину). Тоді ймовірність появи події A_j^l ($j = 1, 2, \dots, J$), ($l = 1, 2, \dots, L$) з повної групи несумісних подій набуде вигляду [3]:

$$P(A_j^l) = \sum_{i=1}^3 N_{B_i|A_j^l} / \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^3 N_{B_i|A_j^l} \quad (4)$$

де $N_{B_i|A_j^l}$ – загальна кількість аварійних випадків на одиницю часу з i -м видом наслідків через j -го виду небезпечної відмови l -го класу морських об'єктів суден (кількість подій $B_i|A_j^l$) за аналізований період.

Імовірність виникнення відмови/умов j -го виду з i -ою шкодою $P(A_{ji}^l)$ можна розрахувати, як середньостатистичну, із відношення кількості суден/ транспортних засобів, які зазнали аварії внаслідок відмови j -го виду з i -им збитками в районах плавання/на дорогах l до загальної кількості суден/транспортних коштів, які проходять через ці райони [26]:

$$P(A_{ji}^l) = \frac{\sum_j \sum_i \sum_l N_{jil}}{\sum_l N_l} \quad (5)$$

Вагові оцінки відмов j -го виду з i -им збитком у районах плавання l розраховуються за формулою [26]:

$$\omega(A_{ji}^l) = \frac{\sum_l N_{jil}}{\sum_j \sum_i \sum_l N_{jil}} \quad (6)$$

Прогностичні оцінки ймовірності відмови технічних засобів можуть бути визначені з використанням теорії Марківських процесів [14].

Загальна інтенсивність виникнення подій $B_i|A_j^l$, що припадає на одну година рейсу судна складає:

$$\lambda_{B_i|A_j^l} = \frac{Z(B_i|A_j^l)}{\bar{T}}, \quad (7)$$

де $Z(B_i|A_j^l)$ – загальна середня кількість подій $B_i|A_j^l$, що припадають на одне судно за аналізований період; \bar{T} – середній час рейсу судна за аналізований період.

Рівні безпеки руху суден на різних ділянках плавання сильно відрізняються. Очевидно, що й оцінка аварійного ризику під час руху судна за певним маршрутом має залежати від стану безпеки саме на цьому маршруті.

Для оцінки інтенсивностей виникнення подій $B_i|A_j^l$, що відповідають однієї години рейсу судна по m -му маршруту, використовується співвідношення:

$$\lambda_{B_i|A_j^l}^m = \mu_m \cdot \lambda_{B_i|A_j^l}, \quad (8)$$

де μ_m – показник безпеки руху по m -му маршруту, визначається за формулою:

$$\mu_m = M \bar{g}_m / \sum_{m=l}^M \bar{g}_m, \quad (9)$$

де $\bar{g}_m = n_m^k / q_m^k$ – середнє значення інтегрального показника безпеки руху на m -му маршруті за аналізований період; n_m^k – кількість випадків зіткнень на m -му маршруті за k років, q_m^k – обсяг рятувальних робіт, що проводяться на m -му маршруті морських перевезень за k років (млрд. т-км брутто), M – кількість варіантів маршрутів на морському транспорті.

Виходячи з припущення, що ймовірність того, що за час $t \leq T$ (t – момент часу під час руху за маршрутом, T – час руху по всьому маршруту) руху судна за певним маршрутом не станеться подія $(B_i | A_j^l)$, не залежить від передісторії функціонування морського транспорту, можна отримати наступні формули для розрахунку (загального) аварійного ризику виникнення подій $(B_i | A_j^l)$, B_i ($B_i = Y_{j=1}^J (B_i | A_j^l)$) та B ($B = Y_{i=1}^3 B_i$) за час $t \leq T$ руху судна:

$$R(B_i | A_j^l) = 1 - \exp(-\lambda_{B_i | A_j^l} T), \quad (10)$$

$$R(B_i) = \sum_{j=1}^J P(A_j^l) \cdot R(B_i | A_j^l), \quad (11)$$

$$R(B) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^J P(A_j^l) \cdot R(B_i | A_j^l). \quad (12)$$

Можливості $P(A_j^l)$ є “суб’єктивними”, апіорними ймовірностями, оскільки причина сутичок суден A_j^l встановлюється шляхом експертних оцінок у ході службового розслідування обставин аварійної пригоди з судном.

Тому групу подій A_j^l можна розглядати як групу «гіпотез», які породжують події B_i . Застосовуючи теорему Байєса, виходячи з формули множення ймовірностей, отримаємо ймовірності [3]:

$$P(A_j^l | B_i) = \frac{P(A_j^l) \cdot P(B_i | A_j^l)}{\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L P(A_j^l) \cdot P(B_i | A_j^l)}, \quad (13)$$

де $P(A_j^l)$ – ймовірнісні гіпотези A_j^l ; $P(B_i | A_j^l)$ – умовні ймовірності події B_i при гіпотезі $P(A_j^l)$.

Розрахувавши значення $P(B_i | A_j^l)$, можна знайти максимальне значення ймовірності. Тобто визначити, які події A_j^l з максимальною ймовірністю призводять до події B_i . Ймовірності, що розраховуються за формулою (13), можна інтерпретувати як апостеріорні (з урахуванням результатів натурного експерименту) ймовірності того, що подій A_j^l породжують саме події B_i .

Знайшовши максимум ймовірності $A_j^l | B_i$, тим самим можна встановити якісь події l_j , що з максимальною ймовірністю призводять до подій B_i .

Аварійний ризик виникнення подій $B_i | A_j^l$, B_i та B під час руху судна за конкретним маршрутом (по ділянках маршрутів m_1, m_2, \dots, m_L за час $t \leq T_{m_1} + T_{m_2} + \dots + T_{m_L}$ де, m_l – деякі числа інтервалу від 1 до M) можна розрахувати за формулами:

$$R_M(B_i|A_j^l) = 1 - \exp(-\sum_{m_l} \lambda_{B_i|A_j^l}^{m_l} T), \quad (14)$$

$$R_M(B_i) = \sum_{j=1}^J R_M(B_i|A_{ji}), \quad (15)$$

$$R_M(B) = \sum_{i=1}^3 R_M(B_i). \quad (16)$$

Інтенсивність виникнення аварій за період T з причин відмов, важких погодних умов, форс-мажорних обставин, можна розрахувати, використовуючи статистичні дані для кожного потенційно небезпечного району l за формулою:

$$\gamma(B_i|A_{ji}) = \frac{\sum_j \sum_l \sum_i N_{jil}}{T_l}. \quad (17)$$

А з розрахунку на одне судно, що проходить по районах l судно:

$$\gamma_{(B_i|A_{ji})}^{\sum s} = \frac{\sum_j \sum_l \sum_i N_{jil}}{T_l \times \sum_l S_{lT}}, \quad (18)$$

де $\sum_l S_{lT}$ – кількість суден, що проходять через райони l за час T .

Тоді ймовірність виникнення НС та аварії (величина аварійного ризику) може бути розрахована за формулами:

$$R(B_i|A_j^l) = 1 - \exp(-\gamma_{(B_i|A_j^l)} T_l), \quad (19)$$

$$R(B_i) = \sum_{j=1}^J P(A_j^l) \cdot R(B_i|A_j^l), \quad (20)$$

$$R(B) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^J P(A_j^l) \cdot R(B_i|A_j^l). \quad (21)$$

Ціна ризику аварій R_j^l може бути розрахована як добуток ймовірності аварії $P(B_i|A_j^l)$ на величину передбачуваної шкоди $\int W_i^l dl$ (функцію шкоди у разі однієї одиниці транспорту/судна):

$$R_j^l = P(B_i|A_j^l) \int W_i^l dl. \quad (22)$$

Таким чином, представлена тут методика розрахунку ймовірностей ризику виникнення НС та аварій складає основний базис для формування інтегральних оцінок ризиків.

Висновки. Методика оцінки ризиків у морській індустрії будується на основі використання загальної моделі сценарію розвитку аварійних ситуацій, теорії нечітких множин та експертних оцінок. При розрахунку оцінок ризику необхідно враховувати причинно-наслідкові зв'язки у логіці: «обставини/умови» – «причини» – «наслідки».

ЛІТЕРАТУРА

1. Желібо Є. П. Безпека життєдіяльності : навчальний посібник для IV рівнів акредитації / Є. П. Желібо, — студентів вищих закладів освіти України І В. М. Пічі. – Львів: «Новий Світ–2000», 2001. – 320 с.
2. Лук'янова В. В. Економічний ризик : навч. посібник / В. В. Лук'янова, Т. В. Головач. – Київ : Академвидав, 2007. – 464 с.
3. Бакуліч О. О., Кіс І. Р., Занора В. О. Тенденції управління екологічними ризиками транспортних проєктів. Збірник наукових праць Черкаського державного технологічного університету. Серія «Економічні науки». 2020. Вип. 56. С. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4420.0.56.2020.201674>
4. Ткаченко І. О. Ризики у транспортних процесах : навч. посіб. Харків, 2017. 114 с.
5. Данченко О. Б., Занора В. О. Проєктний менеджмент: управління ризиками та змінами в процесах прийняття управлінських рішень : монографія. Черкаси, 2019. 278 с.
6. Semenova S., Kovova I., Shuliarenko S., Shpyrko O., Bukoros T. (2020). Estimation of transport industry's economic sustainability as an element of strategic management: case of Poland and Ukraine. Problems and Perspectives in Management. Vol. 18. Issue 2. P. 501–514. DOI: 10.21511/ppm.18(2).2020.41.
7. Федулова І. В., П'ятницька Г. Т. Сигніфікація ризик-менеджменту, антикризового управління та комплаєнсу в управлінні фінансовою безпекою підприємства. Економіка та держава. 2020. № 8. С. 26–34. DOI: 10.32702/2306-6806.2020.8.26.
8. Державна служба України з безпеки на транспорті. URL: <http://dsbt.gov.ua/storinka/prosluzhbu>
9. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (SOLAS-74/78). – Лондон: ИМО, 1978. – 436 с.
10. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78). – Лондон: ИМО, 1978. – 378 с.
11. Фаустова О.Г. Расчет прогностических оценок системы "природа - морское судно" и вероятностей отказов технических средств судна / О.Г. Фаустова, С.С. Мойсеенко // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012: Материалы Международной научно-практической конференции. - Сборник научных трудов SWorld, 2012. - Вып. 3. - Одесса: Куприенко, 2012. – С. 43-48.
12. Бабина О. Є., Карпенко О. О. Фінансовий менеджмент на підприємствах водного транспорту : навч. посіб. Київ : СІК Груп Україна, 2012. 326 с.

REFERENCES

1. Zhelibio E. P. Life safety: a study guide for IV levels of accreditation / E. P. Zhelibio, students of higher education institutions of Ukraine I V. M. Pichi. - Lviv: "New World-2000", 2001. - 320 p.
2. Lukyanova V. V. Economic risk: academic. manual / V. V. Lukyanova, T. V. Holovach. - Kyiv: Akademydav, 2007. - 464 p.
3. Bakulich O. O., Kis I. R., Zanora V. O. Tendencies of environmental risk management of transport projects. Collection of scientific papers of the Cherkasy State University of Technology. Series "Economic Sciences". 2020. Issue 56. P. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4420.0.56.2020.201674>
4. Tkachenko I. O. Risks in transport processes: academic. manual Kharkiv, 2017. 114 p.
5. Danchenko O. B., Zanora V. O. Project management: managing risks and changes in management decision-making processes: a monograph. Cherkasy, 2019. 278 p.

6. Semenova S., Kovova I., Shuliarenko S., Shpyrko O., Bukoros T. (2020). Estimation of transport industry's economic sustainability as an element of strategic management: case of Poland and Ukraine. *Problems and Perspectives in Management*. Vol. 18. Issue 2. P. 501–514. DOI: 10.21511/ppm.18(2).2020.41.
7. Fedulova I. V., Pyatnytska G. T. Significance of risk management, anti-crisis management and compliance in the management of the financial security of the enterprise. *Economy and the state*. 2020. No. 8. P. 26–34. DOI: 10.32702/2306-6806.2020.8.26.
8. State Service of Ukraine for Transport Safety. URL: <http://dsbt.gov.ua/storinka/pro-sluzhbu>
9. International Convention for the Safety of Human Life at Sea (SOLAS-74/78). - London: IMO, 1978. - 436 p.
10. International Convention on the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78). - London: IMO, 1978. - 378 p.
11. Faustova O.G. Calculation of prognostic assessments of the "nature - marine vessel" system and the probability of failure of the vessel's technical equipment / O.H. Faustova, S.S. Moiseenko // *Scientific studies and their practical application. Current state and development paths 2012: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. - Collection of scientific works SWorld, 2012. - Vol. 3. - Odessa: Kuprienko, 2012. - P. 43-48.
12. Babina O. E., Karpenko O. O. *Financial management at water transport enterprises: training manual* Kyiv: SIK Group Ukraine, 2012. 326 p.

Horban A.V., Carjova K.

INTEGRAL ASSESSMENT OF THE RISKS OF EMERGENCY SITUATIONS IN SEA TRANSPORTATION

Ensuring safety on water transport is one of the priority tasks of the transport strategies of enterprises. Since the emergence of emergency situations (ES) in the process of moving cargo/passengers in time and space occurs as a result of the negative impact of various factors, the task of preventing or reducing their negative impact is urgent. It should be noted that the process of multimodal transportation involves, as a rule, several types of transport, technological lines, means of small mechanization, and specialists of various directions. To carry out transportation, it is necessary to implement a significant number of multifaceted activities, among which the design of transport and logistics systems (TLS) of goods is of great importance. An important section of TLS projects is the development of security issues, which determines the relevance of the master's thesis. In the course of the study, the following tasks were performed: the structure of risk factors of emergency situations in sea and multimodal cargo transportation was determined and systematized; methodical approaches to risk assessment and forecasting emergency situations in the process of sea and multimodal cargo transportation have been developed; the method of integral assessment of the risks of an emergency situation, the criteria of assessment, efficiency and safety of transport and logistics schemes of sea and multimodal cargo transportation have been developed

Keywords: *sea transportation, navigation, emergency situations*

Калініченко Є.В., Бойко А.Д., Постников Є.Є

МЕТОД ОЦІНКИ УЗАГАЛЬНЕНОГО РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙНИХ МОРСЬКИХ ПОДІЙ У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ СУДНОПЛАВСТВА

В статті розглянуто метод оцінки узагальненого ризику виникнення аварійних морських подій у системі управління безпекою судноплавства, який враховує найскладніші класи аварійних морських подій (дуже серйозні аварії, серйозні аварії), типи чинників, що впливають на безпеку судноплавства. У методі визначаються прийнятні та неприйнятні ризики для кожної аварійної морської події з використанням криволінійної трапеції прийняттого ризику. За допомогою такої трапеції можливо підвищити точність оцінки узагальненого ризику виникнення аварійних морських подій з використанням морського та річкового транспорту. При цьому обґрунтована гіпотеза про розподіл аварійних морських подій за законом Пуассона на статистичних даних щодо дуже серйозних морських аварій, серйозних аварій, морських інцидентів та інцидентів для морського та річкового транспорту за період з 2006 по 2021 роки. Аналіз показав, що для водного транспорту для дуже серйозних та серйозних аварій немає підстави відкинути нульову гіпотезу про розподіл генеральної сукупності за законом Пуассона. Виконано формальне представлення ризику виникнення аварійних морських подій з урахуванням чинників, що впливають на безпеку судноплавства, та очікуваного середнього збитку. Ризики, що використовуються в роботі, для кожного водного транспорту (морського, річкового) розглядаються як за класами аварійних морських подій (дуже серйозні аварії, серйозні аварії), так і за типами чинників, що впливають на безпеку самого судна, людини, навколишнього середовища і вантажу.

Ключові слова: *метод, ризик, аварійна морська подія, морський та річковий транспорт, ризик, збиток, ймовірність, чинник, система управління безпекою судноплавства.*

Постановка проблеми. На теперішній час проблема управління ризиками та їхня оцінка у різних галузях, зокрема, у системі управління безпекою судноплавства (СУБС), є надзвичайно актуальною. Аналіз стану аварійності морського та річкового флоту України свідчить про те, що для зменшення потенційного збитку від аварійних морських подій (АМП) необхідне врахування та реалізація різноманітних заходів щодо запобігання або зниження ризиків виникнення цих подій у системі управління безпекою судноплавства [1-11]. При цьому одним з найважливіших етапів управління ризиком аварійних морських подій у ході діяльності, пов'язаної із судноплавством, є етап оцінки відповідного ризику.

На безпеку експлуатації водного транспорту діють багато негативних факторів, вплив яких може мати різні негативні наслідки. Досягти абсолютної безпеки неможливо, при цьому витрати на безпеку судноплавства прагнуть нескінченності. У той же час дефіцит вкладень у безпеку судноплавства може призвести до катастрофи. У зв'язку з цим необхідно розробити механізм визначення першочергових ризиків та найбільш ефективних заходів щодо зниження їхнього рівня таким чином, щоб забезпечувався збалансований розподіл вкладень на безпеку судноплавства та забезпечення можливостей судновласників.

Відповідно до чинних вимог міжнародних та вітчизняних організацій судновласники повинні безперервно підвищувати рівень безпеки судноплавства у межах кордонів фінансового управління та безпеки плавання. З урахуванням цієї умови є необхідність розрахунку конкретного рівня підвищення безпеки судноплавства, який буде оптимальним з

точки зору економіки та безпеки плавання. Аналіз публікацій щодо досліджень процесів оцінки ризиків у системі управління безпекою судноплавства оцінки ризиків у заданій предметній галузі дозволяє зробити висновок про те, що у рамках цих досліджень не враховуються результати оцінки узагальненого ризику виникнення АМП у системі управління безпекою судноплавства [12-16].

Таким чином, існує невідповідність між обмеженими можливостями існуючих підходів з оцінки ризиками у системі управління безпекою судноплавства, з одного боку, та потребами і вимогами практики щодо зниження ризиків АМП, з іншого.

Це визначає необхідність вирішення актуального завдання щодо визначення та удосконалення підходів до оцінки узагальненого ризику виникнення АМП в системі управління безпекою судноплавства (СУБС).

Мета статті. Удосконалення методу оцінки узагальненого ризику виникнення АМП в СУБС.

З метою удосконалення методу оцінки узагальненого ризику виникнення АМП в СУБС обґрунтуємо гіпотезу про розподіл АМП за законом Пуассона.

Через рідкісність і незалежність АМП можливо стверджувати про розподіл АМП за законом Пуассона [17]. Для підтвердження гіпотези про розподіл АМП за законом Пуассона розглянемо статистику подій на МРТ, що підлягають статистичному обліку, щодо стану аварійності та безпеки судноплавства на водному транспорті в Україні за 2006-2021 рр. [1-11] (рис. 1 та рис. 2). Підтвердження гіпотези про розподіл АМП виконано для морського та річкового транспорту за чотирма класами подій окремо:

$$C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}, \quad (1)$$

- де c_1 – дуже серйозні аварії;
 c_2 – серйозні аварії;
 c_3 – морські (серйозні) інциденти;
 c_4 – інциденти.

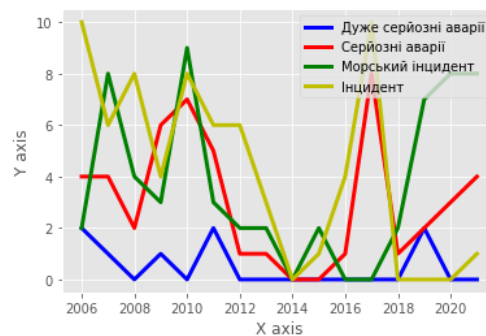


Рисунок 1 – Аварійність на морському транспорті України у 2006-2021 рр.



Рисунок 2 – Аварійність на річковому транспорті України у 2006- 2021 рр.

Підтвердження гіпотези про розподіл АМП за законом Пуассона для морського та річкового транспорту для всіх класів АМП показало, що для розподілів дуже серйозних та серйозних аварій немає підстави відкинути нульову гіпотезу про розподіл генеральної сукупності за законом Пуассона. Тому в подальшому в роботі розглядаються саме дуже серйозні та серйозні аварії для морського та річкового транспорту.

Структурно метод оцінки узагальненого ризику виникнення АМП у СУБС містить послідовне виконання основних процедур, представлених на рис. 3.

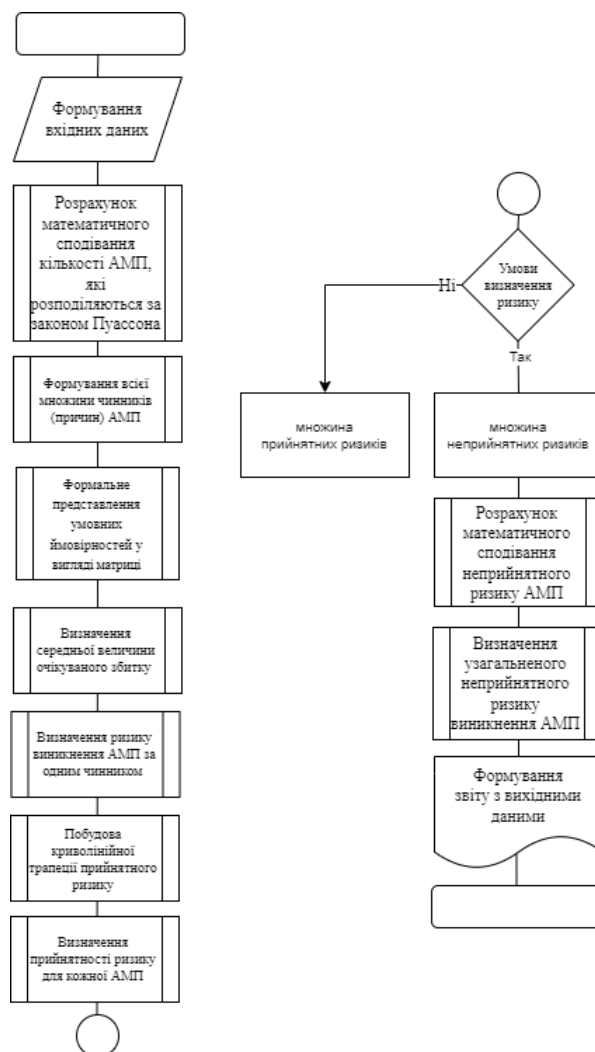


Рисунок 3 – Структура методу оцінки узагальненого ризику виникнення АМП у СУБС

Розглянемо зміст відповідних етапів більш детально.

1. Процедура формування вхідних даних. Вхідними даними для методу є: тип морського або річкового судна, час функціонування водного транспорту, інтенсивності потоків АМП.

2. Процедура розрахунку математичного сподівання кількості АМП, які розподіляються за законом Пуассона, відповідно до виразу (1). У зв'язку з цим, для конкретного (обраного) водного транспорту (морського чи річного) емпіричний коефіцієнт Пуассона a , що залежить від інтервалу часу та кількості небезпечних випадкових подій, визначатимемо таким виразом:

$$a(EME) = \lambda_{EME} T_f, \quad (2)$$

де $\lambda_{\text{ЕМЕ}}$ – інтенсивність потоку однорідних АМП (рік⁻¹ або місяць⁻¹);

T_f – час функціонування водного транспорту (рік або місяць) при безпосередньому виконанні переходу (одного рейсу).

Потік АМП оцінюється параметром потоку. Для оцінки однорідних подій у роботі використовується інтенсивність потоку подій – кількість АМП, що припадають на одиницю часу і мають розмірність (рік⁻¹ або місяць⁻¹). Розрахунок величини інтенсивності потоку $\lambda_{\text{ЕМЕ}}$ здійснюється експериментально або за узагальненим виразом

$$\lambda_{\text{ЕМЕ}} = \frac{N}{T_0}, \quad (3)$$

де N – кількість АМП, що відбулися за час спостереження;

T_0 – час спостереження аварійних морських подій.

3. Процедура формування всієї множини чинників (причин) АМП відповідно до виразу (4) із початковою деталізацією чинників на першому рівні.

Будь-яка АМП може бути наслідком кількох чинників (причин). Кожен чинник має свою частку у виникненні події. У кожній АМП мають місце відповідні чинники, що являють собою повну групу подій. Представимо всю множину чинників (причин) АМП у вигляді таких чотирьох множин (із деталізацією на першому рівні):

$$\begin{cases} \{F_1^1, \dots, F_5^1\}, \\ \{F_1^2, \dots, F_4^2\}, \\ \{F_1^3, \dots, F_5^3\}, \\ \{F_1^4, \dots, F_4^4\}, \end{cases} \quad (4)$$

де $\{F_1^1, \dots, F_5^1\}$ – множина підгруп чинників, що впливають на безпеку самого судна;

$\{F_1^2, \dots, F_4^2\}$ – множина підгруп чинників, що впливають на безпеку людини;

$\{F_1^3, \dots, F_5^3\}$ – множина підгруп чинників, що впливають на безпеку навколишнього середовища;

$\{F_1^4, \dots, F_4^4\}$ – множина підгруп чинників, що впливають на безпеку вантажу.

При цьому множину чинників, що впливають на безпеку самого судна, можна умовно розбити на п'ять груп з відповідним їх розподілом першого рівня:

– незадовільні властивості судна: плавучість, стійкість, непотоплюваність, керованість, мореплавність, міцність, живучість;

– несприятливі зовнішні умови: вітер, хвилювання, течія, погана видимість (туман, темний час доби), температура повітря, айсберги, підводні перешкоди (риффи, скелі, мілини), інтенсивність судноплавства, стислість у районі плавання тощо;

– відмови суднових технічних засобів та обладнання (пожежі, затоплення, випромінювання, відмови);

– вплив вантажів, функціональних систем та пристроїв цільового призначення (промислове обладнання, системи пошуку та видобутку корисних копалин із дна моря та ін.);

– людські помилки (помилки у діях екіпажу, пасажирів, персоналу чи бездіяльність осіб, які забезпечують безпеку судна).

4. Процедура формального представлення умовних ймовірностей того, що дана АМП сталася через визначені чинники, для кожного класу АМП у вигляді матриці відповідно до виразів (5) - (8).

Умовні ймовірності формально задамо для кожного типу водного транспорту (морського чи річкового) окремо, де класи АМП, це дуже серйозної або серйозної аварії ($j = 1,2$) у вигляді матриці, рядки якої являють собою АМП ($j = 1,2$), а стовпці – чинники АМП (матриця (4) з чинниками, що впливають на безпеку самого судна, матриця (5) з чинниками, що впливають на безпеку людини, матриця (6) з чинниками, що впливають на безпеку навколишнього середовища, матриця (7) з чинниками, що впливають на безпеку вантажу). На перетині рядків і стовпців знаходяться значення відповідних умовних ймовірностей:

$$\begin{bmatrix} P(F_1^1|EME_1^1) & \dots & P(F_5^1|EME_1^1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(F_1^1|EME_j^1) & \dots & P(F_5^1|EME_j^1) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} P(F_1^2|EME_1^2) & \dots & P(F_4^2|EME_1^2) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(F_1^2|EME_j^2) & \dots & P(F_4^2|EME_j^2) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} P(F_1^3|EME_1^3) & \dots & P(F_5^3|EME_1^3) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(F_1^3|EME_j^3) & \dots & P(F_5^3|EME_j^3) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} P(F_1^4|EME_1^4) & \dots & P(F_4^4|EME_1^4) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(F_1^4|EME_j^4) & \dots & P(F_4^4|EME_j^4) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

5. Процедура визначення величини очікуваного збитку за статистичними даними для кожного чинника та формальне представлення розрахованих величин у вигляді матриці відповідно до виразів (9) - (13).

Кожна АМП призводить до певного збитку. Тому, за статистичними даними для кожного чинника визначається величина очікуваного збитку за результатами аналізу статистичних даних. Відповідні результати зводяться в матриці для кожного типу водного транспорту (морського чи річкового) окремо, де класи АМП, це дуже серйозної або серйозної аварії ($j = 1,2$), стовпчики яких являють собою АМП ($j = 1,2$), рядки – чинники АМП (матриця (9) з чинниками, що впливають на безпеку самого судна, матриця (10) з чинниками, що впливають на безпеку людини, матриця (11) з чинниками, що впливають на безпеку навколишнього середовища, матриця (12) з чинниками, що впливають на безпеку вантажу), а на перетині рядків і стовпчиків знаходяться значення очікуваного збитку:

$$\begin{bmatrix} Y(F_1^1|EME_1^1) & \dots & Y(F_5^1|EME_1^1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y(F_1^1|EME_j^1) & \dots & Y(F_5^1|EME_j^1) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} Y(F_1^2|EME_1^2) & \dots & Y(F_4^2|EME_1^2) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y(F_1^2|EME_j^2) & \dots & Y(F_4^2|EME_j^2) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} Y(F_1^3 | EME_1^2) & \dots & Y(F_5^3 | EME_1^2) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y(F_1^3 | EME_j^2) & \dots & Y(F_5^3 | EME_j^2) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} Y(F_1^4 | EME_1^3) & \dots & Y(F_4^4 | EME_1^3) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y(F_1^4 | EME_j^3) & \dots & Y(F_4^4 | EME_j^3) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Безпосередньо збиток заданому морському або річковому транспорту від АМП, з урахуванням коефіцієнта Пуассона a (див. вираз (2)), визначатимемо так:

$$Y_j = a(EME_j^t) \sum_{i=1}^I Y(F_i^n | EME_j^t) = \lambda_j T_f \sum_{i=1}^I Y(F_i^n | EME_j^t). \quad (13)$$

6. Процедура визначення ризику виникнення аварійної морської події за одним чинником як математичного сподівання величини збитку від небажаної події відповідно до виразу (14).

Аналіз ризику є важливим елементом системного підходу до прийняття рішень і практичних заходів при вирішенні завдань запобігання або зменшення небезпеки судноплавства, шкоди судну, екіпажу, вантажу і навколишньому середовищу.

Оцінка ризику – це аналіз походження (виникнення) і масштабів ризику в конкретній ситуації. У цій роботі оцінку ризику будемо розглядати у рамках класичного підходу, прийнятому в теорії ризику, як добуток імовірності виникнення конкретної небезпечної події та величини збитку від її наслідків [16]. Отже, ризик виникнення АМП EME_j за одним чинником можна представити як математичне сподівання величини збитку від небажаної події:

$$\begin{aligned} R_j(F_i^n | EME_j^t) &= Y_j P(F_i^n | EME_j^t) = a(EME_j^t) \sum_{i=1}^I Y(F_i^n | EME_j^t) P(F_i^n | EME_j^t) = \\ &= \lambda_j T_f \sum_{i=1}^I Y(F_i^n | EME_j^t) P(F_i^n | EME_j^t). \end{aligned} \quad (14)$$

7. Процедура побудови криволінійної трапеції прийнятного ризику.

Надалі розглядаються прийнятний та неприйнятний ризику. Під прийнятним під час оцінювання розуміється такий ризик, з яким посадова особа в умовах заданої предметної області, згодна. Для визначення рівня прийнятного або неприйнятного ризику запропоновано ввести на розгляд невід'ємну безперервну функцію, яка відображає залежність можливості виникнення збитків від його величини. Графік запропонованої функції на певному відрізку $[Y_{\min}, Y_{\max}]$ (де Y_{\min} – незначний збиток, яким можна знехтувати; Y_{\max} – максимально допустимий збиток) є верхньою межею криволінійної трапеції прийнятного ризику (рис. 4). Функція будується на основі думок кількох експертів. Для згладжування можливих похибок пропонується використовувати апроксимуючу функцію. Ця функція формується на основі апроксимації методом найменших квадратів.

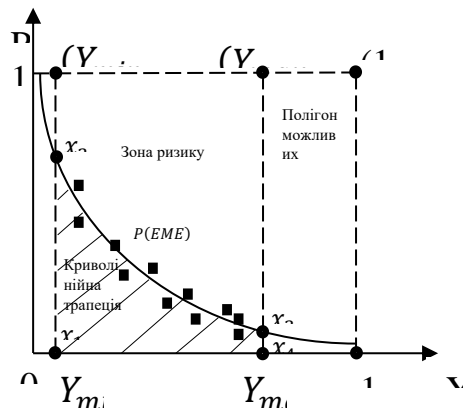


Рисунок 4 – Графік криволінійної трапеції прийняттного ризику

8. Процедура визначення прийнятності ризику для кожної АМП. Для визначення прийнятності ризику для кожної АМП необхідно отриману оцінку ризику, відповідно виразу (15), перевірити на приналежність до криволінійної трапеції прийняттного ризику (рис. 5). Безпосередньо оцінку ризику виникнення АМП EME_j можна представити у вигляді пари значень на основі принципу узагальнення:

$$R_j(F_i^n | EME_j^t) = (Y_j, P(F_i^n | EME_j^t)) \quad (15)$$

Ідентифікації моделі в роботі здійснюється у вигляді виразу:

$$P(F|EME) = f(\alpha, Y), \quad (16)$$

де $P(F|EME)$ – оцінка можливості реалізації АМП;

α – вектор коефіцієнтів функції;

Y – нормована оцінка збитків при реалізації АМП.

З використанням безперервної функції відповідно до виразу (16) формується система співвідношень:

$$\begin{cases} P(EME_j) \leq f(\alpha, Y_j - Y_{\min}), \\ Y_{\min} \leq Y_j \leq Y_{\max}. \end{cases} \quad (17)$$

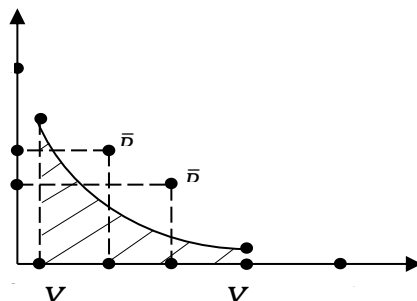


Рисунок 5 – Приклад результату оцінки ризику у графічному вигляді

Якщо значення $R_j(F_i^n | EME_j^t)$ задовольняють системі (17), то ризик вважається прийнятним, стає частиною множини прийнятних ризиків $\{R_j(F_i^n | EME_j^t)\}$ і обробки не потребує. Інакше – ризик є неприйнятним, стає частиною множини неприйнятних ризиків $\{\bar{R}_j(F_i^n | EME_j^t)\}$, які необхідно обробляти. При цьому $\bar{R}_j(F_i^n)$ може належати лише однієї з множин $(\{R_j(F_i^n | EME_j^t)\} \cap \{\bar{R}_j(F_i^n | EME_j^t)\}) = \emptyset$.

9. Процедура розрахунку математичного сподівання неприйнятного ризику АМП з множини $\{\bar{R}_j(F_i^n | EME_j^t)\}$ за всіма чинниками й очікуваним середнім збитком відповідно до виразу (18):

$$R_j^t = \sum_{i=1}^5 \lambda_j T_f Y(F_i^1 | EME_j^t) P(F_i^1 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^4 \lambda_j T_f Y(F_i^2 | EME_j^t) P(F_i^2 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^5 \lambda_j T_f Y(F_i^3 | EME_j^t) P(F_i^3 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^4 \lambda_j T_f Y(F_i^4 | EME_j^t) P(F_i^4 | EME_j^t) = \lambda_j T_f (\sum_{i=1}^5 Y(F_i^1 | EME_j^t) P(F_i^1 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^4 Y(F_i^2 | EME_j^t) P(F_i^2 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^5 Y(F_i^3 | EME_j^t) P(F_i^3 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^4 Y(F_i^4 | EME_j^t) P(F_i^4 | EME_j^t)). \quad (18)$$

10. Процедура визначення узагальненого неприйнятного ризику виникнення АМП (які є по відношенню одна до одної вже різнорідними) відповідно до виразу (19):

$$R_q = \sum_{t=1}^{|C|} \sum_{j=1}^J R_j^t = \sum_{t=1}^{|C|} \left(\sum_{j=1}^J \lambda_j \left(T_f (\sum_{i=1}^5 Y(F_i^1 | EME_j^t) P(F_i^1 | EME_j^t) + \sum_{s=1}^4 Y(F_i^2 | EME_j^t) P(F_i^2 | EME_j^t) + \sum_{k=1}^5 Y(F_i^3 | EME_j^t) P(F_i^3 | EME_j^t) + \sum_{l=1}^4 Y(F_i^4 | EME_j^t) P(F_i^4 | EME_j^t)) \right) \right), q = \overline{1, Q}, \quad (19)$$

11. Процедура формування звіту з вихідними даними, в якому містяться результати виконання восьмого, дев'ятого і десятого етапів методу і які є основою для прийняття рішення щодо необхідності управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання аварійних морських подій і зниження можливих збитків від них у СУБС.

Отже, використовувані у роботі як прийнятні, так і неприйнятні ризики виникнення АМП для кожного водного транспорту розглядаються як за класами АМП (дуже серйозні аварії, серйозні аварії, морські інциденти та інциденти), так і за типами чинників, що впливають на безпеку самого судна, людини, довкілля і вантажу.

Висновки. Таким чином, в статті обґрунтована гіпотеза про розподіл аварійних морських подій за законом Пуассона на статистичних даних щодо дуже серйозних морських аварій, серйозних аварій, морських інцидентів та інцидентів для морського та річкового транспорту за період з 2006 по 2021 роки. Аналіз показав, що для водного транспорту для дуже серйозних та серйозних аварій немає підстави відкинути нульову гіпотезу про розподіл генеральної сукупності за законом Пуассона. За результатами аналізу виконано формальне представлення ризику виникнення аварійних морських подій з урахуванням чинників, що впливають на безпеку судноплавства, та очікуваного середнього збитку. Ризики, що використовуються в роботі, для кожного водного транспорту (морського, річкового) розглядаються як за класами аварійних морських подій (дуже серйозні аварії, серйозні аварії), так і за типами чинників, що впливають на безпеку самого судна, людини, навколишнього середовища і вантажу.

В результаті в статті розглянуто побудову та зміст методу оцінки узагальненого ризику виникнення аварійних морських подій у системі управління безпекою судноплавства, в якому, на відміну від відомих, враховуються найскладніші класи аварійних морських подій (дуже серйозні аварії, серйозні аварії), типи чинників, що впливають на безпеку судноплавства, та визначаються прийнятні та неприйнятні ризики для кожної аварійної

морської події з використанням криволінійної трапеції прийняттого ризику, що дозволяє підвищити точність оцінки узагальненого ризику виникнення аварійних морських подій з використанням морського та річкового транспорту.

Літератури

1. Аналіз стану безпеки руху, польотів, судноплавства в Україні за 2012 рік. Офіційний сайт Міністерства інфраструктури України. URL: https://mtu.gov.ua/files/Avar_analiz_2012.Pdf (дата звернення: 01.12.2022)
2. Аналіз стану безпеки руху, польотів, судноплавства в Україні за 2013 рік. Офіційний сайт Міністерства інфраструктури України. URL: https://mtu.gov.ua/files/Avar_analiz_2013.Pdf (дата звернення: 01.12.2022).
3. Аналіз стану безпеки руху, польотів, судноплавства в Україні за 2014 рік. Офіційний сайт Міністерства інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/files/Аналіз за 2014.pdf> (дата звернення: 01.12.2022).
4. Аналіз стану безпеки руху, польотів, судноплавства в Україні за 2015 рік. Офіційний сайт Міністерства інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/files/Аналіз - 2015.pdf> (дата звернення: 01.12.2022).
5. Аналіз стану безпеки руху, судноплавства та аварійності на транспорті в Україні за 2016 рік. Укртрансбезпека / Аналіз аварійності. URL: http://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/analiz_2017/analiz_avariynosti_2016.pdf (дата звернення 01.12.2022).
6. Аналіз стану безпеки руху, судноплавства та аварійності на транспорті в Україні за 2017 рік. Укртрансбезпека / Аналіз аварійності. URL: http://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/2018/analiz_avariynosti_2017_compressed.pdf (дата звернення 01.12.2022).
7. Аварії та інциденти на морському та річковому транспорті за 2018 рік. Офіційний сайт Укртрансбезпеки / Аналіз аварійності. URL: <http://dsbt.gov.ua/storinka/avariyi-ta-incydyenty-na-morskomu-ta-richkovomutransporti-za-2018-rik> (дата звернення: 01.12.2022).
8. Стан аварійності та безпеки судноплавства на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна за 1 півріччя 2019 року з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/public-information/analiz-4-avariynosti-za-2-kv-2019.docx> (дата звернення: 01.12.2022).
9. Стан аварійності та безпеки судноплавства на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна за 2019 рік з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/public-information/analiz-avariynostiza-2019.pdf> (дата звернення: 01.12.2022).
10. Стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна за 2020 рік з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/16012021/Zvit_2020.pdf (дата звернення: 01.12.2022).
11. Стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна за перше півріччя 2021 року з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: <https://data.gov.ua/dataset/cf069d00-9793-4974-9367->

- d39796282a59/resource/f9fa8a7c-74eb-4e62-ae62-7bcef5a02e/download/zvit_1pivrich_2021.pdf. (дата звернення: 01.12.2022).
12. Топалов В. П. Риски в судоходстве / В. П. Топалов, В. Г. Торский. — Одесса: Астропринт, 2007. — 368 с.
 13. Kristiansen S. Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis / S. Kristiansen. — Elsevier, 2010. — 508 p.
 14. Guema M. Combination of processing methods for various simulation data sets / M. Guema // TransNav. — 2008. — № 2(1). — P. 11–15.
 15. Kobyliński L. Risk analysis and human factor in prevention of CRG casualties / L. Kobyliński // TransNav. — 2009. — № 3 (4). — P. 443–448.
 16. Yin J. Quantitative Risk Assessment for Maritime Safety Management / PhD thesis. Hong Kong Polytechnic University. — 2011. <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/>

Kalinichenko Y., Boiko A., Postnikov Y.

METHOD OF GENERALIZED RISK ASSESSMENT OF MARITIME ACCIDENTS IN THE SYSTEM OF NAVIGATION SAFETY MANAGEMENT

The article deals with the method of generalized risk assessment of maritime accidents in the system of navigation safety management, which considers the most complex classes of maritime accidents (very serious accidents, serious accidents), types of factors affecting the safety of navigation. The method defines acceptable and unacceptable risks for each maritime accident using a curvilinear trapezoid of acceptable risk. With the help of such a trapezoid it is possible to increase the accuracy of the assessment of the generalized risk of maritime accidents using sea and river transport. At the same time, the hypothesis of the distribution of maritime accidents according to Poisson's law is substantiated based on statistical data on very serious maritime accidents, serious accidents, maritime incidents and incidents for maritime and river transport for the period from 2006 to 2021. The analysis showed that for water transport for very serious and serious accidents there is no reason to reject the null hypothesis of a Poisson distribution of the population. A formal representation of the risk of occurrence of maritime accidents, considering the factors affecting the safety of navigation and the expected average damage, is performed. The risks used in the work for each water transport (sea, river) are considered both by classes of maritime accidents (very serious accidents, serious accidents) and by types of factors affecting the safety of the vessel itself, man, environment and cargo.

Keywords: method, risk, maritime accident, maritime and river transport, risk, damage, probability, factor, shipping safety management system.

Давидов В.С., Доронін В.В., Любарець І.О.,

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ТА НАВІГАЦІЇ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ У СКЛАДНИХ НАВІГАЦІЙНИХ ТА ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

Анотація. У статті розглянути особливості управління та навігації великогабаритних контейнеровозів при їх експлуатації у складних навігаційних та гідрометеорологічних умовах. Запропоновано шляхи підвищення безпеки експлуатації великогабаритних суден контейнеровозів засобами навігації та управління, які мають вирішити проблему надто частоті аварійності суден контейнеровозів. Розглянуті та проаналізовано відносно недавні найбільш масштабні аварійні морські пригоди (АМП) суден контейнеровозів, визначені основні причини цих АМП, з огляду на які, запропоновано новий алгоритм роботи навігаційного містка суден контейнеровозів, оснований на використанні нових підходів щодо управління і навігації. Розроблені пропозиції щодо доцільності використання систем управління судном та носових підрулюючих пристроїв (НПП), при плаванні каналами і фарватерами та швартуванні великогабаритних суден контейнеровозів. Придїлено увагу маневруванню ультра великих суден контейнеровозів (англ. Ultra Large Container Carrier, (далі ULCC)). Через те що, коефіцієнт повноти корпусу судна ULCC відносно великий, а відхилення вектору сили від накопиченого діючого моменту інерції за рахунок підвищеної швидкості може досягати 40° від курсу судна на різких поворотах, поведінка таких суден при здійсненні плавання в складних навігаційних умовах має певні особливості і потребує від судноводіїв застосування принципово нових засобів навігації та управління з урахуванням конструктивних особливостей таких суден. Окрім цього, судна контейнеровози мають велику вітрильність, у порівнянні з суднами інших типів. При чому, вітрильність досягає великих значень, як і при повному завантаженні, так і в стані баласту, що є відмінною рисою суден контейнеровозів. Запропоновано використання математичної моделі за допомогою якої, визначається критерій безпеки при здійсненні плавання великогабаритних суден контейнеровозів в складних навігаційних та гідрометеорологічних умовах, який залежить від стійкості судна на циркуляції, поворотності, вітрильності, гідрометеорологічних умов, тощо, які дозволяють дотримуватись керованості таких суден для утримання на осі суднового ходу.

Ключові слова: безпека плавання, управління та навігація, алгоритм, кутомірно-далекомірний пристрій, траєкторія руху, судно контейнеровоз, критерій безпеки.

Постановка проблеми. Згідно із статистикою, наведеною Taylor & Francis Group, 90% світового вантажообігу припадає на морські перевезення. З них 35% припадає на контейнерні перевезення [1]. Завдяки динамічному розвитку економік Індії, Китаю, країн ЄС, США, Японії та ін., на узбережжях цих країн виникла потужна сітка портової інфраструктури. Збільшення обсягів торгівлі між вищевказаними країнами безпосередньо призводить до збільшення інтенсивності вантажоперевезень. А завдяки глобальній стандартизації та автоматизації промисловості ці перевезення все більше й більше стають контейнерними та якомога швидшими. Разом з тим, різкий зріст кількості суден контейнеровозів, їх розмірів, а особливо їх швидкості призвів до низки проблем, з якими судноплавство досі не зіштовхувалося.

Основна проблема полягає в тому, що загальноприйняті сьогодні засоби навігації та управління нездатні забезпечити безпеку експлуатації сучасних суден контейнеровозів.

Також, на таких судах відсутні технічні засоби, які б дозволили прогнозувати їх місцезнаходження на траєкторії руху. Про це яскраво свідчать відносно недавні великі аварії контейнеровозів Milano Bridge в Пусані 06.04.2020 [2], Ever Given у Суецькому каналі 23.03.2021 [3], та CSL Indian Ocean на р. Ельба 03.02.2016 [4].

Мета роботи. Визначення особливостей навігації та управління великогабаритних суден контейнеровозів при їх експлуатації в складних навігаційних та метеорологічних умовах. Розробка узагальненого алгоритму роботи ходового містка суден контейнеровозів з використанням координатного курсору ECDIS в якості високоточного кутомірно-далекомірного пристрою, та пропозицій щодо розробці математичної моделі, яка буде покликана встановити алгоритмічну залежність вихідного ефекту запропонованої моделі від сукупності параметрів управління та навігації (4) за допомогою яких, можна оцінити безпеку плавання суден контейнеровозів при проходженні каналів та інших скрутних ділянок, у вигляді параметрів вітрильності судна, параметрів, повороткості судна, параметрів стійкості судна на циркуляції та ін., які дозволяють дотримуватись керованості таких суден, при експлуатації в складних навігаційних та метеорологічних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням в області управління та навігації великогабаритних контейнеровозів при їх експлуатації у складних навігаційних та гідрометеорологічних умовах та забезпечення безпеки їх плавання приділяла увагу велика кількість як вітчизняних, так і зарубіжних учених, серед них: Драчов В.М.; Зубарєв В.Л.; Мальцев А.С.; Тюпиков Є.Є.; Ворохобин І.І.; Удалов В.І.; Давидов В.С.; Доронін В.В. та ін. [5].

Виклад основного матеріалу. Шалений попит на великі судна контейнеровози зумовив різкий ріст кількості таких суден на морських шляхах. Станом на сьогодні в світі налічується більше 400 суден контейнеровозів довжина яких сягає 397-400 м. Як було зазначено вище, судноплавство зіткнулося з новими проблемами під час експлуатації таких суден. При чому, більшість неприємностей виникає при маневруванні таких суден. 06.04.2020 судно Milano Bridge при підході до причалу в порту Пусан, протаранило 6 порталних кранів та одне пришвартоване судно. Згідно з висновком Корейського Морського Трибуналу, Milano Bridge підійшло до причалу з перевищенням швидкості та недостатніми маневровими якостями через неповне занурення гребного гвинта та пера керма (рис.1).

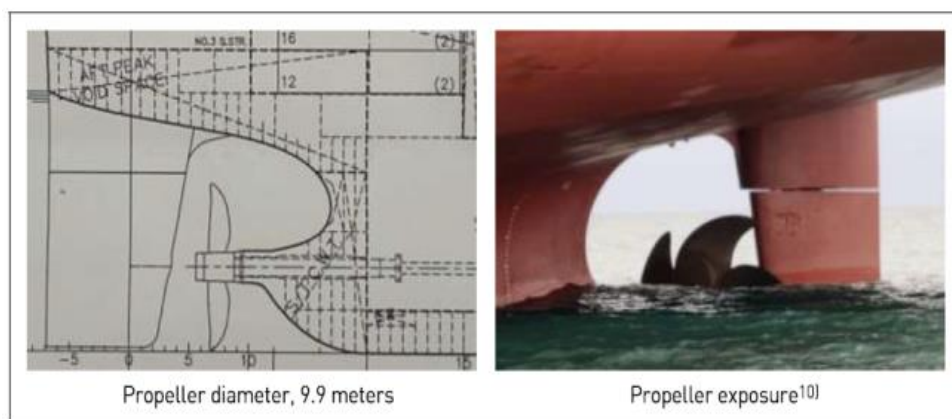


Рисунок 1 – Занурення гвинта та керма Milano Bridge при АМП.

З перевищенням швидкості існує лише один метод боротьби – її зниження. На перший погляд проста річ, проте не все так легко, як здається, особливо, коли мова йде про судна контейнеровози. Справа в тому, що судна контейнеровози мають дуже велику парусність,

як в баласті, так і в завантаженому стані. Це своєрідний феномен суден такого типу. Коли вони завантажені - то мають велику парусність завдяки великій кількості палубного вантажу, а коли в баласті – велику площу надводного борту, високу надбудову та маленьку осадку, через яке суттєво зменшується підводний об'єм судна і відповідно опір води. За таких обставин, судно буде вразливіше до дії вітру. На маленькій швидкості, коли потік, що набігає на перо керма, створює слабкий тиск момент бокової сили руля часто стає меншим сумарного моменту від дій сил вітру [6]. За таких обставин навіть самий слабкий вітер буде серйозно впливати на керованість таких суден. Наприклад, контейнеровоз Ever Given у Суецькому каналі 23.03.2021 зійшов із осі суднового ходу, саме завдяки вітру, який буквально за лічені хвилини поставив гігантське судно поперек каналу. Тому для того аби зберегти керованість судна дуже важливо підтримувати оптимальну швидкість. З іншого боку, зі збільшенням швидкості судна зменшується глибина під кілем через гідродинамічне просідання судна і накопичується момент інерції. Зважаючи на ці обставини, все зводиться до того, що судноводію необхідно спершу визначати, а потім тримати оптимальну швидкість, достатню для збереження керованості судна на всіх ділянках маневру та вчасно гасити інерцію. Така задача вирішується знанням інерційно-гальмівних характеристик судна та технічних характеристик силової енергетичної установки (СЕУ) і правильним її застосуванням в комплексі з НПП. Проте, наявність НПП на суднах контейнеровозах часто не дає очікуваних результатів, через те, що гвинт такого пристрою при стані судна в баласті, знаходиться дуже близько до поверхні води, де гідродинамічний тиск низький, і для хоч якоїсь ефективності потрібні високі обороти, які зумовлюють явище кавітації, яка в свою чергу, суттєво зменшує ефективність рушія НПП. Прямолинійна швидкість судна також істотно зменшує ефективність такого пристрою, який стає взагалі неефективним на швидкості 5 та більше вузлів. На судні, що рухається вперед, сила НПП додається дуже близько до центру гідродинамічної сили, але вона надто мала в порівнянні з силою підводного опору і тому не дає помітного ефекту. Більше того, потік води, що утворюється в районі тунелю НПП, значно знижує його корисний ефект. Особливості рушіїв та СЕУ більшості суден класу ULCC полягають в тому, що мінімальна кількість обертів гвинта на самому малому ходу, в середньому, сягає 25 об/хв., що при величезних розмірах рушія відповідає швидкості 5 вузлів. Звідси слідує, що на таких суднах для ефективного використання НПП, в першу чергу, потрібно зменшити швидкість до 5 вузлів і менше. Якщо тунель НПП недостатньо занурений (таке дуже часто буває, на порожніх суднах контейнеровозах в баласті), то судноводію не слід покладатись на пристрій взагалі і розраховувати повороти без нього.

Окрім високої швидкості та великої парусності, судна контейнеровози відрізняються від інших суден ще й гіршими маневреними якостями. На прикладі того ж Milano Bridge під управлінням капітана з 25-річним досвідом та не менш досвідченим лоцманом - не було враховано той факт, що гребний гвинт був занурений лише на 68%, так само, як і перо керма (рис. 1). Звідси випливає, що тиск води на перо керма був набагато меншим через менший потік води, що набігає на перо керма, ніж при повному зануренні гвинта та явища кавітації. До того ж, корисна площа самого пера керма також менша на 32% ніж при повному зануренні. Такі обставини зменшують ефективність пера керма на ті ж самі 30%. Окрім цього, запас глибини під кілем також значно відрізняється від того, який був на полігоні при визначенні діаметру циркуляції. Обертальний момент, створюваний пером керма залежить від швидкості потоку, що набігає на перо [7]. Збільшення швидкості попутного потоку при виході судна на мілководдя знижує швидкість потоку, що набігає на перо, і, як наслідок, ще більше знижує ефективність рульового пристрою. За таких умов, діаметр тактичної циркуляції судна суттєво збільшується і не відповідає діаметру вказаному в таблиці циркуляції, яка вимірювалась під час ходових випробуваннях судна в баласті.

Також існує накопичений, діючий момент інерції, що збігається з курсом судна на прямому ході. При поворотах великих суден контейнеровозів, особливо різких, вектор дії сили може відрізнятись від курсу судна до 30-40°, що викликає дрейф судна в протилежний бік повороту [8].

Аби не допускати типових АМП при виконанні маневрів, судноводії великогабаритних суден контейнеровозів мають вчасно робити дві речі:

- визначити точну траєкторію руху судна після виконання перекладки керма і зміни швидкості при даних умовах завантаження та конструктивних особливостей судна;
- виконання постійного контролю руху судна запланованою траєкторією.

Основна проблема полягає в тому, що судноводій не має інструменту, за допомогою якого він міг би визначити на якій траєкторії буде судно при виході на новий курс при заданому куті перекладки керма в умовах відмінних від тих, які були при мірних випробуваннях на полігоні. Інформація про маневрені елементи, згідно з Резолюцією ІМО А.601(15), яка представлена в більшості випадків циркуляцією на глибокій воді при повному завантаженні, і без вантажу лише при заповненні 100% баластних цистерн. Як правило, цими параметрами поворотності судна, визначеними на глибокій воді, за відсутності інших, і користуються при розрахунку точки перекладки керма і радіусу циркуляції. Такий спрощений підхід до обліку параметрів циркуляції, який не враховує глибини під кілем та занурення гребного гвинта з кермом, і є однією з найбільших помилок судноводіїв при плануванні маневрів, що за відсутності обліку інших чинників і призводить до АМП. Циркуляція характеризується лінійною та кутовою швидкостями, радіусом кривизни та кутом дрейфу. Радіус циркуляції на мілководді, що залежить від співвідношення осадки і глибини моря, можна оцінити за формулою А. Гофмана (1).

$$R_{уст}^M = \frac{R_{уст}}{1 + 0,1d/H - 0,71(d/H)^2}, \quad (1)$$

де $R_{уст}^M$ – радіус циркуляції на мілководді;

$R_{уст}$ – радіус циркуляції на глибині;

d – осадка судна;

H – глибина моря.

Наведена формула є приблизною і не враховує ні кут перекладки керма, ні занурення гребного гвинта. Тому її використання не може забезпечити бажану точність для розрахунку радіусу циркуляції. Натомість, доречно використовувати універсальні методи з розрахунку 2-х основних параметрів циркуляції, розроблені Драчовим В.М.. Це метод розрахунку точки перекладки керма і метод побудови дотичних до кривих циркуляції.

Метод визначення точки перекладки керма полягає у розрахунку попередження на мілководді, що розраховується за формулою (2) за допомогою розрахованого середнього коефіцієнта K , універсального для всіх типів суден.

$$S_M = S_{ГЛ} \cdot K = S_{ГЛ} \cdot [1 + (d/H_M) - 0,2], \quad (2)$$

де: S_M – попередження на мілководді, м;

$S_{ГЛ}$ – попередження на глибокій воді, м;

d – осадка судна, м;

H_M – глибина мілководдя від поверхні води, м.

При плаванні великогабаритних суден контейнеровозів в обмежених, мілководних умовах доцільно використовувати спосіб розрахунку повороту судна з використанням дотичних до кривих циркуляції (метод дотичних) [9].

Для полегшення та пришвидшення оцінки безпеки виконання маневру, можливо вивести критерій безпечного виконання маневру великогабаритних суден контейнеровозів за складних навігаційних та гідрометеорологічних умов та виразити його через функцію $(F(T))$ сукупності параметрів (Y) (3): Створена модель буде покликана встановити алгоритмічну залежність вихідного ефекту запропонованої моделі, що визначається цільовою функцією $(F(T))$ та її показниками ефективності (α) від сукупності параметрів (Y) (4).

$$Y \in Z = \{F(T), \alpha \in G\}, \quad (3)$$

$$X = X(\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \bar{Y}_3, \bar{Y}_4, \bar{Y}_5, \bar{Y}_6, \bar{Y}_7, \bar{Y}_8, \bar{Y}_9, \bar{Y}_{10}, \bar{Y}_{11}) \quad (4)$$

де:

\bar{Y}_1 – основні техніко-експлуатаційні характеристики судна;

\bar{Y}_2 – інерційно-гальмівні параметри судна;

\bar{Y}_3 – параметри стійкості судна на циркуляції;

\bar{Y}_4 – параметри повороткості судна;

\bar{Y}_5 – параметри вітрильності судна;

\bar{Y}_6 – параметри гідрологічної обстановки;

\bar{Y}_7 – параметри гідрометеорологічних умов;

\bar{Y}_8 – параметри зносу судна із запланованої траєкторії циркуляції під впливом накопиченого чинного моменту інерції;

\bar{Y}_9 – параметри ефективності пера керма та рушія;

\bar{Y}_{10} – параметри ефективності НПП;

\bar{Y}_{11} – параметри ефективності буксирів;

Оцінивши маневр за критерієм безпеки, та знаючи точну траєкторію руху судна після переключення керма, судноводію залишається контролювати виконання маневру. Помітити небезпеку на ранній стадії допомогло б знання швидкості зміни дистанції від кінцівок судна до перепони. Для найкращої точності контролю швидкості зміни дистанції від носу до причалу, та корми до причалу було б доцільно використання координатного курсору ECDIS в якості високоточного кутомірно-далекомірного пристрою. Спосіб високоточного вимірювання пеленгів та дистанцій за допомогою координатного курсору, який має функцію автоматичного захоплення навігаційних об'єктів, координати яких внесені в електронну базу даних ЕКНІС і автоматичного стеження за ними, дозволяє вимірювати відстані з точністю СКП визначення місця судна в диференціальному режимі ГНСС і точністю нанесення навігаційних орієнтирів на навігаційні карти [10]. Найголовнішою перевагою високоточного вимірювання пеленгів та дистанцій за допомогою координатного курсору є те, що завдяки ньому можна з точністю до 3,5м. швидко визначити параметри циркуляції судна та траєкторії руху носа та корми в даний момент часу.



Рисунок .2 – Узагальнений алгоритм роботи суднового містка суден контейнеровозів при експлуатації в складних навігаційних та гідрометеорологічних умовах.

Нарешті, з урахуванням вищесказаного доцільно розробити алгоритм роботи суднового містка суден контейнеровозів при експлуатації в складних навігаційних та гідрометеорологічних умовах, підходах до причалу, русі по фарватеру, тощо, узагальнений варіант якого матиме такий вигляд:

Висновки. Методи навігації та управління великогабаритними суднами контейнеровозами мають свої особливості, які суттєво відрізняються від інших типів суден. Завдяки конструктивним особливостям, великогабаритні контейнеровози мають велику вітрильність, високу мінімальну швидкість та відносно неефективні НПП. Зважаючи на те, що більшість АМП таких суден відбуваються під час маневрування, то розрахунок та контроль виконання маневру відіграють найважливішу роль в здійсненні безпечної навігації та управління суден.

Загальну оцінку безпеки виконання маневру можна здійснити, за так званим критерієм безпеки, який залежить від низки важливих параметрів, які безпосередньо впливають на керованість суден контейнеровозів. Визначення параметрів гідрометеорологічних умов, параметрів ефективності пера керма та рушія, параметрів ефективності НПП потребують проведення окремих досліджень.

Застосування запропонованого алгоритму роботи навігаційного містка великогабаритних суден контейнеровозів з використанням, для контролю виконання маневру судна, координатного курсору ECDIS в якості високоточного кутомірно-далекомірною пристрою, як і розробка самого методу, потребує подальшого дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Taylor & Francis Group. 30th edition of Lloyd's Maritime Atlas // 2019, С. 11.
2. Korea Maritime Safety Tribunal. Marine Safety Investigation Report on Milano Bridge MSI Report 2021-001 //, 2021, С. 6-78.
3. United Arab Insurance Federation. Insurance Report on Ever Given grounding in Suez Canal //, 2021, С. 3-8.
4. Federal Bureau of Maritime Casualty Investigation. Investigation Report 34/16 //, 2016.
5. Давидов В.С., Доронін В.В., Сп'ян О.М., Алєйніков М.В. Комплексний підхід до забезпечення навігаційної безпеки плавання великогабаритних контейнеровозів на циркуляції в мілководних районах. ДУІТ. Збірник наукових праць «Водний транспорт», вип. 3(34)-2021, С.5-12.
6. Сизов В.Г. Теория корабля [текст]: учебн. пособие / В.Г. Сизов. –Одесса: Феникс, 2003. – 57 с.
7. Мальцев А.С. Теория и практика безопасного управления судном при маневрировании [текст] / А.С. Мальцев. – Дис. докт. техн. наук.:05:22:16 – судовождение. – О.: 2007– 215 с.
8. Сергиенко В. В. ловушке аварийности. Морские вести №12-2020. [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу: <http://www.morvesti.ru>.
9. Драчев В.Н. Учет циркуляции при плавании в стесненных районах. Монография. [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу:<http://www.window.edu.ru>>catalog, 107с.
10. Давидов В.С., Овчинникова А.І. Спосіб контролю місце розташування великогабаритних суден і складів на траєкторії руху шляхом використання координатного курсора ЕКНІС в режимі високоточного кутомірно-далекомірною пристрою. ХДМА. Збірник наукових праць «Науковий вісник», вип.№1(18)- 2018, С.4-9.

REFERENCES

1. Taylor & Francis Group. 30th edition of Lloyd's Maritime Atlas // 2019, С. 11.
2. Korea Maritime Safety Tribunal. Marine Safety Investigation Report on Milano Bridge MSI Report 2021-001 //, 2021, p. 6-78.
3. United Arab Insurance Federation. Insurance Report on Ever Given grounding in Suez Canal //, 2021, p. 3-8.
4. Federal Bureau of Maritime Casualty Investigation. Investigation Report 34/16 //, 2016.
5. Davydov V.S., Doronin V.V., Spiyan O.M., Aleinikov M.V. A comprehensive approach to ensuring the navigational safety of the navigation of large-sized container ships during turning circle in shallow water areas. SUIT. Collection of scientific works "Vodnyi Transport", vol. 3(34)-2021, p.5-12.
6. Sizov V.G. Theory of a ship [text]: manual / V.G. Sizov. –Odesa: Fenix, 2003. – 57 p.

7. Maltsev A.S.. Theory and practice of safe ship control during maneuvering [text] / A.S. Maltsev. – Dissertation: 05:22:16 – Navigation. – O.: 2007– 215 p.
8. Sergiienko V. V. In the emergency trap. Morskiie vesti №12-2020. [electronic resource].– Access: <http://www.morvesti.ru>.
9. Drachev V.N. Taking into account of turning circle during sailing in constrained areas [electronic resource].– Access: <http://www.window.edu.ru>>catalog, 107p.
10. Davydov V.S., Ovchinnikova A.I. A way to control the position of large vessels and warehouses on the trajectory of the path using the way of the ECDIS coordinate cursor in the mode of *goniometric-ranging device*.. HSMA. Collection of scientific works «Naukovyi Visnyk», vol.№1(18)- 2018, p.4-9.

Davydov V.S., Doronin V.V., Liubarets I.O.

Features of control and navigation of large container ships during their operation in difficult navigational and meteorological conditions

The purpose of the article is to consider the features of control and navigation of large container ships during their operation in difficult navigational and hydro-meteorological conditions. Ways to increase the safety of operation of large container ships by means of navigation and control are proposed, which should solve the problem of frequent accidents of container ships. The relatively recent most large-scale maritime accidents (MA) of container ships have been considered and analysed. The main causes of these MAs are determined, in view of which, a new algorithm for the operation of the navigation bridge of container ships is proposed, based on the use of new approaches to management and navigation. Proposals have been developed regarding the expediency of using ship control systems and bow thrusters during navigation in canals, fairways and mooring. Attention have been paid to the maneuvering of ultra large container carriers (ULCC). Due to the fact that the block coefficient of the ULCC vessel hull is relatively large, and the deviation of the force vector from the accumulated active moment of inertia because of the increased speed can reach 40° from the vessel's course, the behaviour of such vessels when sailing in difficult navigational conditions has certain features. It requires the use of fundamentally new means of navigation and control from the shipmasters, taking into account the design features of such vessels. In addition, container ships have great wind area, compared to vessels of other types. Moreover, wind area reaches high values, both when fully loaded and in the ballast condition, which is a distinctive feature of container ships. It is proposed to use a mathematical model with the help of which the safety criterion is determined when sailing large-sized container ships in difficult navigational and hydro-meteorological conditions, which depends on the stability of the vessel on turning circle, wind area, hydro-meteorological conditions, etc., which allow maintaining the controll of such vessels to keep them on the vessel's course.

Key words: *safety of navigation, control and navigation, algorithm, goniometric-ranging device, motion trajectory, container ship, safety criterion.*

Грецьких Д.В., Алексєєв В.О., Гомозов А.В., Катрич В.О., Нестеренко М.В.

РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ РЕКОНФІГУРОВАНИХ РЕКТЕН, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В РІЗНИХ СИСТЕМАХ БЕЗПРОВІДНОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

Предметом дослідження у статті є математична модель радіоелектронних систем (РЕС), що мають у складі антени та тракти їх збудження з нелінійними характеристиками, яка забезпечує припустиму для практики проектування точність аналізу показників якості досліджуваних РЕС й параметри електромагнітної сумісності (ЕМС). **Метою** є розроблення математичної моделі передавальної багатовходової випромінювальної структури з нелінійними характеристиками в зоні Френеля. **Завдання:** обґрунтувати вибір структурної схеми багатовходової випромінювальної структури, випромінювачі якої мають розподілений нелінійний поверхневий імпеданс; отримати необхідні для розв'язку загального завдання аналізу нелінійні інтегральні рівняння (НІР) відносно густини поверхневого струму для випромінювачів з розподіленою нелінійністю, які збуджуються довільним розподілом поля; одержати співвідношення для розрахунку сфокусованих електромагнітних полів (ЕМП), які створюються багатовходовими випромінювальними структурами з нелінійними характеристиками в зоні Френеля. Використовуваними **методами** є: математичні методи електродинаміки й теорії антен з нелінійними елементами (АНЕ), математичний апарат теорії НВЧ-кіл та багатополіусників. Отримано наступні **результати**. Запропоновано електродинамічний підхід для аналізу всієї сукупності нелінійних ефектів, які виникають у передавальних багатовходових випромінювальних структурах з нелінійними характеристиками, що у загальному випадку дозволяє врахувати взаємний вплив передавальної й приймальної антен з нелінійними характеристиками в самій системі й електродинамічну взаємодію передавальної антени з нелінійними характеристиками з РЕС іншого призначення. Отримано компонентні рівняння (якими є НІР) багатовходових випромінювальних структур, що встановлюють зв'язок амплітудно-фазового розподілу на входах випромінювачів з розподіленою нелінійністю з амплітудно-фазовим розподілом на їхніх поверхнях. Отримано математичну модель для аналізу багатовходових випромінювальних структур з нелінійними характеристиками в зоні Френеля.

Ключові слова: багатовходова випромінювальна структура; антени з нелінійними елементами; нелінійні граничні умови; нелінійні інтегральні рівняння; багатомодове збудження; фокусування електромагнітного випромінювання.

Вступ. Одним з актуальних напрямів у радіотехніці є формування потужних сфокусованих електромагнітних випромінювань (ЕМВ) для розв'язання низки прикладних завдань, наприклад, створення систем безпровідної передачі енергії (БПЕ) сфокусованим мікрохвильовим променем [1-3], систем функціонального придушення й ураження сфокусованим ЕМВ РЕС різного класу і призначення [4-6] та інших РЕС. Однак, при практичній реалізації потужних РЕС із фокусуванням ЕМВ можуть виникнути проблеми, пов'язані із проявом шкідливих нелінійних ефектів, які можуть породжуватися як нелійними елементами (НЕ), функціонально необхідними для роботи антен і трактів їх збудження (наприклад, активні фазовані антенні решітки (АФАР)), так і паразитними в них нелійнностями. Останні можуть бути викликані конструкцією антени (наприклад, які утворюються в місцях з'єднання елементів дзеркальної антени окисними плівками, що

мають нелінійні нелінійні вольт-амперні характеристики [7]) або несприятливим режимом роботи активних елементів антени, зокрема активних елементів в АФАР [8, 9]. Оцінку шкідливих нелінійних ефектів потрібно проводити як з погляду їхнього впливу на ЕМС, так і на якість самої системи. Зокрема, при побудові передавальних сфокусованих антен виникають питання, що вимагають проведення додаткових досліджень. Ці питання пов'язані з посиленням ролі різних факторів обумовлених наявністю НЕ, що призводять до зміни заданого амплітудно-фазового розподілу в антенах. Це, у свою чергу, накладає обмеження на показники якості РЕС, які залежать від ступеню фокусування електромагнітного випромінювання в точку спостереження.

Слід зазначити, що при високих рівнях випромінюваної потужності, або в досить складному електродинамічному оточенні шкідливі нелінійні ефекти можуть проявляти себе досить помітно.

У цілому, до теперішнього часу теорія АНЕ [10-12] просунута досить далеко. Це забезпечує можливість коректного аналізу широкого класу різноманітних типів АНЕ. Проте варто помітити, що математичним моделям АНЕ, які призначені для аналізу поля в зоні Френеля в доступній літературі увага практично не приділялася. Таке становище обмежує можливості урахування впливу нелінійних ефектів в АНЕ при оцінці реальних характеристик і параметрів ЕМС РЕС із фокусуванням ЕМВ. Все це призводить до необхідності вдосконалення теорії передавальних антен з нелінійними характеристиками для зони Френеля.

У даній роботі розроблена математична модель передавальної багатовходової випромінювальної структури (наприклад, АФАР, багатопозиційна система випромінювачів [13]) до складу якої входять випромінювачі з розподіленою нелінійністю, що придатна для аналізу електромагнітного поля в зоні Френеля.

Структурна схема антени з нелінійними характеристиками. В [7] відзначено, що незалежно від того, чи є джерелом нелінійних ефектів в антенах вхідні до її складу пристрої, в які спеціально вбудовані НЕ або нелінійні ефекти в антенах є наслідком несприятливого режиму роботи активних елементів пристрою, доцільно обидва зазначених типу пристроїв розглядати як єдиний клас – клас антен з нелінійними елементами. Досить загальна математична модель, яка придатна для аналізу широкого класу АНЕ (антени-підсилювачі, антени-генератори, антени-змішувачі, антени-випрямлячі (ректени) та ін.), запропонована в [7]. Ця модель дозволяє аналізувати обидві групи нелінійних ефектів в антенах - залежність вихідних характеристик антени від рівня вхідного впливу та утворення у відгуку антени нових спектральних складових. Однак, в [7] параметри АНЕ, що визначають її зв'язок із зовнішнім простором, були визначені тільки для зони Фраунгофера.

У даний час стрімко розвиваються РЕС, наприклад, системи БПЕ, у складі яких є антени з нелінійними характеристиками, причому в яких (в залежності від технології передачі енергії [1]) передавальна та приймальна антени можуть перебувати на довільній відстані (ближня зона, зона Френеля, зона Фраунгофера). Ця обставина призводить до того, що необхідно враховувати взаємний зв'язок між передавальною та приймальною антенами. Строго кажучи, для повного аналізу всієї сукупності електромагнітних процесів, що відбуваються в РЭС, до складу яких входять антени з нелінійними характеристиками (які розташовані в довільній зоні відносно одна одної), можна застосувати підхід [14], в основі якого лежить єдине уявлення, на електродинамічному рівні, про функціонування систем БПЕ широкого класу й призначення. В [15, 16] визначені параметри математичної моделі системи БПЕ, що описують внутрішньосистемні процеси та міжсистемну взаємодію (взаємодія системи БПЕ з іншими радіоелектронними системами). Співвідношення для обчислення зовнішніх параметрів систем БПЕ були отримані в [17]. Для доказу універсальності розробленої в [14] нелінійної математичної моделі електродинамічного

рівня системи БПЕ проведено порівняльний аналіз розрахункових результатів з відомими з літератури теоретичними та експериментальними даними. Результати цього аналізу [18] підтвердили коректність запропонованої моделі та її універсальність.

В [19] відзначено, що підхід [14] для аналізу та оптимізації систем БПЕ можна узагальнити на інші РЕС (до складу яких входять антени з нелінійними характеристиками) на етапі їхнього електродинамічного моделювання з подальшим уточненням зовнішніх характеристик для конкретних класів РЕС.

Таким чином, досить адекватну математичну модель передавальної АНЕ можна одержати із загальної нелінійної математичної моделі електродинамічного рівня системи БПЕ [14]. У даній роботі математична модель передавальної АНЕ в зоні Френеля побудована при наступних припущеннях:

- розглядається тільки передавальна підсистема (електромагнітні поля, створювані передавальною підсистемою визначаються в зоні Френеля на відстанях, при яких можна знехтувати взаємним зв'язком передавальної та приймальної антен);
- міжсистемна взаємодія [16] не враховується.

З урахуванням зроблених припущень та [14] структурну схему передавальної багатовходової випромінювальної структури з нелінійними характеристиками можна представити у вигляді з'єднання лінійних (ЛПС) та нелінійних (НПС) підсхем, яким у відповідність поставлені лінійні (ЛБ) і нелінійні (НБ) багатополосники (рис. 1). У ЛПС входять лінії передачі, узгоджувальні ланцюги, фазообертачі, атенюатори й сукупність всіх інших лінійних елементів передавального антено-фідерного тракту. У НПС входять всі активні та пасивні НЕ.

Всі НЕ, що входять до складу передавальних кіл та випромінювачів, виділені в окрему підсхему – НБ, що описується в часовій області діагональними матричними операторами $\tilde{Q}_{N_T}\{\}$ й $\tilde{Q}_{N_{RT}}\{\}$ [14]. Багатополосник зовнішніх пристроїв характеризується матрицею розсіяння $S_S(\omega)$. Багатополосник поставлений у відповідність лінійним елементам описується змішаною матрицею $Q_T(\omega)$ [7, 14]. Багатополосник поставлений у відповідність випромінювальній структурі описується змішаною матрицею $Q_R(\omega)$ [14], що зв'язує падаючі та відбиті хвилі в перетинах $\beta-\beta$ й амплітуди збіжних та розбіжних хвиль у каналах вільного простору в перетинах $\delta-\delta$. Канали вільного простору, по яким відбувається передача електромагнітної енергії, інтерпретується як N (по числу мод у збуджуючих випромінювачі лініях передачі) ортогональних парціальних полів, що поширюються в деякому багатохвильовому хвилеводі.

Нелінійні інтегральні рівняння багатовходових випромінювальних структур при їх багатомодовому збудженні. Одержимо компонентні рівняння (якими є не нелінійні інтегральні рівняння) багатовходових випромінювальних структур, що встановлюють зв'язок амплітудно-фазового розподілу на входах випромінювачів з розподіленою нелінійністю з амплітудно-фазовим розподілом на їхніх поверхнях.

Задача вирішується в такій постановці: в однорідному ізотропному просторі з параметрами ϵ_a, μ_a розташована система випромінювачів з розподіленою нелінійністю, які займають об'єми V_i (рис. 1).

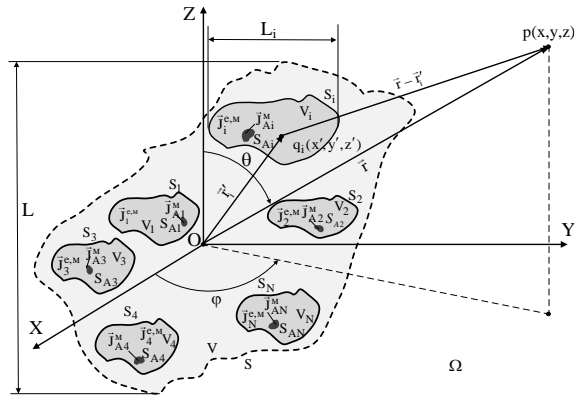


Рисунок 1 – Випромінювальна структура довільної конфігурації

В об'ємах V_i є сторонні джерела $\vec{J}_i^{c,e,m}$ з різними частотами ω_k ($k = \overline{0, K}$, K – число різних частот зовнішніх сигналів), що збуджують випромінювачі та створюють на їхніх поверхнях у точках q_i напруженості полів $\vec{E}^{ct}(\vec{r}', \omega_k)$, $\vec{H}^{ct}(\vec{r}', \omega_k)$. Для періодичного або квазіперіодичного сталого режиму випромінювачів потрібно знайти розподіли густини поверхневого струму $\vec{J}_i^{c,m}$ на випромінювачах через нормовані амплітуди падаючих хвиль $\mathbf{a}_T^\beta(\omega_k)$ (рис. 1) в апертурях збудження S_{A_i} (рис. 2).

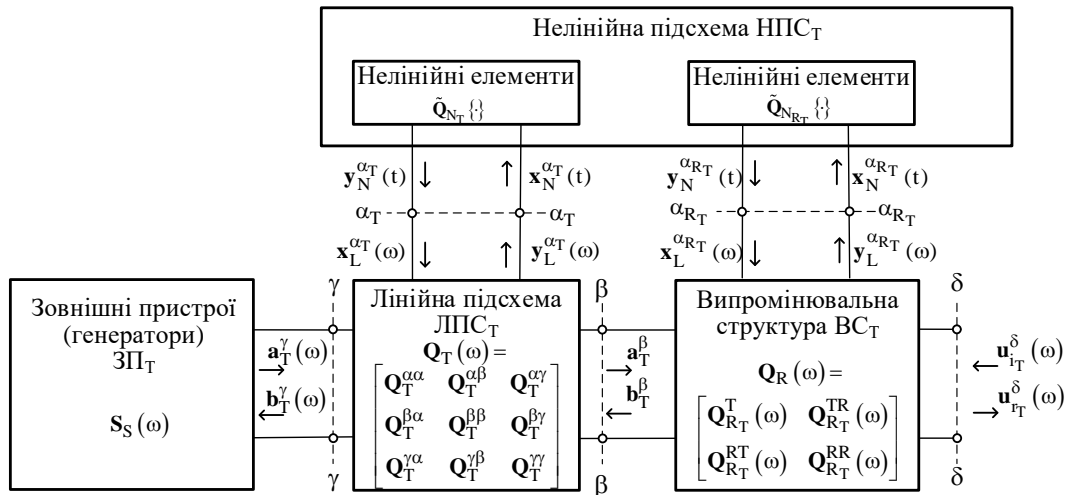


Рисунок 2 – структурна схема АНЕ

На рис. 2. \vec{r}' позначено радіус-вектор змінної точки на поверхні об'єму V_i (точка інтегрування q), \vec{r} – радіус-вектор точки, яка не належить жодному з об'ємів V_i (точка спостереження p).

Під випромінювачами з розподіленою нелінійністю будемо розуміти тіла, на поверхнях S_i яких виконуються локальні нелінійні граничні умови (НГУ), згідно яким миттєві значення тангенціальних складових векторів напруженості електричного $\vec{E}(\vec{r}', t)$ та магнітного $\vec{H}(\vec{r}', t)$ полів зв'язані співвідношенням [20]

$$\vec{n}(\vec{r}') \times \vec{E}(\vec{r}', t) = \hat{\mathbf{Z}}[\vec{n}(\vec{r}') \times \vec{H}(\vec{r}', t)], \quad (1)$$

або в еквівалентному вигляді

$$\vec{J}^M(\vec{r}', t) = -\hat{Z}[\vec{J}^e(\vec{r}', t)]. \quad (2)$$

де $\vec{n}(\vec{r}')$ – зовнішня нормаль до поверхні тіла в точці \vec{r}' ; $\vec{J}^M(\vec{r}', t) = \vec{E}(\vec{r}', t) \times \vec{n}(\vec{r}')$, $\vec{J}^e(\vec{r}', t) = \vec{n}(\vec{r}') \times \vec{H}(\vec{r}', t)$ – миттєві значення еквівалентних поверхневих струмів; $\hat{Z}[\cdot]$ – нелінійний оператор поверхневого імпедансу.

У загальному випадку, для точного визначення $\hat{Z}[\cdot]$ необхідно вирішити граничну задачу в строгій постановці. Однак часто в цьому немає необхідності: для ряду задач можна визначити оператор $\hat{Z}[\cdot]$, як й у випадку будь-яких інших еквівалентних граничних умов із розв'язку більш простих задач [20]. Тому надалі не конкретизуємо вид оператора $\hat{Z}[\cdot]$ й використаємо лише НГУ вигляду (1) або (2).

Найбільш універсальним й адекватним для розв'язку поставленого завдання є принцип еквівалентності та метод інтегральних рівнянь. Принцип еквівалентності є одним з фундаментальних принципів, що використовується при розв'язку завдань електромагнітного збудження різних електродинамічних об'єктів методом інтегральних рівнянь. Його застосування дозволяє спростити вихідну постановку завдання за рахунок його поділу на два, а саме на завдання збудження двох областей по кожну сторону від апертури S_{Ai} (рис. 2), тобто усередині об'єму V_i (нормованими амплітудами падаючих хвиль $a_{Tkn}^{\beta i}$ (рис. 1)) і зовні, у припущенні, що апертура замінена ідеальним провідником. Питання обґрунтування застосування принципу еквівалентності для аналізу антен, поверхня яких має лінійний поверхневий імпеданс, були розглянуті в [21–23].

Особливості застосування принципу еквівалентності для аналізу антен, поверхневий імпеданс яких має нелінійні властивості, зазначені в [24].

Для розв'язку завдання про розподіл струму на поверхні $S = \sum_{i=1}^N S_i$ скористаємося запропонованим в [20] методом інтегральних рівнянь, які, у силу НГУ (1), (2), є НІР. В [20] відзначено, якщо завдання є нелінійним, то в загальному випадку необхідно оперувати з фізичними величинами – часовими залежностями полів, тому що нелінійні операції не можна провадити безпосередньо з комплексними амплітудами [25]. Отже, розв'язок завдання про збудження тіл із НГУ потрібно проводити в просторово-часовій області. В [20] показано, що перехід у просторово-частотну область можливий при аналізі сталого періодичного або квазіперіодичного режиму збудження із частотами ω_k ($k = \overline{0, K}$, K – число різних частот), тобто

$$\vec{E}_i^{ct}(\vec{r}, t) = \sum_{k=-K}^K \delta_k \vec{E}_{mi}^{ct}(\vec{r}, \omega_k) e^{j\omega_k t}, \quad (3)$$

де $\vec{E}_{mi}^{ct}(\vec{r}, \omega_k)$ – комплексна амплітуда напруженості електричного поля сторонніх джерел у точці \vec{r} на частоті ω_k , $\delta_k = 1$, якщо $\omega_k = 0$ й $\delta_k = 1/2$, якщо $\omega_k \neq 0$, а відгук, у якості якого розглядається розподіл густини електричного струму на поверхні випромінювача, шукається на комбінаційних частотах

$$\begin{aligned} \nu_n &= m_{0n}\omega_0 + m_{1n}\omega_1 + \dots + m_{kn}\omega_k; \\ m_{in} &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots, M \end{aligned} \quad (4)$$

у вигляді:

$$\bar{J}^e(\bar{r}_i', t) = \sum_{l=-M}^M \delta_l \bar{J}_m^e(\bar{r}_i', \nu_n) e^{j\nu_l t}, \quad (5)$$

де \bar{J}_m^e – комплексна амплітуда густини електричного струму (надалі, для скорочення запису, індекс m будемо опускати).

Узагальнимо НІР отримані в [20] на систему випромінювачів (рис. 2). У цьому випадку під областю інтегрування й областю зміни точки спостереження варто розуміти поверхню не одного, а сукупності випромінювачів, тобто

$$\begin{aligned} \iint_S \{ \dots \} dS_q &= \iint_{S_1} \{ \dots \} dS_1 + \iint_{S_2} \{ \dots \} dS_2 \dots \iint_{S_N} \{ \dots \} dS_N = \\ &= \sum_{i=1}^N \iint_{S_i} \{ \dots \} dS_i. \end{aligned}$$

Тоді рівняння для системи випромінювачів можна записати також у вигляді системи НІР, у якій невідомими функціями будуть густини струмів на окремих i -х випромінювачах на частотах ν_n

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \bar{n}(\bar{r}) \times \iint_{S_i} \{ -j\nu_n \mu \bar{J}^e(\bar{r}_i', \nu_n) G_n(\bar{r}, \bar{r}_i') + \\ + \frac{1}{j\nu_n \epsilon} \text{grad}_p \text{div}_p (\bar{J}^e(\bar{r}_i', \nu_n) G_n(\bar{r}, \bar{r}_i')) - \\ - \text{rot}_p \{ \mathfrak{Z}_n \{ \hat{\mathbf{Z}} [\sum_{l=-N}^N \delta_l \bar{J}^e(\bar{r}_i', \nu_l) e^{j\nu_l t}] \} G_n(\bar{r}, \bar{r}_i') \} \} dS_i = \\ = \bar{n}(\bar{r}) \times \bar{E}_i^{\text{ext}}(\bar{r}, \nu_n) \quad \forall \nu_n, n = \overline{-M, M}. \end{aligned} \quad (6)$$

Тут $\bar{n}(\bar{r})$ орт зовнішньої нормалі поверхні S в точці спостереження p , $\bar{J}^e(\bar{r}_i', \nu_n)$ – комплексна амплітуда розподілу густини поверхневого електричного струму із частотою ν_n на i -му випромінювачі; $G_n(\bar{r}, \bar{r}_i') = \exp(-jk_n |\bar{r} - \bar{r}_i'|) / (4\pi |\bar{r} - \bar{r}_i'|)$ – функція Гріна вільного простору в частотній області; $k_n = \nu_n / c$ – хвильовий коефіцієнт; M – число комбінаційних частот, що враховують при розв'язанні НІР; $\mathfrak{Z}_n \{ \cdot \}$ – оператор перетворення Фур'є, який

$$\text{визначений у такий спосіб } \mathfrak{Z}_n \{ \cdot \} = \int_{-\infty}^{\infty} \{ \cdot \} e^{-j\nu_n t'} dt'.$$

Формула (6) являє собою систему рівнянь щодо комплексних амплітуд густин поверхневого електричного струму $\bar{J}^e(\bar{r}_i', \nu_n)$. Кожне рівняння визначене на частоті ν_n , а розмірність системи дорівнює числу частот, що враховують при розрахунку на число випромінювачів.

Представимо нелінійний оператор $\hat{\mathbf{Z}}[\cdot]$ у вигляді суми лінійної та нелінійної частин, тобто $\hat{\mathbf{Z}}[\cdot] = \hat{\mathbf{Z}}_L[\cdot] + \hat{\mathbf{Z}}_N[\cdot]$:

$$\mathfrak{Z}_n \{ \hat{\mathbf{Z}}[\cdot] \} = \mathfrak{Z}_n \{ \hat{\mathbf{Z}}_L[\cdot] + \hat{\mathbf{Z}}_N[\cdot] \} =$$

$$= \widehat{\mathbf{Z}}_L[\bar{\mathbf{J}}^e(\bar{\mathbf{r}}, \nu_n)] + \Im_n\{\widehat{\mathbf{Z}}_N[\bar{\mathbf{J}}^e(\bar{\mathbf{r}}', t)]\}$$

і тоді (6) можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{n}}(\bar{\mathbf{r}}) \times \int_{S_i} \{-j\nu_n \mu \bar{\mathbf{J}}^e(\bar{\mathbf{r}}', \nu_n) G_n(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}') + \\ & + \frac{1}{j\nu_n \varepsilon} \text{grad}_p \text{div}_p(\bar{\mathbf{J}}^e(\bar{\mathbf{r}}', \nu_n) G_n(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}')) - \\ & - \text{rot}_p\{\widehat{\mathbf{Z}}_L[\bar{\mathbf{J}}^e(\bar{\mathbf{r}}', \nu_n)] G_n(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}')\} \} dS_i = \\ & = \bar{\mathbf{n}}(\bar{\mathbf{r}}) \times [\mathbf{E}_i^{\text{CT}}(\bar{\mathbf{r}}, \nu_n) + \mathbf{E}_N(\bar{\mathbf{r}}, \nu_n)] \quad \forall \nu_n, \quad n = \overline{-M, M}, \end{aligned}$$

де позначено

$$\begin{aligned} & \bar{\mathbf{E}}_N(\bar{\mathbf{r}}, \nu_n) = \\ & = -\sum_{i=1}^N \int_{S_i} \text{rot}_p\{\Im_n\{\widehat{\mathbf{Z}}_N[\sum_{n=-M}^M \delta_n \bar{\mathbf{J}}^e(\bar{\mathbf{r}}', \nu_n) e^{j\nu_n t}]\} G_n(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}')\} dS_i. \end{aligned}$$

Нелінійність $\widehat{\mathbf{Z}}_L[\cdot]$ призвела до появи в НР доданку $\bar{\mathbf{E}}_N(\bar{\mathbf{r}}, \nu_n) \neq 0$. Цей доданок можна інтерпретувати як поле $\bar{\mathbf{E}}_N(\bar{\mathbf{r}}, \nu_n)$ додаткових сторонніх джерел, що збуджує випромінювачі з розподіленою нелінійністю. Таким чином, на частотах, які не збігаються із частотами зовнішнього збудження $\bar{\mathbf{E}}_N(\bar{\mathbf{r}}, \nu_n) \neq 0$, й отже, $\bar{\mathbf{J}}^e(\bar{\mathbf{r}}', \nu_n) \neq 0$ при $\nu_n \neq \omega_k$, тобто з'являється відгук пристрою на побічних частотах. Для частот $\nu_n = \omega_k$ вектор $\bar{\mathbf{E}}_N(\bar{\mathbf{r}}, \nu_n)$, як поле додаткових джерел, змінює розподіл напруженості стороннього поля $\bar{\mathbf{E}}^{\text{CT}}(\bar{\mathbf{r}}, \omega_k)$ й за рахунок цього змінюється розподіл густини поверхневого струму $\bar{\mathbf{J}}^e(\bar{\mathbf{r}}', \omega_k)$, що, природно, веде до зміни зовнішніх характеристик випромінювачів з розподіленою нелінійністю на цих частотах.

Далі конкретизуємо вид НР (6) відносно $\bar{\mathbf{E}}_i^{\text{CT}}(\bar{\mathbf{r}}, \nu_n)$. Вважаємо, що випромінювачі збуджуються апертурами S_{Ai} (рис. 2) із заданими на них довільними розподілами струму $\bar{\mathbf{J}}_{Ai}^M$. При цьому передбачається, що для апертур відома її система власних функцій (мод), розкладанням по яким й апроксимується густина магнітного струму на апертурах. Такий спосіб збудження дозволяє природно врахувати зміну розподілу поля в області апертур як через вплив нелінійних властивостей поверхні випромінювачів з розподіленою нелінійністю, так і через збільшення електричних розмірів апертур на частотах вищих гармонік або на комбінаційних частотах, що необхідно для коректного розв'язку загального завдання аналізу.

Нехай Ω – довільний об'єм, обмежений замкнутими поверхнями $S_i \cup S_{Ai}$ (рис. 2). Будемо вважати, що об'єм Ω збуджується на кожній із частот ν_n , обумовлених співвідношенням (4), апертурами $S_{Ai} \subset S_i$ (рис. 3). Розподіл поля (або еквівалентного поверхневого струму) на апертурах можна представити у вигляді розкладання по системі власних функцій області S_{Ai} . В якості такої системи доцільно вибрати систему власних поперечних функцій (мод) регулярної лінії передачі, перетин якої збігається з S_{Ai} . Тому розглянемо випадок багатомодового збудження об'єму Ω регулярною лінією передачі в області поверхні S_{Ai} .

Вважаємо, що поверхні S_{Ai} зсередини збуджуються K типами хвиль. В [26] був проведений розв'язок завдання знаходження, яке було викликане цим збудженням, поверхневої густини струмів $\bar{\mathbf{J}}_i^{e,M}$ як функції координат, частоти та властивостей поверхні випромінювачів. Коротко розглянемо суть отриманих в [26] результатів та узагальнимо їх

на завдання, що розглядається в даній роботі. В [26] було використано дві системи координат: основна – прямокутна декартова X, Y, Z , у якій перебуває об'єм Ω (рис. 3, а), та локальна – ортогональна криволінійна ξ_1, ξ_2, ξ_3 (рис. 3, б), що визначається геометрією S_{Ai} і була обрана для подання в цій системі вільних хвиль, що поширюються в лінії передачі.

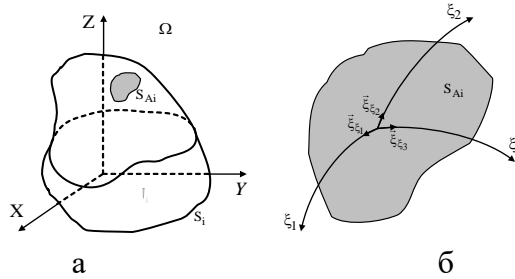


Рисунок. 3 – а) геометрія задачі

б) до визначення локальної системи координат

Поле в перетині лінії передачі, що живить випромінювач, було представлено у вигляді сукупності прямих та зворотних власних хвиль із довільними коефіцієнтами. $\bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, \nu_n)$ ($k = \overline{1, \infty}$) – всі типи хвиль, які поширюються в живильній лінії, функції $\bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, \nu_n)$ належать гільбертову простору L_2 , які в ньому утворюють ортонормований базис. Через A_{kn}^i і B_{kn}^i були позначені амплітуди відповідно падаючої та відбитої хвилі k -го типу коливань на частоті ν_n , а через $\vec{\xi}_{\xi_3}$ – орт осі ξ_3 , що є нормаллю до поверхні апертури. Тоді в перетинах S_{Ai} для тангенційних складових електричних $\vec{E}_\tau^i(\nu_n)$ і магнітних $\vec{H}_\tau^i(\nu_n)$ полів лінії передачі енергії можна записати наступні вирази:

$$\begin{aligned} \vec{\xi}_{\xi_3} \times \vec{E}_\tau^i(\nu_n) &= \sum_{k=1}^K Z_{kn}^i (A_{kn}^i + B_{kn}^i) \bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, \nu_n) - \\ &- \sum_{k=K+1}^{\infty} Z_{kn}^i B_{kn}^i \bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, \nu_n), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}_\tau^i(\nu_n) &= \sum_{k=1}^K (A_{kn}^i - B_{kn}^i) \bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, \nu_n) + \\ &+ \sum_{k=K+1}^{\infty} B_{kn}^i \bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, \nu_n), \end{aligned} \quad (8)$$

де Z_{kn}^i – характеристичний опір лінії передачі для k -го типу хвилі на частоті ν_n , що живить i -й випромінювач.

Зі співвідношення (8), користуючись ортонормованістю послідовності векторних функцій $\{\bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, \nu_n)\}_{k=1}^{\infty}$ у L_2 можна виразити коефіцієнти A_{kn}^i і B_{kn}^i через тангенційну компоненту магнітного поля на апертурі та спростити запис правої частини рівності (7):

$$\vec{\xi}_{\xi_3} \times \vec{E}_\tau^i(\nu_n) = 2 \sum_{k=1}^K Z_{kn}^i A_{kn}^i \bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, \nu_n) -$$

$$-\sum_{k=1}^{\infty} Z_{kn}^i (\bar{H}_\tau^i |_{\xi_3=0}(v_n), \bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, v_n)) \bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, v_n). \quad (9)$$

Векторні функції $\bar{\Phi}_k(\xi_1, \xi_2, v_n)$ визначені лише для значень $\xi_1, \xi_2 \in S_{Ai}$. Визначити їх для всіх точок q_i поверхонь $S_i \cup S_{Ai}$ можна наступним чином:

$$\bar{\Phi}_k(\bar{r}', v_n) = \begin{cases} \bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, v_n), & \xi_1, \xi_2 \in S_{Ai} \\ 0, & \xi_1, \xi_2 \notin S_{Ai} \end{cases} \quad (10)$$

Внаслідок цього в наведених скалярних добутках інтегрування по апертурах заміняється інтегруванням по всій поверхні $S = \sum_{i=1}^N S_i$, що обмежує об'єм Ω .

При розв'язанні повного завдання аналізу випромінювачів з розподіленою нелінійністю поле на апертурі з боку області V_i (рис. 2), якщо вона не містить НЕ, представимо через амплітуди нормованих падаючих та відбитих хвиль $a_{Tkn}^{\beta i}$ (рис. 1). Перейти до таких величин у лівій частині (9) можна шляхом заміни комплексних амплітуд падаючих хвиль A_{kn}^i амплітудами нормованих струмів $a_{Tkn}^{\beta i}$ згідно з [26]. З урахуванням зазначеного вище, систему НІР (6) запишемо у вигляді

$$\sum_{i=1}^N (\tilde{L}[\bar{J}^e(\bar{r}')] + \tilde{N}[\bar{J}^e(\bar{r}')] = u_i(\bar{r}), \quad \forall v_n, n = \overline{-M, M}, \quad (11)$$

де $\tilde{L}[\bar{J}^e(\bar{r}')$ – лінійна частина інтегрального оператора:

$$\begin{aligned} \tilde{L}[\bar{J}^e(\bar{r}')] &= \bar{n}(\bar{r}) \times \iint_{S_i} \{-jv_n \mu \bar{J}^e(\bar{r}', v_n) G_n(\bar{r}, \bar{r}') + \\ &+ \frac{1}{jv_n \varepsilon} \text{grad}_p \text{div}_p (\bar{J}^e(\bar{r}', v_n) G_n(\bar{r}, \bar{r}')\}, \end{aligned}$$

$\tilde{N}[\bar{J}^e(\bar{r}')$ – нелінійна частина інтегрального оператора:

$$\begin{aligned} \tilde{N}[\bar{J}^e(\bar{r}')] &= \\ &= \bar{n}(\bar{r}) \times \text{rot}_p \{ \mathfrak{I}_n \{ \mathfrak{Z} [\sum_{l=-N}^N \delta_l \bar{J}^e(\bar{r}', v_l) e^{jv_l t}] \} G_n(\bar{r}, \bar{r}') \}, \end{aligned}$$

$u_i(\bar{r})$ – права частина інтегрального рівняння (11), що залежить від розподілу збуджуючого струму в апертурі S_{Ai} :

$$u_i(\bar{r}) = 2 \sum_{k=1}^{K_n} \sqrt{2Z_{kn}^i} a_{Tkn}^{\beta i} \bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, v_n) -$$

$$-\iint_{S_i} \sum_{k=1}^{\infty} Z_{kn}^i \bar{\Phi}_k^{i*}(\xi_1, \xi_2, v_n) (\bar{J}_A^e(\bar{r}') \times \bar{n}_{qi}) dS_i \bar{\Phi}_k^i(\xi_1, \xi_2, v_n).$$

Нелінійна частина інтегрального оператора $\tilde{N}[\bar{J}^e(\bar{r}')]_{}$ визначає нелінійний оператор \tilde{Q}_{NR_T} (рис. 1), що описує нелінійну підсхему випромінювальної структури.

Таким чином, на поверхні $S = \sum_{i=1}^N S_i$ завдання знаходження поверхневих струмів $\bar{J}^e(\bar{r}')$ при багатомодовому збудженні випромінювачів з боку апертури S_{Ai} звелось до розв'язання системи двовимірних інтегральних рівнянь вигляду (11).

Отримана система НІР відносно комплексних амплітуд розподілу густин поверхневого струму являє собою компонентні рівняння системи випромінювачів з розподіленою нелінійністю.

Електромагнітне поле багатовходової випромінювальної структури з нелійними характеристиками в зоні Френеля. Вважаємо, що невідомі функції розподілу густини поверхневого електричного струму $\bar{J}^e(\bar{r}', v_n)$ на поверхні i -х випромінювачів знайдені з розв'язку НІР (11) (особливості розв'язку подібних НІР в повній мірі викладені в [27]), а функції розподілу густини поверхневого магнітного струму $\bar{J}^M(\bar{r}', v_n)$ визначено з НГУ (2). Потрібно знайти напруженість ЕМП, яка створюється системою випромінювачів з нелійними характеристиками (рис. 2) у зоні Френеля.

ЕМП системи електричних і магнітних джерел (рис. 2) з розподіленою нелінійністю у режимі, що встановився, визначається двома векторними потенціалами \bar{A}^e та \bar{A}^M [28]

$$\begin{aligned} \bar{E}(\bar{r}, v_n) = & -\sum_{i=1}^N \left(\frac{j}{v_n \epsilon_a \mu_a} \text{grad}_p \text{div}_p \bar{A}_i^e(\bar{r}, v_n) + \right. \\ & \left. + j v_n \bar{A}_i^e(\bar{r}, v_n) + \frac{1}{\epsilon_a} \text{rot}_p \bar{A}_i^M(\bar{r}, v_n) \right), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \bar{H}(\bar{r}, v_n) = & -\sum_{i=1}^N \left(\frac{j}{v_n \epsilon_a \mu_a} \text{grad}_p \text{div}_p \bar{A}_i^M(\bar{r}, v_n) + \right. \\ & \left. + j v_i \bar{A}_i^M(\bar{r}, v_n) - \frac{1}{\mu_a} \text{rot}_p \bar{A}_i^e(\bar{r}, v_n) \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Якщо джерелами поля є поверхневі електричний і магнітний струми, що задані на поверхнях S_i , то комплексні вектори $\bar{A}_i^e(\bar{r}, v_n)$ та $\bar{A}_i^M(\bar{r}, v_n)$ будуть рівні:

$$\bar{A}_i^e(\bar{r}, v_n) = \frac{\mu_a}{4\pi} \iint_{S_i} \bar{J}^e(\bar{r}', v_n) \frac{e^{-jk_n |\bar{r} - \bar{r}'|}}{|\bar{r} - \bar{r}'|} dS_{iq}, \quad (14)$$

$$\bar{A}_i^M(\bar{r}, v_n) = \frac{\epsilon_a}{4\pi} \iint_{S_i} \bar{J}^M(\bar{r}', v_n) \frac{e^{-jk_n |\bar{r} - \bar{r}'|}}{|\bar{r} - \bar{r}'|} dS_{iq}, \quad (15)$$

де $k_n = \frac{2\pi}{\lambda_n}$, а $\lambda_n = \frac{c}{v_n}$.

Розрахунки векторних потенціалів за формулами (14), (15) у загальному випадку призводить до досить складних математичних викладок і не завжди вдається одержати замкнені вирази для різноманітних випромінювальних структур навіть із простою конфігурацією [29, 30]. В [31–33] показано, що аналіз ЕМП у ближній та проміжній зонах спостереження може бути спрощений, якщо не потрібно знання полів на дуже малих відстанях від антени. В зазначених роботах пропонується випромінювальну структуру великих електричних розмірів розбивати на множину малих, тобто таких, щоб відстань дальньої зони цих випромінювачів була менше або дорівнювала мінімальній відстані, на якій розраховуються поля досліджуваної випромінювальної структури великих електричних розмірів.

З урахуванням зазначеного вище, співвідношення (14) і (15) можна спростити, якщо вважати, що точка спостереження $p(x,y,z)$ стосовно кожного з випромінювачів випромінювальної структури перебуває в дальній зоні, тобто для кожного i -го випромінювача окремо виконується умова

$$|\vec{r} - \vec{r}'| \gg \frac{2L_i^2}{\lambda_n}, \quad (16)$$

де L_i – максимальний лінійний розмір випромінювача випромінювальної структури (рис. 2), λ_n – максимальна довжина хвилі.

Але стосовно самої випромінювальної структури, ця область є зоною Френеля

$$|\vec{r} - \vec{r}'| < \frac{2L^2}{\lambda_n}, \quad (17)$$

де L – максимальний лінійний розмір випромінювальної структури (рис. 2).

З урахуванням умов (16), (17) та проведення нескладних математичних дій, вирази для розрахунку ЕМП створюваного багатовходовою випромінювальною структурою з розподіленою нелінійністю будуть мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, v_n) = & \frac{v_n \mu_a}{4\pi j} \sum_{i=1}^N \frac{e^{-jk_n |\vec{r}_i|}}{|\vec{r}_i|} ([\vec{e}_{\vec{r}_i} [\vec{f}_i^e(\theta, \varphi, v_n) \vec{e}_{\vec{r}_i}]] + \\ & + \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} [\vec{f}_i^M(\theta, \varphi, v_n) \vec{e}_{\vec{r}_i}]), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}(\vec{r}, v_n) = & \frac{v_n \epsilon_a}{4\pi j} \sum_{n=1}^N \frac{e^{-jk_n |\vec{r}_i|}}{|\vec{r}_i|} (\sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} [\vec{e}_{\vec{r}_i} \vec{f}_i^e(\theta, \varphi, v_n)] + \\ & + [\vec{e}_{\vec{r}_i} [\vec{f}_i^M(\theta, \varphi, v_n) \vec{e}_{\vec{r}_i}]]), \end{aligned} \quad (19)$$

де \vec{e}_i – одиничний орт у напрямку \vec{r}_i , $\vec{f}_i^{e,m}(\theta, \varphi, \nu_n)$ – векторні функції, які залежать тільки від кутових координат точки спостереження (θ, φ) . Дані функції обумовлені заданими розподілами струмів $\vec{J}^{e,m}(\vec{r}', \nu_n)$ та характеризують залежність створюваного ними поля в дальній зоні від кутових координат на частотах ν_n .

Запишемо співвідношення (18) і (19) у більш компактному вигляді:

$$\vec{E}(\vec{r}, \nu_n) = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i(\vec{r}, \nu_n) e^{-jk_n |\vec{r}_i|}, \quad (20)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, \nu_n) = \sum_{i=1}^N \vec{H}_i(\vec{r}, \nu_n) e^{-jk_n |\vec{r}_i|}, \quad (21)$$

де $\vec{E}_i(\vec{r}, \nu_n)$, $\vec{H}_i(\vec{r}, \nu_n)$ – напруженості електричного та магнітного полів, створюваних і-м випромінювачем багатовходової випромінювальної структури на частотах ν_n .

При однаковій поляризації випромінювачів, а також за рахунок вибору початкових фаз випромінювачів, можна добитися того, що в обраній точці простору з координатами (x_F, y_F, z_F) на відстані фокусування r_F , ЕМП, які збуджуються випромінювачами багатовходової випромінювальної структури, складаються синфазно. Значення початкових фаз і-х випромінювачів у багатовходовій випромінювальній структурі, які необхідні для синфазного складання парціальних полів у точці з координатами (x_F, y_F, z_F) на частотах ν_n , визначаються з умови

$$\psi_i(\nu_n) = k_n |\vec{r}_{Fi}|, \quad (22)$$

де $|\vec{r}_{Fi}| = \sqrt{(x_F - x'_i)^2 + (y_F - y'_i)^2 + (z_F - z'_i)^2}$ – відстань між точкою фокусування з координатами (x_F, y_F, z_F) та центром і-го випромінювача з координатами (x'_i, y'_i, z'_i) .

Тоді з урахуванням умови (22) вирази (20) і (21) можна записати в наступному вигляді:

$$\vec{E}(\vec{r}, \nu_n) = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i(\vec{r}, \nu_n) e^{-j(k_n |\vec{r}_i| - \psi_i(\nu_n))}, \quad (23)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, \nu_n) = \sum_{i=1}^N \vec{H}_i(\vec{r}, \nu_n) e^{-j(k_n |\vec{r}_i| - \psi_i(\nu_n))}. \quad (24)$$

На робочій частоті ($\nu_{n=1} = \omega_0$) співвідношення (22) має досить наочний фізичний зміст. Початкова фаза випроміненого поля випромінювачами багатовходової випромінювальної структури повинна відповідати сполученому значенню початкової фази ЕМП, яке збуджується ними у точці фокусування. Такий фазовий розподіл забезпечує повну компенсацію набігу фази випромінювачів багатовходової випромінювальної структури до точки фокусування при заданій робочій частоті. Цей спосіб фокусування в літературі називають просторово-фазовим фокусуванням.

Наявність розподіленої нелінійності у випромінювачах призводить до утворення на їхніх поверхнях густини електричного струму на комбінаційних частотах ν_n , це, у свою чергу, призводить до розфокусування ЕМВ на основній частоті та значному розширенню зони Френеля поля побічного випромінювання. Дальня границя зони Френеля на частоті n -ї

гармоніки визначається співвідношенням:

$$r_n = \frac{2L^2 n}{\lambda_0},$$

тобто n -й частотній гармоніці відповідає своя довжина зони Френеля, яка росте зі збільшенням номера гармоніки та приблизно в n разів перевищує дальність передачі ЕМВ. Таким чином, розглянуті випромінювальні структури з розподіленою нелінійністю на частотах гармонік можуть створювати в певних напрямках поля значної інтенсивності й суттєво погіршувати функціонування інших РЕС, які перебувають навіть на значних відстанях від точки фокусування.

Висновки. Наявність нелінійностей у передавальних багатовходових випромінювальних структурах призводить до появи шкідливих нелінійних антенних ефектів: зміни їх характеристик на основній частоті (зокрема, розфокусування ЕМВ) та появи побічного випромінювання. Характерно, що зазначені нелінійні антенні ефекти, ступінь та особливості їх прояву істотно залежать від конкретної конструкції випромінювальної структури та способу її збудження, взаємозв'язку між випромінювачами та місцем їх включення, а також від параметрів лінійних та нелінійних підсхем АНЕ (рис. 1). Внаслідок цього в кожній конкретній АНЕ нелінійні ефекти матимуть свою специфіку, тому виявити будь-які універсальні закономірності є неможливим. Розвинена в роботі процедура аналізу нелінійних антенних ефектів у сфокусованих передавальних АНЕ є досить загальною. Вона дозволяє визначити спектральний склад відгуку в зоні Френеля різних типів АНЕ залежно від характеру та рівня їхнього збудження.

У роботі отримані НІР багатовходових випромінювальних структур довільного вигляду з розподіленою нелінійністю при їх багатомодовому збудженні для періодичного або квазіперіодичного режимів роботи відносно комплексних амплітуд гармонік поверхневої густини струму. Багатомодовий спосіб збудження дозволяє врахувати зміну розподілу поля в області збудження випромінювачів через вплив нелінійних властивостей їхньої поверхні. Отримані НІР є компонентними рівняннями, що описують нелінійний і лінійний багатополосники, які поставлені у відповідність багатовходовим випромінювальним структурам з нелійними характеристиками.

Отримані вирази для розрахунку ЕМП передавальних багатовходових випромінювальних структур з нелійними характеристиками в зоні Френеля.

У подальших дослідженнях, використовуючи запропоновану узагальнену математичну модель багатовходових випромінювальних структур з нелійними характеристиками, планується на конкретних типах АНЕ провести кількісний аналіз впливу ступеня нелінійності поверхневого імпедансу на параметри сфокусованого електромагнітного випромінювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shinohara, N. History and Innovation of Wireless Power Transfer via Microwaves [Text] / N. Shinohara // IEEE Journal of Microwaves. – 2021. – Vol. 1, No. 1. – P. 218–228.
2. Focused transmitting array antenna at 5.8GHz for wireless power transmission [Text] / N. Li, J. Zhang, J. Yang, X. Zhu, Z. Zheng, A. Majeed // IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). – 2020. – P. 94–97.
3. Geyi, W. The Method of Maximum Power Transmission Efficiency for the Design of Antenna Arrays [Text] / W. Geyi // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. – 2021. – Vol. 2. – P. 412–430.

4. Functional Neutralization of Small-size UAVs by Focused Electromagnetic Radiation [Text] / A. V. Gomozov, D. V. Gretskih, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko // XXII International seminar / workshop on direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory (DIPED–2017). – 2017. – P. 187–189.
5. Макаренко, С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам [Текст] : монографія / С. И. Макаренко. – СПб : Научное издание, 2020. – 204 с.
6. Методы формирования и фокусировки электромагнитного излучения для воздействия на радиоэлектронные средства [Текст] : монографія / М. М. Ясечко, А. И. Дохов, М. Г. Иванец, О. В. Тесленко ; под ред. М. М. Ясечко. – Харьков: ХУПС, 2015. – 220 с.
7. Бахрах, Л. Д. Справочник по антенной технике [Текст] / Л. Д. Бахрах, Л. С. Бенинсон, Е. Г. Зелкин // Нелинейные элементы в антеннах / Я. С. Шифрин, А. И. Лучанинов ; под ред. Я. Н. Фельда, Е. Г. Зелкина. – М., 1997. – Гл. 10. – С. 207–235.
8. Loyka, S. L. The influence of electromagnetic environment on operation of active array antennas: analysis and simulation techniques [Text] / S. L. Loyka // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1999. – Vol. 7, No. 6. – P. 23–39.
9. Prediction of Nonlinear Distortion in Wideband Active Antenna Arrays [Text] / K. Hausmair, S. Gustafsson, C. Sánchez-Pérez, P. N. Landin, U. Gustavsson, T. Eriksson, C. Fager // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2017. – Vol. 65, No. 11. – P. 4550–4563.
10. Лучанинов, А. И. Современное состояние теории и техники электродинамических устройств с нелинейными характеристиками поверхностного импеданса [Текст] / А. И. Лучанинов, Д. С. Гавва, Е. В. Крикун // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 1 (3). – С. 62–83.
11. Лучанинов, А. И. Увеличение эффективности генерации гармоник нелинейными рассеивателями [Текст] / А. И. Лучанинов, Д. С. Гавва, С. Р. Уайд // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Том. 4, № 9 (70). – С. 51–58. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26282.
12. Прудюс, И. Н. Транзисторные антенны-автогенераторы СВЧ-диапазона [Текст] / И. Н. Прудюс, В. Д. Голинский, В. Г. Сторож // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2007. – № 2. – С. 13 – 16.
13. Wireless radio power supply system for pilotless aircrafts [Text] / D. V. Gretskih, A. V. Gomozov, N. M. Tsikalovskiy, E. V. Sharapova // 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2015). – 2015. – P. 202–204.
14. Electrodynamics Model of a Wireless Power Transmission System [Text] / D. V. Gretskih, A. I. Luchaninov, J. V. Vishniakova, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko // XXIIIrd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2018). – 2018. – P. 80–85.
15. Electrodynamics Approach to Designing Wireless Power Transfer Systems (Internal System Processes) [Text] / D. V. Gretskih, A. I. Luchaninov, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko // 4th International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo-2019). – 2019. – P. 1–6.
16. Electrodynamics Approach to Designing WPT Systems with Accounting for Non-system Interactions [Text] / A. I. Luchaninov, D. V. Gretskih, A. V. [Gomozov](#), V. A. Katrich, M. V. Nesterenko // 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2019). – 2019. – P. 107–111.
17. External Parameters of Wireless Power Transmission Systems [Text] / D. Gretskih, A. Luchaninov, V. Katrich, M. Nesterenko, A. Gomozov // XXIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave

- Theory (DIPEd-2019). – 2019. – P. 117–121.
18. Applying the Electrodynamics Approach to Modeling Wireless Power Transmission Systems [Text] / V. Aliksieiev, D. Gretsikh, A. Luchaninov, V. Lykhograi, A. Shcherbina // XXVIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPEd-2021). – 2021. – P. 111–115.
 19. Грецьких, Д. В. Розвиток теорії систем безпроводної передачі енергії [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.12.07 / Грецьких Дмитро Вячеславович. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 42 с.
 20. Шифрин, Я. С. Анализ антенн с распределенной нелинейностью [Текст] / Я. С. Шифрин, А. И. Лучанинов, М. А. Омаров // Антенны. – 2000. – №1. – С. 70–83.
 21. Glisson, A. W. Equivalent Current Excitation for an Aperture Antenna Embedded in an Arbitrarily Shaped Impedance Surface [Text] / A. W. Glisson // IEEE Trans. – 2002. – Vol. AP-50, No. 7. – P. 966–969.
 22. Effect of lossy Ground on Performance of Planar and Cylindrical Arrays [Text] / H. J. Stalzer, A. Fathy, A. Hessel, J. Shmoys // Radio Sci. – 1990. – Vol. 25, No. 3–4. – P. 133–147.
 23. Yoshitomi, K. Equivalent Currents for an Aperture in an Impedance Surface [Text] / K. Yoshitomi // IEEE Trans. – 1994. – Vol. AP-42, № 11. – P. 1554–1556.
 24. Анализ антенн с распределенными нелинейными свойствами. Часть 1. Использование принципа эквивалентности [Текст] / А. И. Лучанинов, Д. С. Гавва, М. А. Омаров, Е. В. Крикун // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Том 2, № 3 (44). – С. 4–7. DOI: 10.15587/1729-4061.2010.2629.
 25. Каценеленбаум, Б. З. Высокочастотная электродинамика [Текст] / Б. З. Каценеленбаум. – М. : Наука, 1966. – 240 с.
 26. Омаров, М. А. Многомодовое возбуждение антенн [Текст] / М. А. Омаров // Радиотехника. – 2000. – № 116. – С. 44–49.
 27. Лучанинов, А. И. Нелинейные эффекты в элементах электродинамических микрополосковых устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников [Текст] : монография / А. И. Лучанинов, Д. С. Гавва, Е. В. Шаропова. – Харьков : Коллегиум, 2015. – 159 с.
 28. Чаплин, А. Ф. Анализ и синтез антенных решеток [Текст] / А. Ф. Чаплин. – Львов : Вища шк. Львовський державний університет, 1987. – 180 с.
 29. Фельд, Я. Н. Основы теории антенн: учебное пособие для вузов [Текст] / Я. Н. Фельд, Л.С. Бененсон. – М. : Дрофа, 2007. – 491 с.
 30. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ [Текст] / Д. М. Сазонов. – М. : Высшая школа, 1988. – 432 с.
 31. Hansen, R. C. A new method of near field analysis [Text] / R. C. Hansen, L. L. Bailin // IRE Trans. Antennas Propagat. – 1959. – Vol. 7. – P. 458–467.
 32. Hansen, R. C. Apertures [Text] / R. C. Hansen. – New York, London : Academic Press, 2014. – 462 p. – Analytical Techniques: Microwave Scanning Antennas. vol. 1. – New York : Academic Press, 1964. – 442 p.
 33. Walter, C. H. Traveling Wave Antennas [Text] / C. H. Walter. – New York, McGraw-Hill, 1965. – 429 p.

Gretskih D., Alieksieiev V., Gomozov A., Katrich V., Nesterenko M.

DEVELOPMENT OF PRACTICAL RECOMMENDATIONS FOR DESIGN RECONFIGURED RECTENNA USED IN VARIOUS SYSTEMS WIRELESS ENERGY TRANSMISSION

*The paper presents a mathematical model of radio-electronic systems (RES), which include antennas and their excitation paths with nonlinear characteristics. The model provides acceptable accuracy of RES quality indicator analysis and electromagnetic compatibility (EMC) for further practical design. **General purpose:** the development of a mathematical model of a transmitting multi-input radiating structure with nonlinear characteristics under the Fresnel zone. **Objective:** choice justification of a structural schema of a radiating multi-input system with a radiator that has a distributed nonlinear surface impedance; obtaining the nonlinear integral equations (NIE) related to the current density for radiators with distributed nonlinearity, excited by an arbitrary field distribution for solving the general analysis problem; obtaining a ratio for calculating focused electromagnetic fields (EMF) created by multi-input radiating structures with nonlinear characteristics in the Fresnel zone. The **methods** used in the paper are mathematical methods of electrodynamics and antennas theory with nonlinear elements (ANE), theory of microwave circuits, and multipoles. The following **results** were obtained. An electrodynamics approach is proposed to analyze the entire set of nonlinear effects arising in transmitting multi-input radiating structures with nonlinear characteristics. It allows considering the mutual influence of the transmitting and receiving antennas with nonlinear characteristics in the system itself and the electrodynamics interaction of the transmitting antenna with nonlinear characteristics with RES for other purposes. Component equations (NIE) of multi-input radiating structures that establish the relationship of amplitude-phase distribution at the inputs of radiators with distributed nonlinearity and amplitude-phase distribution on their surfaces are obtained. A mathematical model of multi-input radiator structures with nonlinear characteristics in the Fresnel zone for analysis purposes has been produced. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is as follows: a generalized theory of transmitting antennas of arbitrary configuration with nonlinear characteristics in the Fresnel zone, which makes it possible to analyze the characteristics of these antennas considering the positive and negative (beneficial and adverse) nonlinear effects that arise in them.*

Keywords: multi-input radiating structure; antennas with nonlinear elements; nonlinear boundary conditions; nonlinear integral equations; multimode excitation; focusing of electromagnetic radiation.

Ревенко В. Ю.

ПОРІВНЯЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ АТМОСФЕРНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЗМІНУ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ДАЛЬНОСТІ ДО ОБ'ЄКТІВ, ЩО СПОСТЕРІГАЮТЬСЯ, НА ДВОХ ДІАПАЗОНАХ ХВИЛЬ СУДНОВОЮ РЛС

Розглянуто радіофізичні характеристики атмосфери та атмосферних утворень, вплив умов поширення радіолокаційних сигналів на дальність та точність виміру дальності морських об'єктів, залежність величини помилки радіолокаційного виміру дальності суднової РЛС від протяжності атмосферних утворень.

Представлено стосовно індикаторів з яркістю відміткою суднових РЛС контраст радіолокаційного зображення морського об'єкта, що спостерігається на тлі відображень від атмосферних утворень, залежно від дальності до антени суднової РЛС. Проведено аналіз основного рівняння радіолокації одиночних об'єктів з урахуванням зміни їхньої відображеної потужності на певній відстані залежно від інтенсивності атмосферного процесу. Проаналізовано вплив атмосферних утворень на параметри луна-сигналу морського об'єкта. Залежно від параметрів суднової РЛС ехо-сигнал морського об'єкта, що знаходиться в осадах різної інтенсивності, що забезпечуватиме різне відхилення потужності сигналу об'єкта до потужності сигналу атмосферних утворень, при якому ще можливе визначення відстані до морського об'єкта без створення аварійної ситуації, тобто при якому ще можливе виконання завдання суднової РЛС.

Показано, що для визначення судновою РЛС максимальної дальності виявлення морського об'єкта на робочій довжині хвилі достатньо знати лише відношення ефективної площі розсіювання до параметрів атмосферного утворення, переважно інтенсивності атмосферних утворень. Використовуючи ці відносини для різних відражаючих властивостей об'єкта і відражаючих властивостей атмосферних утворень можна здійснити прогноз максимальної дальності до морського об'єкта за його інтенсивності, що підвищує безпеку судноводіння у складних умовах атмосферного середовища.

***Ключові слова:** атмосфера, атмосферні утворення, суднова радіолокаційна станція, інтенсивність опадів, дальність виявлення, морський об'єкт, діелектрична проникність, радіолокаційне спостереження.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. При радіолокаційному спостереженні морських об'єктів, що у атмосферному середовищі, істотну роль грає точність виміру відстані до морського об'єкта на фоні природних атмосферних перешкод, що впливає на навігаційну безпеку судноводіння, особливо у обмежених районах плавання.

Незважаючи на існуючі методи вимірювання відстані до морського об'єкта при різних станах атмосферного середовища, до теперішнього часу радіолокаційний вимір відстані залишається проблематичним для суднових РЛС, так як використовуваний метод не враховує внутрішню структуру атмосферного утворення, що впливає на процеси взаємодії опромінювання атмосферного утворення електромагнітної хвилі певного діапазону.

Аналіз останніх досягнень та публікацій, в яких розпочато вирішення даної проблеми. При аналізі основного рівняння радіолокації враховується величина потужності опромінюючої хвилі на відстань R , вираженою у ватах на одиницю площі сфери, а

розповсюдження хвилі відбувається в умовах середовища, відповідних вільному простору [1, 2, 12-21].

Оцінка втрат при пошуку та супроводі морського об'єкта включає і втрати потужності електромагнітної хвилі, яка опромінює об'єкт за рахунок ослаблення в атмосфері.

Однак вплив середовища на вимірювання відстані до об'єкта всередині атмосферної перешкоди не враховується, що призводить до помилок, в рахунок не тільки поглинання потужності опромінюючої, а й перевідображення відбитої потужності всередині атмосферного утворення, що вносить велику похибку у вимірювання відстані до морського об'єкта, що впливає на безпеку судноводіння у складних умовах атмосферного середовища.

Тому опис методу, що дозволяє врахувати вплив атмосферного середовища на вимірювання радіолокації дальності, є актуальним завданням.

Формулювання цілей статті (постановка задачі). Метою публікації є розробка способу оцінки впливу атмосферного середовища на вимірювання радіолокації дальності до морського об'єкта суднової РЛС.

Виклад основного матеріалу дослідження. Радіофізичні характеристики атмосфери і атмосферних утворень. Атмосфера з утвореннями є середовищем, в якому поширені радіолокаційні сигнали від антени суднової станції радіолокації до і від об'єкта назад до антени. При поширенні сигналів відбувається їх взаємодія із середовищем відповідно до рівнянь Максвелла:

$$\varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \sigma \bar{E} = r_0 i \bar{H}, \quad (1)$$

$$-\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = r_0 i \bar{E}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \bar{H} = 0, \quad (4)$$

де \bar{E} і \bar{H} – вектори напруженості електричного та магнітного полів;

σ – питома електрична провідність;

ρ – питома щільність зарядів;

ε і μ – діелектрична та магнітна проникність середовища.

Розв'язаннями цих рівнянь є функції:

$$E_z = E_0 \cos \omega \left(t \pm \frac{r}{v} \right), \quad (5)$$

$$H_y = \pm \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{120\pi} E_z, \quad (6)$$

де v – швидкість поширення радіохвиль;

ω – кутова частота;

ε' – відносна діелектрична проникність.

З (5) і (6) випливає, що швидкість поширення радіохвиль в атмосфері однозначно визначається її діелектричною проникністю, оскільки

$$\varepsilon = n^2, \quad (7)$$

де n – коефіцієнт заломлення.

У розрахунках реальну атмосферу можна замінити моделлю, що складається із суміші сухого повітря, водяної пари та аерозольної фракції. Відомо, що коефіцієнт заломлення сухого повітря визначається співвідношенням

$$n_c = 1 + \frac{77,6}{T} P \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

а вологого співвідношенням

$$n_{\text{вл}} = 1 + \frac{77,6}{T} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

де P – тиск повітря, мбар;

ℓ – парціальний тиск водяної пари, мбар.

Розглянемо докладніше діелектричні властивості атмосферних утворень.

Відомо, що коефіцієнт діелектричної проникності середовища пов'язаний із його дипольним моментом співвідношенням

$$\varepsilon = 1 + 4\pi x, \quad (10)$$

де x – дипольний момент одиниці об'єму середовища.

Представимо атмосферне утворення у вигляді адитивної суміші вологого повітря та аерозолів, для якої дипольний момент одиниці об'єму дорівнюватиме.

$$x = x_r + x_a, \quad (11)$$

де x_r і x_a – дипольні моменти газової та аерозольної фракцій.

З (9) з використанням (10) знаходимо

$$x_r = \frac{40}{\pi T} \cdot 10^{-6} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right). \quad (12)$$

Обчислення дипольного тиску аерозольної фракції у загальному випадку пов'язані зі значними труднощами. Однак, як показано в [3-5], у тому випадку, коли гідрометеорний об'єм можна вважати суцільним тілом, дипольний момент аерозольної частини визначається виразом

$$x_a = na^3 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| = \frac{3}{4\pi} \rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|, \quad (13)$$

де n – число крапель в одиниці об'єму;

a – середній радіус крапель;

m – комплексний коефіцієнт заломлення речовини аерозолів;

ρ – щільність речовини;

W – водність атмосферного утворення.

Зауважимо, що цій умові приблизно задовольняють у мікрохвильовому діапазоні хвиль практично всі типи атмосферних утворень.

Таким чином, сумарний дипольний момент одиниці об'єму гідрометеорів може бути представлений у вигляді

$$x = 1 + \left[\frac{160}{T} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) \cdot 10^{-6} + 3\rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \right]. \quad (14)$$

В результаті підстановки (14) і (12) (11) отримуємо в остаточному вигляді вираз для коефіцієнта діелектричної проникності атмосферного утворення у вигляді

$$\varepsilon = \left\{ 1 + \left[\frac{160}{T} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) \cdot 10^{-6} + 3\rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

від якого відповідно до (7) можна перейти до коефіцієнта заломлення

$$n = \left\{ 1 + \left[\frac{160}{T} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) \cdot 10^{-6} + 3\rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Розкладемо вираз (16) у степеневий ряд і обмежимо розкладання його першим членом. В результаті отримаємо

$$n = 1 + \frac{80}{T} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) + \frac{3}{2} \rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|. \quad (17)$$

Другий доданок (17) характеризує собою внесок, що визначається вологим повітрям, а третій – аерозольною фракцією. Орієнтовна оцінка величин вкладів цих доданків показує, що за $\rho = 1$, $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \approx 1$ і $P = 1000$ мбар третій доданок має величину $1,5 \cdot 10^{-6}$. Для оцінювання величини вкладу другого доданку покладемо $T = 300$ К, $P = 1000$ мбар, $e = 26$ мбар, внаслідок чого отримаємо величину $1,5 \cdot 10^{-3}$.

Таким чином, очевидно, що коефіцієнт заломлення атмосферного утворення, в основному, визначається температурою і тиском повітря всередині атмосферного утворення і з достатньою для практики точністю може бути обчислений за формулою (8), поклавши в ній відносну вологість рівної 100%.

На рис. 1 представлені залежності коефіцієнта заломлення атмосферних утворень від температури біля земної поверхні при різних висотах атмосферних утворень, розраховані

(17). Аналіз цих залежностей показує, що коефіцієнт заломлення атмосферних утворень практично у всіх реальних випадках полягає в інтервалі значень $(n-1) \cdot 10^{-6}$ від 100 до 500.

Розглянуті співвідношення отримані у припущенні, що атмосферні утворення становлять середовище, не схильне до турбулентності.

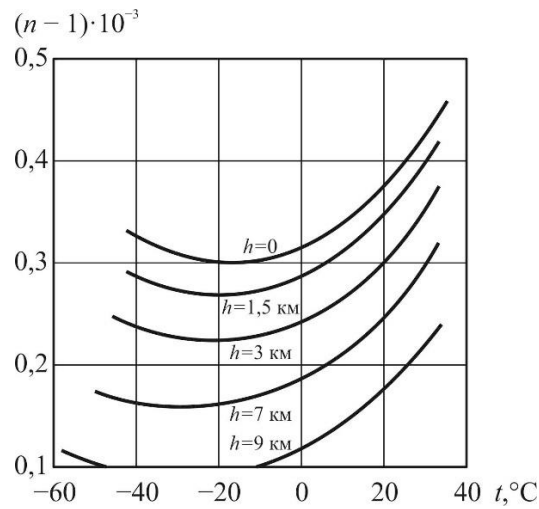


Рисунок 1. Залежності коефіцієнта заломлення атмосферних утворень

Про послаблюючі властивості опадів з урахуванням природи їх утворення. Дані про послаблюючі властивості опадів з урахуванням природи їхнього утворення представлені на рис. 2 і рис. 3 у вигляді залежності питомого коефіцієнта ослаблення від інтенсивності опадів, довжини хвилі та температури повітря.

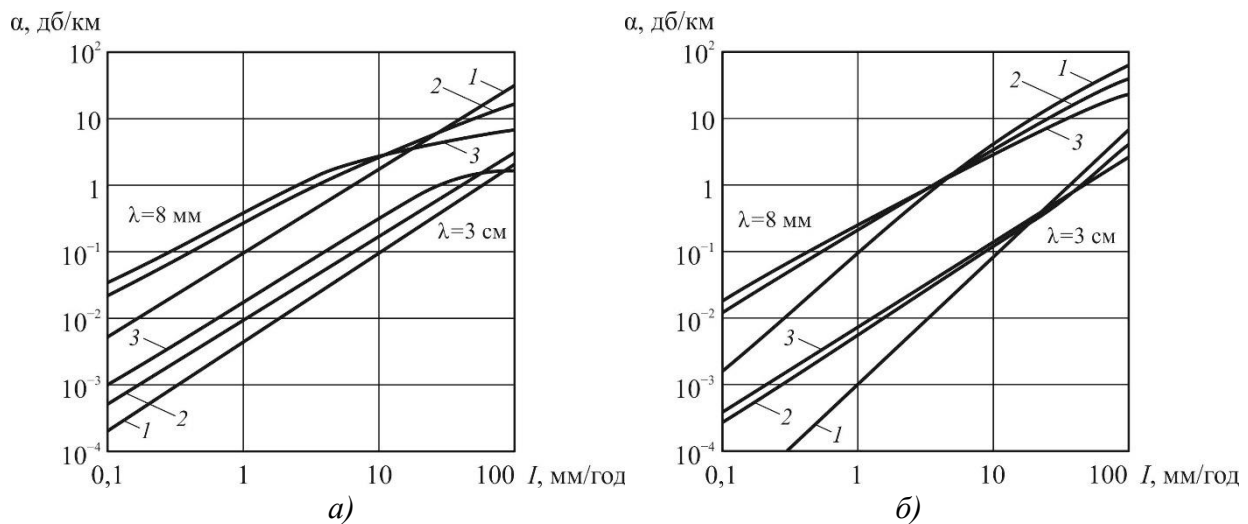


Рисунок 2:

а) розподіл Литвінова; б) розподіл Шифріна;

1 – дощ із крупи; 2 – дощ із обзерненого снігу; 3 – дощ із необзерненого снігу

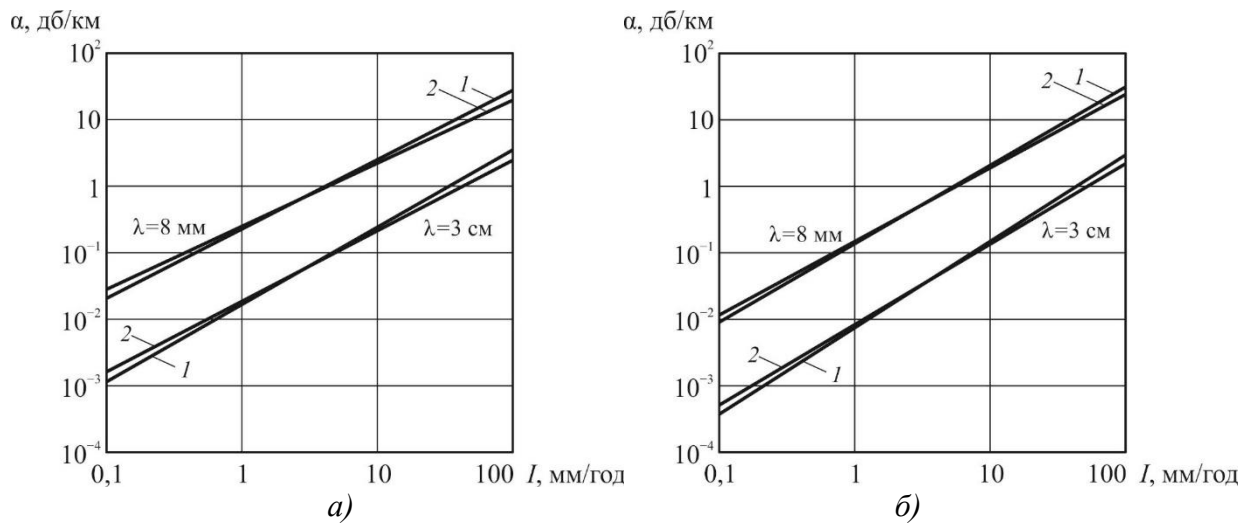


Рисунок 3:
 а) розподіл Литвинова; б) розподіл Шифріна;
 1 – 0°C; 2 – 18°C

Аналіз добутку залежностей показує, що з дощів з крупи, обзерненого снігу і необзерненого снігу залежність коефіцієнта ослаблення однієї й тієї ж довжини хвилі від температури виражена слабо. Це стосується як хвиль 3 см, так і хвиль 8 мм діапазону. Для дощів різної природи коефіцієнт ослаблення зростає із збільшенням частоти. Що стосується залежності коефіцієнта ослаблення від температури, то для 0°C і 18°C ця відмінність не перевищує 15%, тому в першому наближенні в розрахунках послаблюючої дії опадів можна користуватися даними, наведеними для 18°C.

Аналіз залежності величини коефіцієнта ослаблення від інтенсивності опадів за постійної температури для обох розподілів крапель за розмірами показує, що зі збільшенням інтенсивності дощу як діапазону 3 см, так і для 8 мм різко збільшується.

Аналіз впливу природи утворення опадів на коефіцієнт ослаблення в разі зміні їх інтенсивності показує, що в діапазоні хвиль 3 см до інтенсивності опадів 30 мм/год коефіцієнт ослаблення в дощі з необзерненого снігу менший, ніж у дощі з крупи. Потім зі збільшенням інтенсивності опадів коефіцієнт ослаблення дощу з крупи різко збільшується і стає вищим, ніж для дощів іншої природи. У той же час коефіцієнт ослаблення для дощу з необзерненого снігу різко зменшується у порівнянні з дощами іншої природи. Це характерно для обох розподілів крапель за розмірами.

Для 8 мм діапазону під час опадів до інтенсивності 10 мм/год велику величину має коефіцієнт ослаблення в разі дощу з обзерненого снігу та меншу за дощ з крупи. За інтенсивності опадів понад 10 мм/год збільшується коефіцієнт ослаблення для дощу з крупи; менше значення має коефіцієнт ослаблення в дощі з необзерненого снігу. Ця залежність спостерігається для обох розподілів крапель за розмірами.

Вплив умов поширення радіолокаційних сигналів на дальність радіолокаційного виявлення та точність вимірювання дальності об'єктів. Під час поширення радіолокаційних сигналів у газах атмосфери, тумані, хмарах та опадах відбувається їх помітне ослаблення. Особливо велике ослаблення у кисні та водяній парі атмосфери для хвиль міліметрового діапазону; у сантиметровому діапазоні хвиль воно відносно невелике. Однак, в разі радіолокаційного спостереження на значних відстанях, це ослаблення також необхідно враховувати. Що стосується ослаблення радіолокаційних сигналів атмосферними утвореннями, то воно набагато суттєвіше, ніж у газах атмосфери і особливо відчутно на хвилях коротше 5 см.

Скорочення максимальної дальності радіолокаційного спостереження в 3 см і 8 мм діапазонах хвиль може бути оцінено відповідно до виразів

$$R_0 = R \left[10^{-0,2(\alpha_r + \alpha_d)R} + 4 \cdot 10^7 \frac{I^{1,6}}{R^2} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (18)$$

$$R_0 = R \left[10^{-0,2(\alpha_r + \alpha_d)R} + 48 \cdot 10^7 \frac{I^{1,6}}{R^2} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (19)$$

де R_0 – дальність виявлення цілі у «хорошу» погоду;

I – інтенсивність опадів, мм/год;

α_r і α_d – питомі коефіцієнти ослаблення для газів атмосфери та дощу відповідно.

У роботах [6-11] проведено оцінку скорочення максимальної дальності об'єктів без урахування природи утворення опадів. У наведених розрахунках враховано природу утворення опадів та прийнято таку модель: опади повністю перекривають трасу розповсюдження сигналів і знаходяться також у районі морського об'єкту.

На рис. 4 наведено залежність максимальної дальності виявлення морського об'єкта у «погану» погоду від інтенсивності опадів для дощу з крупи, дощу з обзерненого снігу та дощу з необзерненого снігу за умови апроксимації закону розподілу крапель за розмірами розподілом Литвинова, а на рис. 5 для опадів тієї ж природи, але за умови апроксимації закону розподілу крапель за розмірами розподілом Шифрина (довжина хвиль 3 см).

Ті ж залежності, але для хвилі 8 мм наведено на рис. 6 та рис. 7 відповідно. Аналіз наведених залежностей дозволяє зробити такі висновки.

У трьох сантиметровому діапазоні хвиль вид розподілу крапель за розмірами в умовах опадів різної природи мало впливає на характеристики виявлення об'єктів в осадах. Однак природа утворення опадів по-різному впливає на максимальну дальність виявлення морських об'єктів. Так, у разі дощу з крупи опади слабкої інтенсивності близько 0,1 мм/год впливають на виявлення морських об'єктів, для яких $R_0 = 45$ км. Так, наприклад, якщо морський об'єкт за відсутності гідрометеорів на трасі поширення та в районі об'єкта виявляється на відстані 45 км, то опади з інтенсивністю 0,1 мм/год скорочують максимальну дальність виявлення до 35 км.

Слід зазначити, що збільшення дальності виявлення морського об'єкта в «хорошу» погоду, що еквівалентно збільшенню ефективної поверхні розсіювання об'єкта, призводить до відносного збільшення скорочення дальності виявлення в осадах. Так, за максимальної дальності виявлення морського об'єкта без опадів 70 км, об'єкт в опади виявляється вже тільки на максимальному видаленні 50 км. В разі виявлення морського об'єкта у «хорошу» погоду на відстані 140 км, у «погану» погоду дальність виявлення об'єкта скорочується до 80 км.

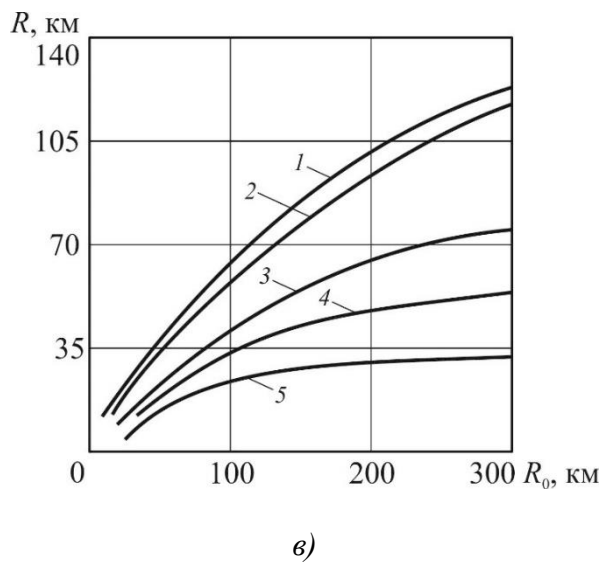
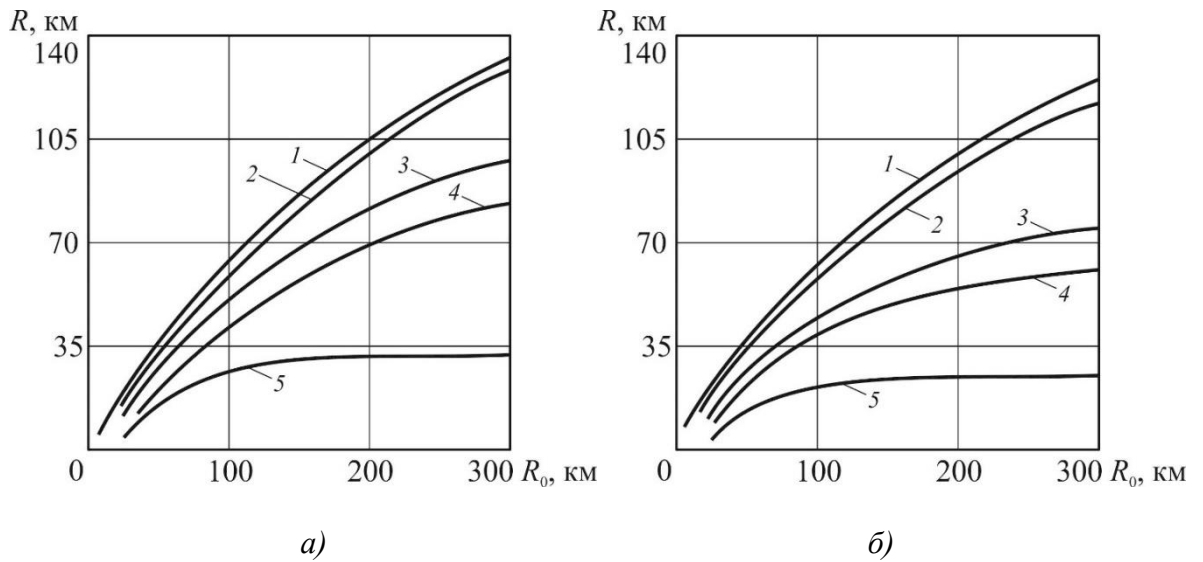
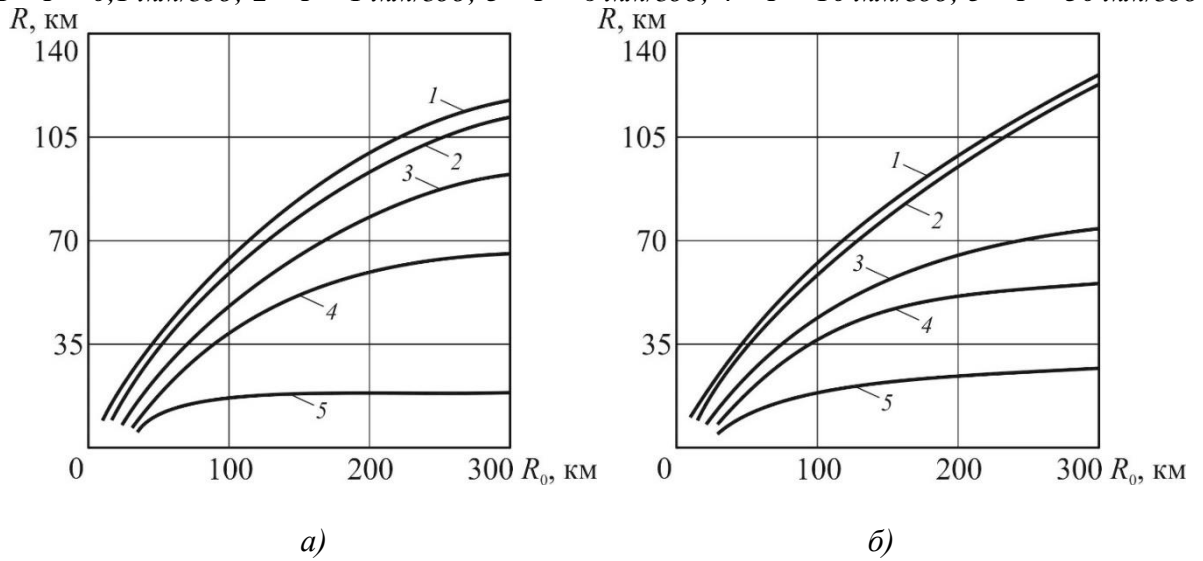
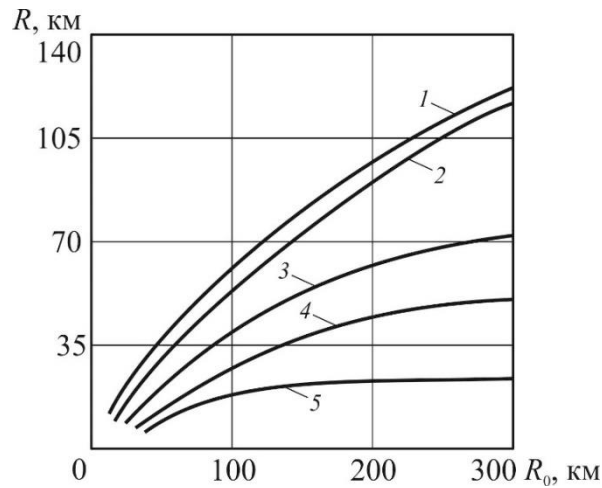


Рисунок 4. Розподіл Литвінова (довжина хвилі 3 см):

а) дощ із крупи; б) дощ із обзерненого снігу; в) дощ із необзерненого снігу;

1 – $I = 0,1$ мм/год; 2 – $I = 1$ мм/год; 3 – $I = 6$ мм/год; 4 – $I = 10$ мм/год; 5 – $I = 30$ мм/год





в)

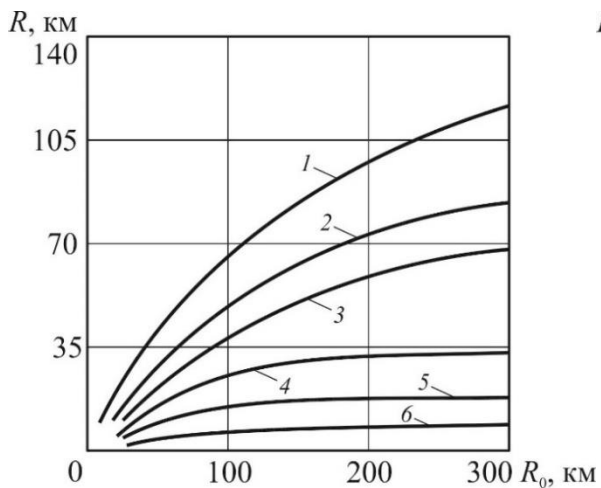
Рисунок 5. Розподіл Шифрина (довжина хвилі 3 см):

а) дощ із крупи; б) дощ із обзерненого снігу; в) дощ із необзерненого снігу;

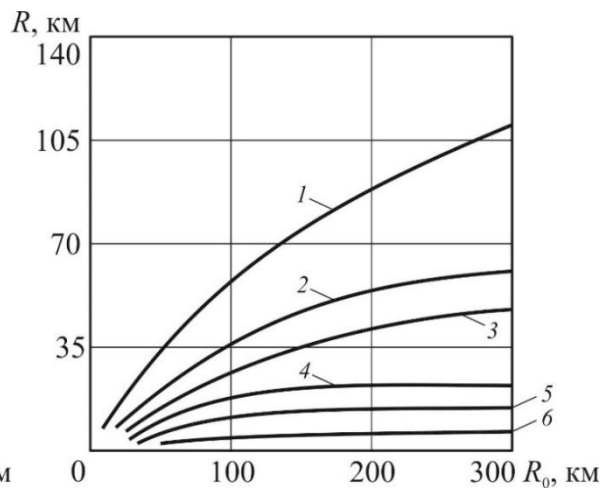
1 – $I = 0,1$ мм/год; 2 – $I = 1$ мм/год; 3 – $I = 6$ мм/год; 4 – $I = 10$ мм/год; 5 – $I = 30$ мм/год

Зі збільшенням інтенсивності опадів вплив їх на виявлення морських об'єктів зростає. Так, вплив опадів з інтенсивністю I мм/год починає позначатися вже для морських об'єктів, максимальна дальність виявлення яких за «хорошу» погоду становить величину, що перевищує 35 км. Якщо морський об'єкт, наприклад, виявлявся в «хорошу» погоду на відстані 37 км, то в разі опадів такої інтенсивності дальність виявлення скорочується до 30 км.

Збільшення максимальної дальності виявлення R_0 також призводить до відносного скорочення дальності виявлення морського об'єкта в опадах. Так, за $R_0 = 160$ км максимальна дальність виявлення морського об'єкта в опадах становить вже величину порядку 85 км.



а)



б)

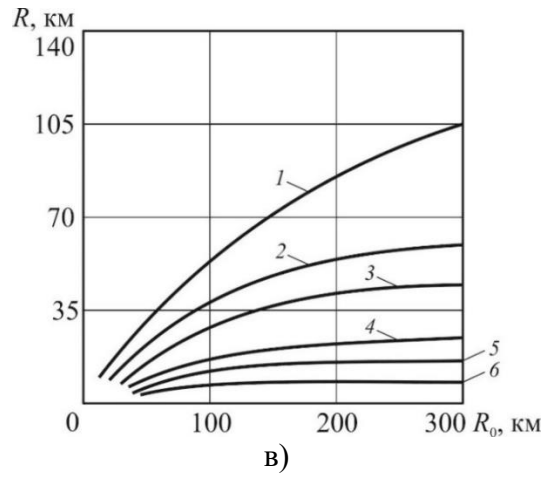


Рисунок 6. Розподіл Литвінова (довжина хвилі 8 мм):
 а) дощ із крупи; б) дощ із обзерненого снігу; в) дощ із необзерненого снігу;
 1 – $I = 0,1$ мм/год; 2 – $I = 0,6$ мм/год; 3 – $I = 1$ мм/год; 4 – $I = 3$ мм/год; 5 – $I = 6$ мм/год;
 5 – $I = 10$ мм/год

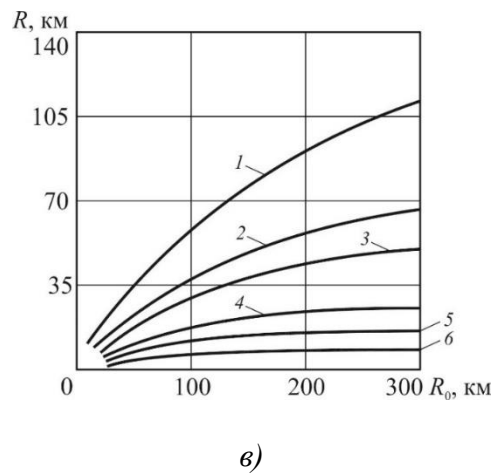
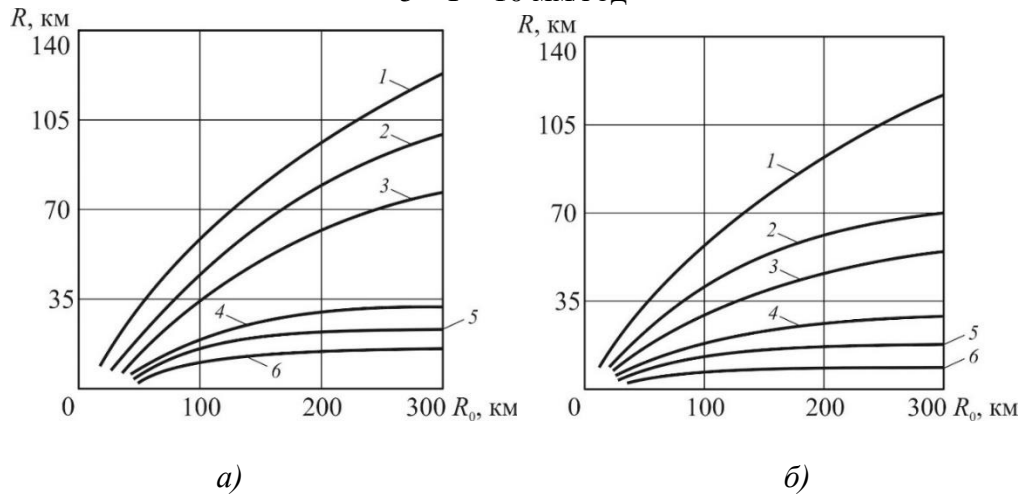


Рисунок 7. Розподіл Шифрина (довжина хвилі 8 мм):
 а) дощ із крупи; б) дощ із обзерненого снігу; в) дощ із необзерненого снігу;
 1 – $I = 0,1$ мм/год; 2 – $I = 0,6$ мм/год; 3 – $I = 1$ мм/год; 4 – $I = 3$ мм/год; 5 – $I = 6$ мм/год; 5 –
 $I = 10$ мм/год

У разі подальшого збільшення інтенсивності опадів спостерігається ще більший їх вплив на максимальну дальність виявлення морських об'єктів.

За інтенсивності дощу 6 мм/год максимальна дальність виявлення морських об'єктів, які виявляються в «хорошу» погоду на дальністях 12 км, становить величину порядку 6 км. За збільшення інтенсивності опадів до 10 мм/год їхній вплив, в основному, позначається на виявленні морських об'єктів, максимальна дальність виявлення яких у «хорошу» погоду значна.

У разі подальшого збільшення інтенсивності опадів від 10 до 30 мм/год – скорочує максимальну дальність виявлення морського об'єкта майже вдвічі.

Що стосується тропічних злив з інтенсивністю близько 100 мм/год, то в цих умовах морський об'єкт, для якого $R_0 = 130$ км, буде виявлено лише на відстані близько 10 км. У разі дощу з обзерненого снігу в діапазоні інтенсивностей від 0,1 до 1 мм/год ступінь скорочення максимальної дальності виявлення морських об'єктів приблизно такий самий, як і для дощу з крупи. За інтенсивності опадів більше ніж 6 мм/год вони починають позначатися на дальності виявлення морських об'єктів, котрим максимальна дальність виявлення в «хорошу» погоду має величину, що перевищує 10 км. Так, наприклад, якщо дальність виявлення морського об'єкта у «хорошу» погоду дорівнює 12 км, то в умовах опадів такої інтенсивності вона скорочується до 5 км.

Зі збільшенням максимальної дальності виявлення у «хорошу» погоду відносний вплив опадів на виявлення зростає: для морського об'єкта, що має $R_0 = 80$ км, максимальна дальність виявлення в опадах скорочується вдвічі. За подальшого збільшення інтенсивності опадів їхній вплив на виявлення морських об'єктів ще більше зростає.

Слід зазначити, що у разі дощу із обзерненого снігу вплив на характеристики виявлення морських об'єктів закону розподілу крапель за розмірами вже суттєвий: дощ із розподілом крапель за розмірами за Шифриним сильніше позначається на погіршенні виявлення морських об'єктів, ніж дощ із розподілом за Литвиновим.

У разі дощу з необзерненого снігу в межах інтенсивностей від 0,1 до 3 мм/год вплив його на скорочення максимальної дальності виявлення морських об'єктів приблизно аналогічно впливу дощів, утворених з крупи та обзерненого снігу з розподілом крапель за Литвиновим. Істотна відмінність у впливі дощу з необзерненого снігу, порівняно з дощем іншої природи, спостерігається за опадів інтенсивністю 6 мм/год в разі виявлення морських об'єктів, у яких дальність виявлення в «хорошу» погоду $R_0 = 100$ км. Так, наприклад, якщо ціль у «хорошу» погоду виявлятиметься на дальностях близько 250 км, то в дощі з необзерненого снігу з інтенсивністю 6 мм/год вона вже виявлятиметься лише на дальностях близько 60 км.

Зміна інтенсивності опадів в інтервалі 6–10 мм/год мало позначається на виявленні морських об'єктів, у яких максимальна дальність виявлення в «хорошу» погоду мала і проявляється сильніше для об'єктів, у яких вона велика. Наприклад, у разі виявлення морського об'єкта, у якого максимальна дальність виявлення в «хорошу» погоду 100 км у таких опадах інтенсивністю 6 мм/год максимальна дальність його виявлення становить величину близько 35 км, а об'єкта з $R_0 = 200$ км ця дальність виявлення буде 45 км.

В опадах значної інтенсивності близько 30 мм/год особливо сильно позначається виявлення морських об'єктів, мають значні дальності виявлення в «хорошу» погоду. Наприклад, морський об'єкт, для якого $R_0 = 300$ км, у таких опадах виявлятиметься лише на дальностях близько 30 км.

Що стосується впливу закону розподілу крапель за розмірами, то слід зауважити, що у разі опадів, утворених шляхом танення необзерненого снігу, дощі з розподілом крапель за Шифриним мають сильніший вплив, ніж дощі з розподілом крапель за Литвиновим.

Перейдемо тепер до аналізу отриманих результатів у міліметровому діапазоні хвиль. У цьому діапазоні для дощу з крупни характерним є його однаковий вплив на скорочення максимальної дальності виявлення морських об'єктів незалежно від закону розподілу крапель за розмірами. Характер впливу інтенсивності опадів на зміну максимальної дальності виявлення морських об'єктів в цьому діапазоні хвиль такий самий, як і в 3 сантиметровому діапазоні. Однак у міліметровому діапазоні ступінь впливу значно сильніший.

У разі опадів інтенсивністю до 30 мм/год, утворених таненням обзерненого та необзерненого снігу, їх вплив на скорочення максимальної дальності виявлення морських об'єктів однаково. Однак за цих інтенсивностей має місце відмінність у впливі закону розподілу крапель за розмірами на ефективність виявлення морських об'єктів. Так, морські об'єкти, що виявляються в «хорошу» погоду на відстанях, що не перевищують 300 км, в опадах такої природи за інтенсивності 30 мм/год з розподілом крапель за розмірами за Литвиновим ще можуть бути виявлені на дальності близько 5 км, тоді як в опадах з розподілом крапель за Шифриним виявлені бути не можуть.

Атмосферні утворення крім скорочення максимальної дальності виявлення морських об'єктів можуть істотно впливати і на точність вимірювання дальності.

За наявності в атмосфері атмосферних утворень траса поширення електромагнітних хвиль до радіолокаційної цілі і назад не проходить в чистій однорідній атмосфері, хоча насправді й чисту атмосферу не можна вважати ідеально однорідною через наявність у ній неоднорідностей, обумовлених турбулентним перемішуванням повітряних мас, а частково чи повністю проходить через атмосферні утворення. В результаті цього швидкість поширення радіохвиль по трасі не буде постійною, а матиме різні значення на різних ділянках. Внаслідок цього й матимуть місце помилки у вимірі дальності до морських об'єктів.

Оцінимо величину помилки вимірювання дальності за рахунок відмінностей у швидкостях поширення радіохвиль у гідрометеорах та в чистій атмосфері.

Нехай на трасі поширення радіолокаційних сигналів розташована атмосферне утворення, що має протяжність R_a вздовж лінії, що з'єднує суднову радіолокаційну станцію з морським об'єктом. І тут на ділянці траси R_a час поширення електромагнітної хвилі до цілі і назад дорівнюватиме

$$t = 2 \int_0^{R_a} \frac{dR}{v(R_a)}, \quad (20)$$

де $v(R_a)$ – закон зміни швидкості поширення хвилі на даній ділянці траси.

Різниця часів поширення хвилі в гідрометеорах та чистій атмосфері на цій ділянці буде

$$\Delta t = 2 \int_0^{R_a} \left[\frac{1}{v(R_a)} - \frac{1}{c} \right] dR, \quad (21)$$

де c – швидкість поширення хвилі у чистій атмосфері.

Помилка у визначенні дальності до об'єкта відповідно до (20) та (21) дорівнюватиме

$$\Delta R = \int_0^{R_a} \left[\frac{c}{v(R_a)} - 1 \right] dR = \int_0^{R_a} [n(R_a) - 1] dR, \quad (22)$$

де $n(R_a)$ – закон зміни коефіцієнта заломлення гідрометеорів трасою поширення радіохвиль.

У разі наявності на ділянці поширення сигналів однорідного середовища коефіцієнт заломлення якого по всій ділянці R_a однаковий, вираз для помилки набуває вигляду

$$\Delta R = (n - 1) R_a. \quad (23)$$

За наявності на трасі поширення радіохвиль кількох ділянок з різними значеннями коефіцієнта заломлення (20) може бути узагальнено і цей випадок

$$\Delta R = \sum_{i=1}^k (n_i - 1) R_{ai}. \quad (24)$$

З (23) і (24) випливає, що для того, щоб оцінити вплив атмосферних утворень на точність радіолокаційного вимірювання дальності суднової РЛС необхідно визначити межі зміни величини коефіцієнта заломлення для різних типів атмосферних утворень.

В результаті підстановки (17) (22) отримуємо співвідношення

$$\Delta R = \left[\frac{80}{1} \cdot 10^{-6} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) + \frac{3}{2} \rho W \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \right] R_a. \quad (25)$$

У (25) перший доданок визначається вологим повітрям усередині атмосферного утворення, а другий – його аерозольною фракцією. Аналіз (25) показує, що за реальних водностей атмосферних утворень, тисках і температурах, доданок, зумовлений аерозольною фракцією, на три порядки менше доданку, обумовленого вологим повітрям і їм практично можна знехтувати. Таким чином, під час практичних розрахунків помилки виміру дальності за рахунок впливу атмосферних утворень можна користуватися співвідношенням для помилки, обумовленої лише впливом вологого повітря поклавши у ньому відносну вологість, що дорівнює 100%.

$$\Delta R = \frac{80}{1} \cdot 10^{-6} \left(P + \frac{4810}{T} \ell \right) R_a, \quad (25)$$

На рис. 8 представлені графіки залежностей величини помилки радіолокаційного визначення дальності суднової РЛС від протяжності шару гідрометеорів на трасі поширення радіохвиль для різних значень $(n - 1)$. Аналіз цих залежностей показує, що помилка у визначенні дальності за рахунок впливу гідрометеорів становить десятки і може сягати кількох сотень метрів, що в ряді випадків може з'явитися неприпустимим.

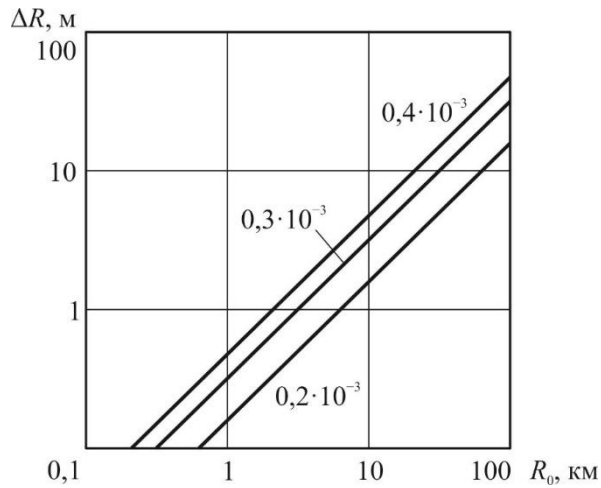


Рисунок 8. Залежність величини помилки радіолокаційного визначення дальності суднової РЛС

За необхідності обчислення сумарної помилки радіолокаційного визначення дальності суднової РЛС морських об'єктів, обумовленої впливом атмосфери та атмосферних утворень, необхідно користуватися виразом

$$\Delta R = \sum_{i=0}^K (n_i - 1) R_i + \sum_{j=0}^{\ell} (n_a - 1) R_j, \quad (25)$$

де n – коефіцієнт заломлення безхмарної атмосфери;

n_a – коефіцієнт заломлення атмосферних утворень;

K – кількість ділянок безхмарної атмосфери на трасі поширення радіохвиль;

ℓ – кількість ділянок з гідрометеорами;

R_i – протяжність ділянок безхмарної атмосфери;

R_j – протяжність гідрометеорів.

Висновки. Представлені залежності коефіцієнта заломлення атмосферних утворень від температури біля земної поверхні при різних висотах атмосферних утворень та показано, що коефіцієнт заломлення атмосферних утворень практично у всіх реальних випадках полягає в інтервалі значень $(n-1) \cdot 10^{-6}$ від 100 до 500.

Показано, що зі збільшенням інтенсивності дощу як для діапазону 3 см, так і для 8 мм залежність величини коефіцієнта ослаблення від інтенсивності опадів за постійної температури для обох розподілів крапель за розмірами різко збільшується.

Показано вплив природи утворення опадів на коефіцієнт ослаблення в разі зміни їх інтенсивності – в діапазоні хвиль 3 см до інтенсивності опадів 30 мм/год коефіцієнт ослаблення в дощі з необзерненого снігу менший, ніж у дощі з крупи; зі збільшенням інтенсивності опадів коефіцієнт ослаблення дощу з крупи різко збільшується і стає вищим, ніж для дощів іншої природи; коефіцієнт ослаблення для дощу з необзерненого снігу різко зменшується у порівнянні з дощами іншої природи. Для 8 мм діапазону під час опадів до інтенсивності 10 мм/год велику величину має коефіцієнт ослаблення в разі дощу з обзерненого снігу та меншу за дощ з крупи; за інтенсивності опадів понад 10 мм/год збільшується коефіцієнт ослаблення для дощу з крупи; менше значення має коефіцієнт

ослаблення в дощі з необзерненого снігу. Ця залежність спостерігається для обох розподілів крапель за розмірами.

Показано скорочення максимальної дальності радіолокаційного спостереження за рахунок атмосферних утворень на хвилях коротше 5 см, а саме в порівнянні 3 см і 8 мм діапазонів хвиль.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кобзарев Ю.Б. Современная радиолокация. Анализ, расчет и проектирование систем. М., 1969. 704 с.
2. А.А. Коростельев, Н.Ф. Ключев, Ю.А. Мельник и др. Теоретические основы радиолокации учебник для студ. радиотех. спец. вузов. М., 1978. 607 с.
3. Вильский Г. Б., Мальцев А. С., Бездольный В. В., Гончаров Е. И. Навигационная безопасность при лоцманской проводке судов. Одесса: «Феникс», 2007. 445 с.
4. Демиденко П. П. Судовые радиолокационные и радионавигационные системы. Одесса: «Феникс», 2009. 372 с.
5. Вагушенко В. В. Судовые навигационные информационные системы. Одесса: «Феникс», 2004. 302 с.
6. Морозов А. В. РЛС в судовождении. Одесса: ВПП «Друкарський дім», 2013. 464 с.
7. Козлов И. М. Параметры двухточечной статистической модели для Имитации сложного радиолокационного объекта. Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка, 43(6). С. 19-23.
8. Трофименко І. В. Визначення перспективних напрямків розвитку навігаційного забезпечення СУДНОВОДННЯ з використанням радіолокаційних систем. НОВІТНІ технології. 2017. №. 2. С. 29-42.
9. Путятин В. Г., Корбан Д.В., Князь А.И. Влияние осадков на разрешающую способность радиолокационной станции по угловым координатам. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2017. Т. 19, № 4. С. 26-34.
10. Иванов О. В. Распространение электромагнитных волн в анизотропных и бианизотропных слоистых структурах. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 262 с.
11. Седлецкий Р. М. Эффективная площадь рассеяния идеально проводящих тел простейшей формы в средах с комплексной проницаемостью. Журнал Радиозлектроники. 2001. No 9. С. 1-4.
12. Yadnya M. S., Sudiartha I. W. Attenuation model from drop size distribution of rain for millimeter wave communication channel. 2017 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA). IEEE, 2017. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TSSA.2017.8272936>.
13. Veselovska G., Khlopov G. Modeling of scattering of electromagnetic waves by snow crystals. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). IEEE, 2017. P. 351-354. <https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126646>.
14. Norouzian F. Marchetti E., Gashinova M., et al. Rain attenuation at millimeter wave and low-THz frequencies. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 68, No 1. P. 421-431. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2938735>.
15. Hong E., Lane S., Murrell D., et al. Terrestrial link rain attenuation measurements at 84 GHz. 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). IEEE, 2017. P. 1-2. <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878267>.
16. Grabner M., Pechac P., Valtr P. Analysis of propagation of electromagnetic waves in atmospheric hydrometeors on lowelevation paths. Radioengineering. 2018. Vol. 27, No 1. P. 29-33. <https://doi.org/10.13164/re.2018.0029>.

17. Nagel D. Detection of rain areas with airborne radar. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-7. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008094>.
18. Averyanova Y., Rudi-akova A., Yanovsky F.J. Segregating deformation of scattering rain-drops using several receive antennas with different polarization angles. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-6. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008260>.
19. Navarro K. M. M., Costa E., Rodriguez C.A.M., et al. Realistic rain model for the estimation of the rainfall rate from radar measurements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67, No. 9. P. 6104-6114. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2921006>.
20. Setijadi E., Matsushima A., Tanaka N., et al. Effect of temperature and multiple scattering on rain attenuation of electromagnetic waves by a simple spherical model. Progress in Electromagnetics Research. 2009. Vol. 99. P. 339-354. <https://doi.org/10.2528/PIER09102609>.
21. Odedina M. O., Afullo T. J. Determination of rain attenuation from electromagnetic scattering by spherical raindrops: Theory and experiment. Radio Science. 2010. Vol. 45, Iss. 1, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1029/2009RS004192>.

REFERENCES

1. Kobzarev U.B. Sovremennaya radiolokaciya. Analiz, raschet i proectirovanie sistem. M., 1969. 704 p.
2. Korostelev A.A., Kluev H.F., Melnik U.A. Teoreticheskie osnovi radiolokacii. M., 1978. 607 p.
3. Vil'skij G. B., Mal'cev A. S., Bezdol'nij V. V., Goncharov E. I. Navigacionnaya bezopasnost' pri loemanskoj provodke sudov [Navigational safety in ship pilotage]. Odessa: «Feniks», 2007. 445 p.
4. Demidenko P. P. Sudovye radiolokacionnye i radionavigacionnye sistemy [Shipborne radar and radio navigation systems]. Odessa: «Feniks», 2009. 372 p.
5. Vagushchenko V. V. Sudovye navigacionnye informacionnye sistemy [Ship navigation information systems]. Odessa: «Feniks», 2004. 302 p.
6. Morozov A. V. RLS v sudovozhdenii [Radar stations in navigation]. Odessa: VPP «Drukars'kij dim», 2013. 464 p.
7. Kozlov I. M. Parametry dvoutochechnoj statisticheskoj modeli dlya imitacii slozhnogo radiolokacionnogo ob'ekta [Parameters of a Two-Point Statistical Model for Simulating a Complex Radar Object]. Visti vishchih uchbovih zakladiv. Radioelektronika, 43(6). P. 1923.
8. Trofimenko I. V. Vznachennya perspektivnih napryamkiv rozvitku navigacii nogo zabezpechennya sudnovodinnya z vikoristannyam radiolokacii nih sistem [Determination of perspective directions of navigation support development shipping with the use of radar systems]. Novitni tekhnologii. 2017. No. 2. P. 29-42.
9. Putyatin V. G., Korban D.V., Knyaz' A.I. Vliyanie osadkov na razreshayushchuyu sposobnost' radioiokacionno stancii po ugiovym koordinatam [Influence of precipitation on the resolution of the radar station in angular coordinates]. Reestraciya, zberigannya i obrobka danih. 2017. T. 19, No. 4. P. 26-34.
10. Ivanov O. V. Rasprostranenie elektromagnitnyh voln v anizotropnyh i bianizotropnyh sloistyh strukturah [Propagation of electromagnetic waves in anisotropic and bianisotropic layered structures]. Ul'yanovsk : UIGTU, 2010. 262 p.
11. Sedleckii R. M. Effektivnaya ploshchad' rasseyaniya ideal'no provodyashchih tel prosteishei

- formy v sredah s kompleksnoi pronicaemost'yu [Effective scattering area of ideally conducting bodies of the simplest shape in media with complex permeability]. Zhurnal Radioelektroniki. 2001. No 9. P. 1-4.
12. Yadnya M. S., Sudiartha I. W. Attenuation model from drop size distribution of rain for millimeter wave communication channel. 2017 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA). IEEE, 2017. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TSSA.2017.8272936>.
 13. Veselovska G., Khlopov G. Modeling of scattering of electromagnetic waves by snow crystals. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). IEEE, 2017. P. 351-354. <https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126646>.
 14. Norouzian F., Marchetti E., Gashinova M., et al. Rain attenuation at millimeter wave and low-THz frequencies. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 68, No 1. P. 421-431. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2938735>.
 15. Hong E., Lane S., Murrell D., et al. Terrestrial link rain attenuation measurements at 84 GHz. 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). IEEE, 2017. P. 1-2. <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878267>.
 16. Grabner M., Pechac P., Valtr P. Analysis of propagation of electromagnetic waves in atmospheric hydrometeors on lowelevation paths. Radioengineering. 2018. Vol. 27, No 1. P. 29-33. <https://doi.org/10.13164/re.2018.0029>.
 17. Nagel D. Detection of rain areas with airborne radar. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-7. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008094>.
 18. Averyanova Y., Rudi-akova A., Yanovsky F.J. Segregating deformation of scattering raindrops using several receive antennas with different polarization angles. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-6. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008260>.
 19. Navarro K. M. M., Costa E., Rodriguez C.A.M., et al. Realistic rain model for the estimation of the rainfall rate from radar measurements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67, No. 9. P. 6104-6114. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2921006>.
 20. Setijadi E., Matsushima A., Tanaka N., et al. Effect of temperature and multiple scattering on rain attenuation of electromagnetic waves by a simple spherical model. Progress in Electromagnetics Research. 2009. Vol. 99. P. 339-354. <https://doi.org/10.2528/PIER09102609>.
 21. Odedina M. O., Afullo T. J. Determination of rain attenuation from electromagnetic scattering by spherical raindrops: Theory and experiment. Radio Science. 2010. Vol. 45, Iss. 1, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1029/2009RS004192>.

Revenko V. Yu.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE ATMOSPHERIC ENVIRONMENT ON THE CHANGE OF THE RADAR RANGE TO THE OBJECTS TO BE OBSERVED IN TWO WAVE RANGES BY SHIP RADAR

The radiophysical characteristics of the atmosphere and atmospheric formations, the influence of the conditions of propagation of radar signals on the range and accuracy of measuring the range of marine objects, the dependence of the magnitude of the error in the radar measurement of the range of a ship's radar station on the extent of the atmospheric formation are considered.

The contrast of the radar image of a marine object observed against the background of reflections from atmospheric formations, depending on the distance to the ship's radar antenna, is presented in relation to indicators with a brightness mark of shipborne radars. The analysis of the basic equation of radar of single objects is carried out, taking into account the change in their reflected power at a certain distance depending on the intensity of the atmospheric process.

The influence of atmospheric formation on the parameters of the echo signal of a marine object is analyzed. Depending on the parameters of the ship's radar, the echo signal of a marine object in precipitation of varying intensity will provide a different deviation of the signal strength of the object to the signal strength of the atmospheric formation, at which it is still possible to determine the distance to the marine object without creating an emergency, that is, at which it is still possible to fulfill the task of the ship's radar.

It is shown that in order to determine the maximum detection range of a marine object at the operating wavelength of a shipborne radar, it is sufficient to know only the ratio of the effective scattering area to the parameters of the atmospheric formation, mainly to the intensity of the atmospheric formation. Using these ratios for various reflective properties of an object and the reflective properties of an atmospheric formation, it is possible to predict the maximum distance to a marine object at a given intensity, which increases the safety of navigation in difficult atmospheric conditions.

Key words: *atmosphere, atmospheric formations, ship radar station, rainfall intensity, detection range, marine object, dielectric permittivity, radar observation.*

УДК 621.431.74

doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.06

Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В.

ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЛОВИХ ПРОФІЛІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДВИГУНА В УМОВАХ СУЧАСНОЇ ТЕНДЕНЦІЇ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ШВИДКОСТІ СУДЕН

Під час експлуатації головних суднових малооберткових двигунів, згідно вимог нормативної документації, є необхідність регулярно перевіряти та оцінювати велику кількість параметрів робочого процесу. Такі вимоги необхідні для того, щоб стежити за змінами в умовах протікання основних процесів на окремих етапах здійснення робочого циклу двигуна, що надає змогу виявити будь-які порушення в його роботі пов'язані зі зміною технічного стану його окремих елементів, та двигуна в цілому. Це дозволяє вживати необхідних експлуатаційних заходів на ранній стадії виникнення проблем, щоб запобігти їх подальшого розвитку. Такий підхід також дозволяє забезпечити оптимальне використання двигуна та загальну економічність установки в цілому, що дуже важливо при сучасній тенденції щодо подорожчання палива, та посилення екологічних вимог. Однак, щоб оцінити зміни в параметрах робочого процесу потрібно порівняти результати планового індиціювання з попередніми даними та з результатами, отриманими під час стендових випробувань двигуна, або еталонними діаграмами та параметрами,

отриманими розрахунковим шляхом. Сучасні тенденції до зниження експлуатаційної швидкості суден, пов'язані з намаганням судновласників зменшити витрати на паливну складову, унеможливають проведення індиціювання та діагностики двигунів на номінальних режимах. Як наслідок, виникає потреба в визначенні параметрів робочого процесу на режимах часткових навантажень які суттєво відрізняються від номінальних. Для вирішення цієї проблеми, авторами було запропоновано методу, яка дозволяє отримувати аналітичним шляхом еталонні індикаторні діаграми для будь якого режиму роботи двигуна, базуючись на результатах його стендових випробувань. Аналіз таких діаграм дозволяє розширити перелік параметрів, що характеризують перебіг робочого процесу та виявити закономірності змін цих параметрів. Визначенню розширеного переліку параметрів робочого процесу у всьому діапазоні робочих режимів суднового малообертового двигуна оснований на аналізі розрахункових індикаторних діаграм присвячено дослідження, результати якого викладено в даній статті.

Ключові слова: судновий малообертовий двигун, індиціювання, індикаторна діаграма, параметри робочого процесу, режим роботи.

Постанова проблеми. Ефективність експлуатації суднових головних малообертових двигунів суттєво залежить від правильності вибору режимів їх роботи з урахуванням поточного технічного стану. Як правило двигунобудівні компанії надають дуже обмежений набір параметрів, що характеризують нормальний перебіг робочого процесу у обмеженому діапазоні робочих режимів, і ще менший набір параметрів, які характеризують зміни у перебігу робочого процесу пов'язані зі зміною технічного стану двигуна. Найбільш поширеним методом представлення таких параметрів є графічні залежності для діапазону від 50% до 100% від максимальної експлуатаційної потужності (Maximum continuous rating – MCR) (рис. 1) [1].

У той же час, основним методом контролю технічного стану суднових двигунів є саме контроль параметрів робочого процесу, який здійснюється шляхом індиціювання, що виконується відповідно до правил з технічної експлуатації та ремонту [2]. Саме цими правилами встановлені періодичність та режими на яких повинно здійснюватися індиціювання і, в більшості випадків, ці режими є наближеними до MCR. У реальній експлуатації в багатьох випадках двигуни працюють поза межами зазначеного діапазону робочих режимів, що пояснюється тенденціями щодо зменшення комерційної швидкості багатьох типів суден з метою скорочення витрат на паливну складову [3]. Жорсткий графік руху, призводить до того, що здійснювати індиціювання можливо тільки на режимі строго лімітованому судновласником.[4].

Якщо під час експлуатації виникає потреба в оцінюванні параметрів робочого процесу, що лежать поза межами цієї області, постає проблема пов'язана з отриманням еталонних даних для порівняння з результатами вимірювань одержаних під час планового обстеження та індиціювання. Найчастіше, у цьому випадку, згідно рекомендацій виробника двигунів.[5], судновий персонал в якості бази для порівняння використовує данні попередніх вимірювань, що не є коректним, оскільки дійсний стан двигуна на момент попереднього вимірювання не є визначеним.

Основні результати дослідження. Для вирішення проблеми визначення параметрів робочого процесу на режимах поза межами специфікаційних діапазонів, авторами була розроблена методологія побудови цифрових профілів робочих процесів за результатами стендових випробувань заводу-виробника, які поставляються разом з двигуном у комплекті технічної документації. Саме ці результати характеризують початковий стан двигуна та найбільш коректно можуть бути використані для визначення щодо змін у його технічному стані під час експлуатації.

Але застосування аналітично отриманих індикаторних діаграм не вичерпується тільки

їх використанням в якості бази для порівняння з індикаторними діаграмами отриманими вже під час експлуатації двигуна в складі енергетичної установки судна. Процедура порівняльного аналізу індикаторних діаграм досить складна і потребує відповідних навичок від персоналу машинної команди, який зазвичай не вдається сформувати під час їх підготовки. Однак розширений аналіз цифрового профілю дозволяє отримати окремі залежності зміни параметрів робочого процесу як функції навантаження двигуна, які значно простіше пов'язати зі змінами його технічного стану.

Performance Curves

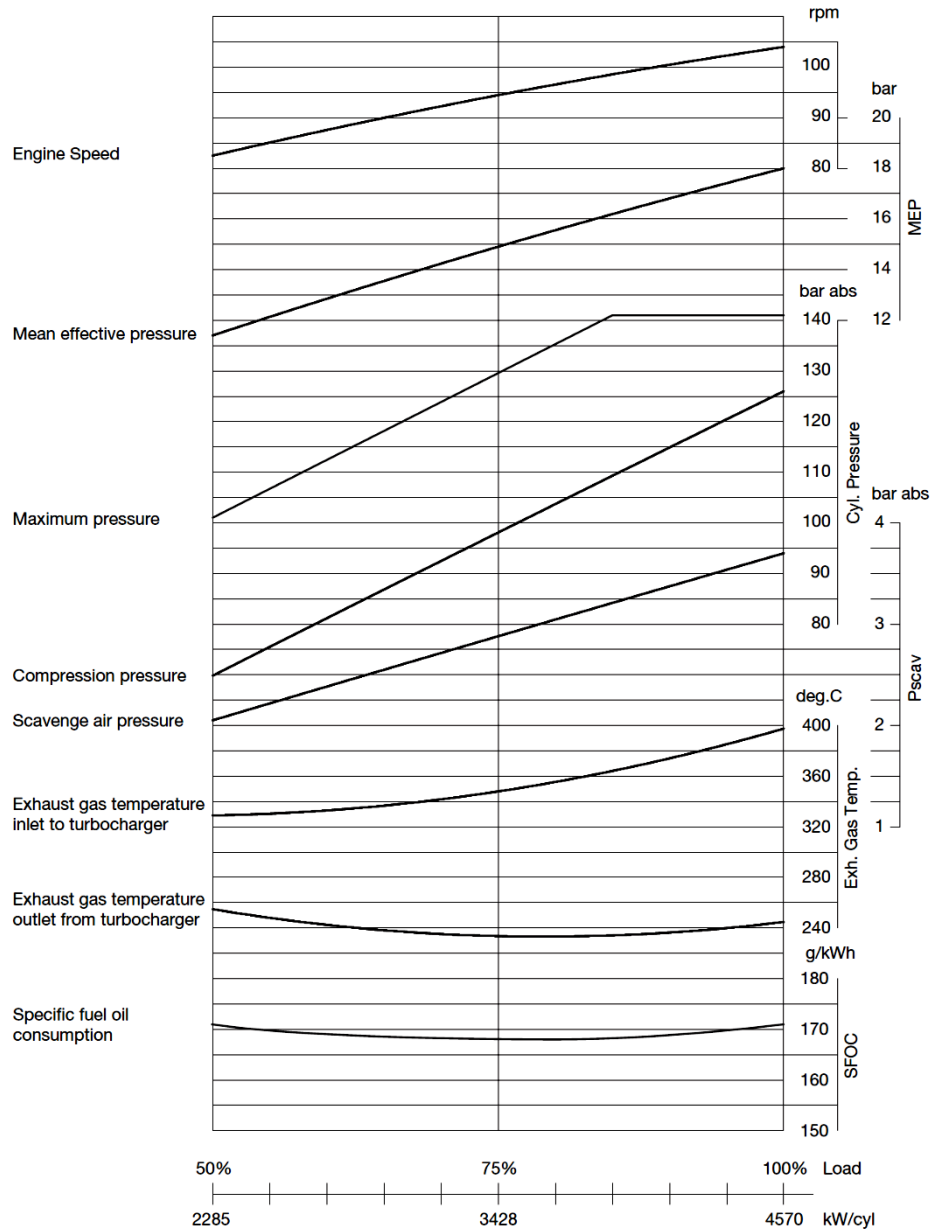


Рисунок 1 – Приклад графічного подання основних характеристик головного малооборотного двигуна MAN B&W K90MC-C6, як функція його навантаження [1]

Для формування такого набору параметрів з цифрового профілю виділяються окремі діаграми, що відповідають різним режимам роботи двигуна з заданим кроком. На рис. 2 представлено набір таких діаграм у $r\phi$ -координатах які виокремленні з цифрового профілю з кроком навантаження 10% для діапазону 20...100% від MCR.

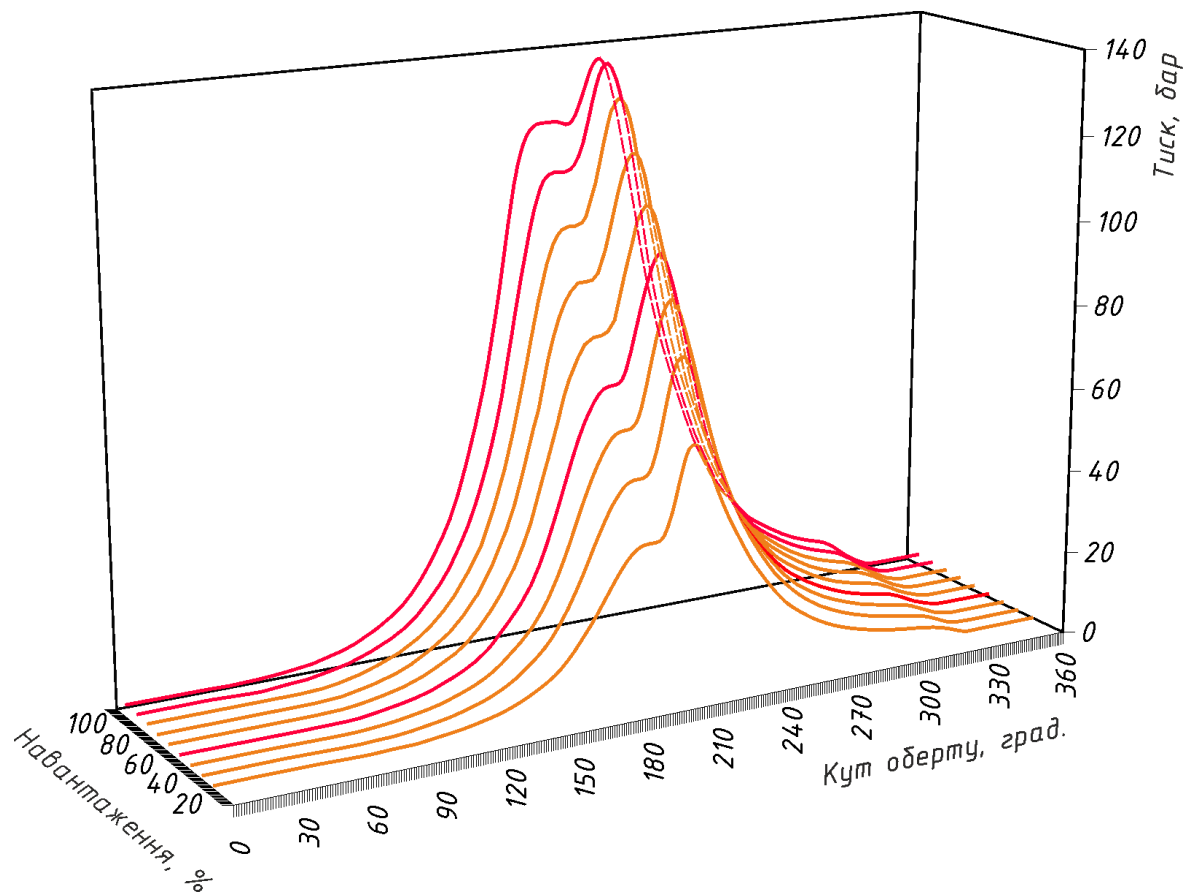


Рисунок 2 – Набір діаграм у $r\phi$ -координатах виокремлення з цифрового профілю з кроком навантаження 10% для діапазону 20...100% від MCR (базові криві зображені червоним кольором, а криві отримані аналітичним шляхом відповідно помаранчевим [4])

Для розширеного аналізу виокремлених індикаторних діаграм використовується розроблений авторами розрахунковий комплекс [6], який дозволяє визначити ряд параметрів робочого процесу як тих, що входять до основної номенклатури (рис. 1), так і інших параметрів, які можна використовувати у якості діагностичних для оцінки технічного стану двигуна, для всього діапазону його робочих режимів.

Як вхідні дані, окрім еталонних індикаторних діаграм, до розрахункового комплексу вводяться геометричні параметри двигуна. Приклад цих параметрів для двигуна MAN B&W 8K90MC-C наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Геометричні параметри головного малообертового двигуна MAN B&W 8K90MC-C № DML1-2046, побудованого фірмою Doosan Engine Co., LTD у 2008 році [7]

Параметр	Знач.	Параметр	Знач.
Діаметр циліндра, м	0,9	Кут закриття вікон, ° після НМТ	31
Хід поршня, м	2,3	Кут початку стиснення, ° після НМТ	65
Кількість циліндрів, од	8	Ступінь стиснення дійсна	12,12
Довжина шатуна, м	3,5	Втрата ходу на газообмін	0,356
Постійна КШМ (λ)	0,329	Втрата об'єму на газообмін, м ³	0,521
Висота продувних вікон, м	0,21	Робочий об'єм, м ³	1,463
Площа поршня, м ²	0,636	Об'єм камери згоряння, м ³	0,131
Кут відкриття вікон, ° після НМТ	31	Кут початку випуску, ° до НМТ	48

Окрім геометричних параметрів, для розрахунку показників робочого процесу необхідно визначити ряд залежностей, які можуть бути отримані шляхом побудови трендів за результатами стендових випробувань двигуна. Основним джерелом цієї інформації є протоколи випробувань двигуна MAN B&W 8K90MC-C [7]. Результат обробки даних випробувань наведено на рис. 3.

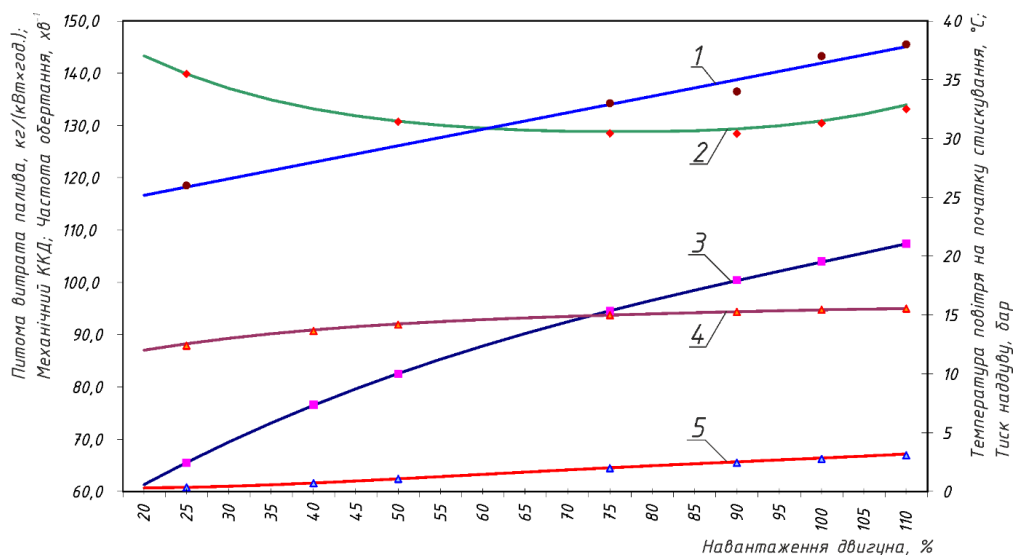


Рисунок 3 – Визначення вхідних розрахункових параметрів двигуна за результатами стендових випробувань в розширеному діапазоні робочих режимів (двигун MAN B&W 8K90MC-C6, табл. 1). Маркерами позначено дані отримані експериментально на стенді, кривими – лінії тренду: 1 – температура повітря на початку стискування; 2 – питома витрата палива; 3 – частота обертання; 4 – механічний ККД; 5 – тиск наддуву

Для більш коректного аналізу характеристик зміни параметрів робочого процесу у всьому діапазоні робочих режимів в подальших розрахунках було використано крок за навантаженням у 5 % від MCR. В інших випадках крок можна адаптувати до вимог замовника.

За результатами обчислень для двигуна взятого у якості прикладу було отримано розширену номенклатуру параметрів робочих процесів які зведено до табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахункові параметри робочих процесів в усьому діапазоні навантажувально-швидкісних режимів

Параметр	Навантаження двигуна, %																		
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
Частота обертання, хв ⁻¹	61,3	65,5	69,5	73,1	76,5	79,6	82,5	85,5	87,8	90,2	92,4	94,6	96,6	98,5	100,4	102,1	103,9	105,6	107,4
Механічний ККД двигуна	87	88,25	89,29	90,17	90,91	91,52	92,05	92,49	92,86	93,19	93,48	93,73	93,97	94,18	94,38	94,56	94,73	94,86	95
Температура повітря на вході, °С	25,2	25,9	26,6	27,3	28,0	28,7	29,4	30,1	30,8	31,5	32,2	32,9	33,6	34,3	35	35,7	36,4	37,11	37,81
Тиск наддуву, бар	0,300	0,350	0,440	0,566	0,718	0,889	1,073	1,263	1,455	1,646	1,832	2,013	2,188	2,356	2,520	2,680	2,840	3,000	3,181
Питома витрата палива, кг/(кВт×год)	194,7	190,0	186,3	183,3	180,9	179,1	177,7	176,7	175,9	175,4	175,1	175,0	175,0	175,2	175,7	176,5	177,8	179,6	182,0
Щільність повітря на вході, кг/м ³	1,518	1,573	1,674	1,816	1,988	2,181	2,387	2,6	2,814	3,026	3,252	3,43	3,621	3,803	3,98	4,151	4,322	4,492	4,685
Маса заряду циліндра, кг	1,558	1,616	1,719	1,865	2,042	2,239	2,45	2,671	2,89	3,108	3,32	3,523	3,719	3,906	4,088	4,264	4,439	4,75	5,373
Питома витрата повітря кг/(кВт×год)	9,622	10,61	10,88	10,67	10,25	9,71	9,289	8,926	8,644	8,404	8,295	8,204	8,265	8,168	8,146	8,11	8,086	7,95	7,429
Коефіцієнт надлишку повітря	3,403	3,851	4,035	4,02	3,904	3,741	3,599	3,478	3,387	3,312	3,269	3,233	3,227	3,219	3,192	3,185	3,133	3,066	2,815
Тиск у ВМТ, МПа	3,64	4,36	4,97	5,49	5,96	6,40	6,86	7,35	7,88	8,43	9,01	9,59	10,18	10,77	11,33	11,86	12,37	12,87	13,37
Температура в кінці стиснення, T_c , °С	1067	1222	1284	1280	1241	1181	1136	1111	1088	1073	1064	1058	1055	1052	1047	1040	1034	1027	923
Робота стиснення, кДж	508	618	718	810	899	987	1078	1174	1275	1377	1477	1574	1621	1712	1810	1920	2031	2133	2229
Циклова подача, кг	0,046	0,054	0,06	0,065	0,069	0,072	0,076	0,08	0,084	0,089	0,094	0,098	0,104	0,108	0,112	0,116	0,12	0,125	0,13
Кут початку горіння, ° після ВМТ	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	2	2,5	2,5	2,5
Максимальний тиск P_{max} , МПа	5,73	6,81	7,63	8,24	8,80	9,27	9,71	10,20	10,72	11,31	11,83	12,40	12,95	13,43	13,68	13,71	13,72	13,78	13,89
Кут досягнення P_{max} , ° після ВМТ	15	15,5	16	16,5	17	17,5	17,8	18,2	18,5	18,5	18,1	17,77	17,5	17,5	18	19	20,5	20,5	19,5
Швидкість $dp/d\phi$, МПа/°	0,106	0,122	0,127	0,126	0,122	0,117	0,112	0,111	0,111	0,111	0,124	0,131	0,136	0,148	0,161	0,172	0,185	0,191	0,192
Максимальна температура T_{max} , °С	1952	2238	2359	2358	2290	2183	2091	2021	1957	1905	1864	1832	1807	1780	1745	1703	1665	1633	1438
Кут досягнення T_{max} , ° після ВМТ	21,5	21,5	22	22,5	23,7	24,48	25	25,14	25,23	25,33	25,33	25,5	26,2	27	28,5	30	32,65	33,87	34
Кут закінчення горіння, ° після ВМТ	21,5	22	23	24,5	25,5	26	26,5	26,5	26,5	26,5	27	27,5	28	29	30	31,5	34,5	35,5	36
Теплота за цикл реальна, кДж	2291	3542	4381	4741	4742	4508	4341	4198	4082	4038	4041	4025	4177	4154	4089	3965	3881	3873	3041
Робота розширення, кДж	1478	1770	2014	2220	2402	2574	2748	2935	3133	3336	3536	3729	3907	4079	4248	4418	4590	4766	4944
Точка балансу $L_{ст.} = L_{роз.}$, ° після ВМТ	35,5	36	36,5	37,5	38,5	39,5	40,5	41,5	42	43	43,5	43,5	44	44,5	45,5	46,5	48	49	49,5
Кут початку випуску, ° до НМТ	46	45,5	47,5	47,5	48,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	48,5	49	48,5	48	47,5	47,5	46,5
Тиск на початку випуску, МПа	0,224	0,264	0,332	0,39	0,452	0,513	0,557	0,602	0,649	0,697	0,745	0,791	0,828	0,867	0,899	0,933	0,968	1,008	1,043
Температура на початку випуску, °С	702,0	782,0	880,0	913,9	927,3	923,9	895,9	874,0	859,0	847,2	837,2	827,0	811,0	799,4	783,9	773,4	765,0	744,0	692,1
Індикаторна потужність цил., кВт	991	1257	1501	1718	1917	2105	2296	2509	2720	2945	3171	3398	3680	3887	4080	4251	4432	4634	4860
Індикаторна потужність двигуна, кВт	7927	1005	12011	13743	15337	16843	18372	20076	21757	23559	25366	27182	29440	31094	32639	3401	35460	37075	38883
Середній індикаторний тиск, МПа	0,663	0,787	0,886	0,964	1,028	1,085	1,142	1,204	1,27	1,339	1,407	1,473	1,562	1,618	1,667	1,708	1,75	1,8	1,856
Робота за цикл, кДж	970	1152	1296	1410	1504	1587	1670	1761	1858	1959	2059	2155	2286	2368	2438	2498	2560	2633	2715
Індикаторний ККД робочого процесу	0,496	0,502	0,508	0,51	0,513	0,517	0,517	0,518	0,519	0,518	0,518	0,517	0,517	0,516	0,512	0,507	0,502	0,496	0,491
Ефективний ККД робочого процесу	0,432	0,443	0,454	0,46	0,466	0,473	0,476	0,479	0,483	0,483	0,483	0,485	0,486	0,486	0,483	0,479	0,476	0,471	0,466

Конкретна таблиця параметрів, або аналогічна їй таблиця для інших двигунів – це кінцевий продукт, який містить розширений список еталонних параметрів, необхідний для порівняльної діагностики в судових умовах. Під час планового процесу перевірки технічного стану судового двигуна за допомогою індиціювання персоналу необхідно лише занести його результати до розрахункового комплексу та отримати номенклатуру з 32 параметрів, які порівнюються з еталонними даними наведеними у таблиці для відповідного режиму. На підставі цього порівняння робляться висновки про перебіг робочих процесів у циліндрах двигуна та відхилення цього перебігу від нормального. За допомогою широкого списку базових величин можна зробити цій аналіз більш ґрунтовним.

Використання результатів розширеного аналізу дозволяє дослідити як змінюються основні параметри робочих процесів двигуна в залежності від його навантаження. Це дає змогу отримати уявлення про те, як ці параметри поведуть себе на ділянках, які лежать за межами протокольних випробувань двигуна. Найбільш доцільно групувати характеристики зміни окремих параметрів відповідно до етапів робочого процесу, представивши їх як функцію навантаження двигуна у всьому діапазоні можливих режимів роботи.

Суттєвий вплив на ефективність робочого циклу оказують процеси газообміну робочого циліндру з навколишнім середовищем, які залежать від правильного функціонування газообмінних органів та системи наддуву [8]. Правильність їх функціонування впливає на якість очищення і наповнення циліндрів двигуна; роботу, що витрачається на газообмін; температурний рівень деталей циліндропоршневої групи. Особливо це стосується роботи двигуна на режимах малих навантажень для яких характер зміни параметрів суттєво відрізняється від режимів середніх та високих навантажень. Залежності параметрів цих процесів від навантаження, представлені на рис. 4, на якому наочно показано характерні зміни таких параметрів як питома витрата і коефіцієнт надлишку повітря, маса заряду і щільність повітря на вході до робочого циліндру, на різних режимах навантаження двигуна

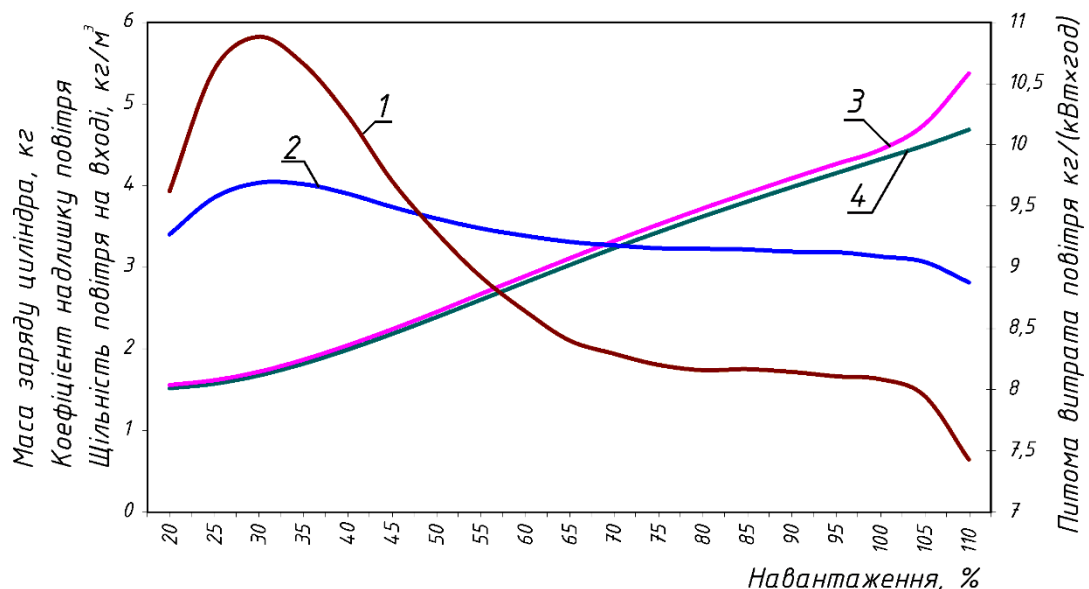


Рисунок 4 – Параметри процесу газообміну: 1 – питома витрата повітря; 2 – коefіцієнт надлишку повітря; 3 – маса заряду циліндра; 4 – щільність повітря на вході до циліндр

Аналіз наведених залежностей показує, що в діапазоні навантажень 30...105%

відстежується чіткий тренд зміни розглянутих параметрів, однак за межами цього діапазону характер їх зміни суттєво відрізняється. Таким чином, якщо під час експлуатації орієнтуватися на тренди побудовані для діапазону 50...100% від MCR, тобто на ділянку, яка представлена в усіх формулярах протоколів випробувань, неможливо отримати об'єктивні дані для виконання порівняльного аналізу, і як наслідок для визначення дійсного технічного стану двигуна. В той же час, запропонований авторами метод визначення параметрів процесу газообміну шляхом аналізу розрахункових «еталонних» індикаторних діаграм дає таку змогу, незалежно від режиму навантаження двигуна.

Аналіз параметрів, що характеризують процес стиснення вказує на те, що для них також характерна суттєва зміна трендів при роботі двигуна на режимах навантажень відмінних від номенклатурних. З рис. 5 видно, що характер зміни температури робочого тіла наприкінці стиснення у діапазонах навантажень 20...50% та 104...110% значно відрізняється від основного робочого діапазону. Це також підтверджує тезу про те, що некоректно робити висновки стосовно перебігу параметрів робочого процесу як функцій навантажень двигуна на всьому інтервалі робочих режимів, спираючись лише на данні наведені в формулярах виробника.

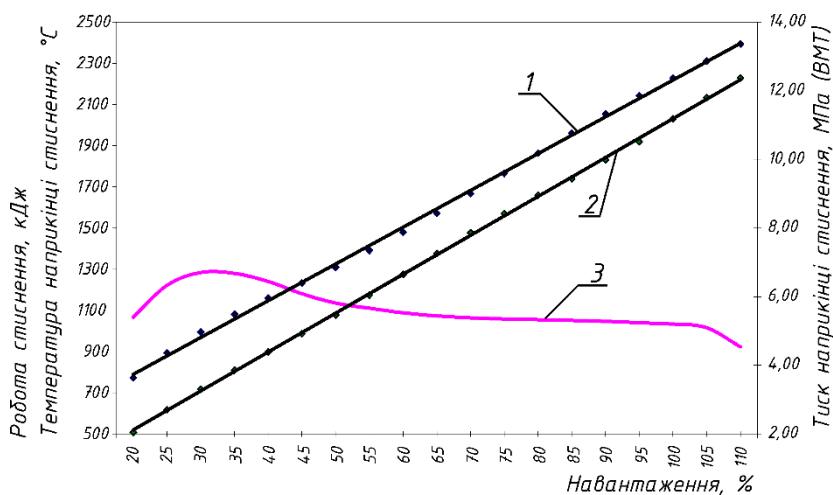


Рисунок 5 – Параметри процесу стиску: 1 – тиск наприкінці стиснення; 2 – робота стиснення; 3 – температура наприкінці стиснення

Згоряння палива поданого до робочого циліндру є основним етапом, що визначає ефективність перебігу робочого процесу двигуна в загалом. На характер його протікання суттєво впливають як стан робочого тіла, параметри якого формуються на етапах газообміну та стискування, так і параметри процесу вприскування палива, його кількості та розподілу по об'єму камери згоряння. В загалом, параметри вприскування палива (кут випередження, циклова подача, тривалість подачі) суттєво залежать від роботи та налаштувань паливної апаратури [9]. В розглянутому випадку системою яка впливає на параметри вприскування палива є система Variable Injection Timing (VIT), яка змінює кут подачі палива в залежності від режиму роботи двигуна. Саме роботою цієї системи пояснюється складний характер зміни кутів початку згоряння, досягнення максимального тиску та температури і закінчення згоряння (рис. 6).

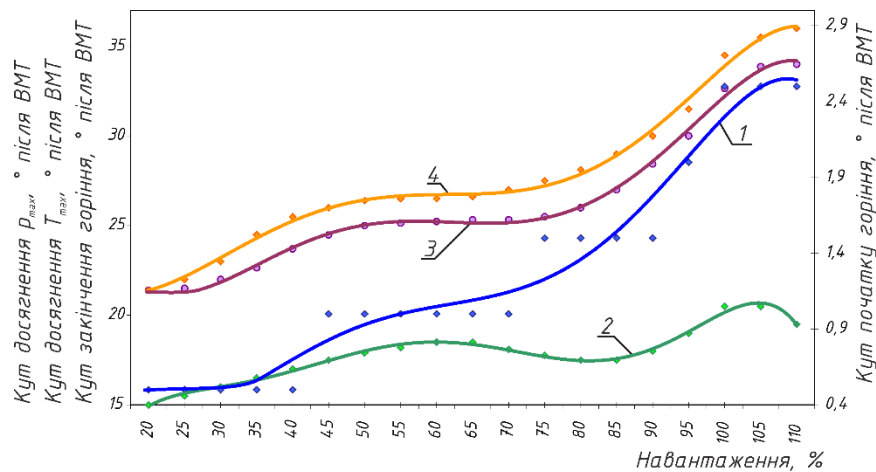


Рисунок 6 – Кути досягнення характерних ділянок робочого процесу: 1 – кут початку горіння; 2 – кут досягнення p_{\max} ; 3 – кут досягнення T_{\max} ; 4 – кут закінчення горіння

Таким чином, зазначені кути можуть бути використані як діагностичні параметри для контролю за роботою системи ВПТ, шляхом порівняння фактичних кутів визначених за результатами індиціювання під час експлуатації з кутами отриманими за результатами стендових випробувань двигуна.

Роботою системи ВПТ також пояснюються характеристики процесу згоряння наведені на рис. 7. Збільшення кута випередження впорскування палива дозволяє підтримувати приблизно постійний максимальний тиск циклу (p_{\max}) в діапазоні навантажень 90...110% від MCR. Пов'язане з випередженням кута впорскування палива зростання коефіцієнту збільшення тиску (λ) у робочому циклі, призводить до збільшення максимальної температури циклу (T_{\max}) у діапазоні навантажень 30...105% від MCR. Однак подальше зменшення швидкості наростання тиску призводить до того, що значення T_{\max} починає зменшуватися. Саме цей діапазон (20...30% від MCR) співпадає з підключенням до системи повітропостачання електричних повітрорудок (air blowers). Таким чином параметри процесу згоряння в діапазоні 20...30% від MCR можна використовувати для оцінки ефективності роботи повітрорудок.

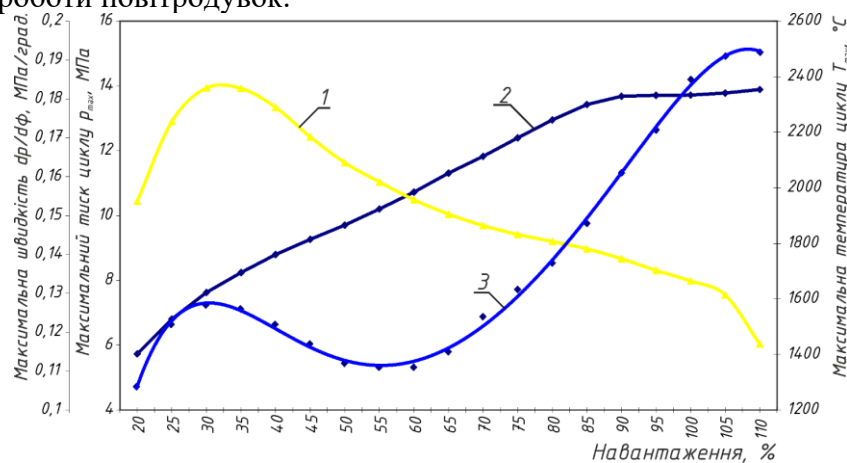


Рисунок 7 – Параметри процесу згоряння палива у робочому просторі двигуна: 1 – максимальна температура циклу; 2 – максимальний тиск циклу; 3 – максимальна швидкість зростання тиску

Температура наприкінці розширення, аналогічним чином повторює характер зміни максимальної температури циклу T_{\max} (рис. 8). Враховуючи це, вона може бути використана

для приблизної оцінки останньої, оскільки її вимірювання значно простіше контролювати під час експлуатації. Тиск на момент відкриття випускного клапану майже лінійно залежить від навантаження, при умові відкриття клапану з однаковим кутом до приходу поршня у НМТ. Відхилення від лінійного характеру може вказувати саме на неправильний кут закриття клапану.

Перспективним параметром для визначення ефективності перебігу робочого процесу, є визначення точки балансу (рис. 8). Тобто такого кута на лінії розширення при якому робота стискування дорівнює роботі розширення ($L_{стис.} = L_{розшир.}$). Цей параметр фізично пов'язано з усім перебігом робочого процесу і тому його значення може бути використано як діагностичний параметр [10]. Але практичне використання цього параметра для діагностичних цілей потребує додаткового дослідження, що виходить за рамки цієї роботи.

Незважаючи на відмінності у характері зміни окремих параметрів на визначених ділянках здійснення робочого процесу, отримані по результатам розрахунків узагальнені параметри цілком відповідають класичному уявленню про них (рис. 9). До того ж, значення цих параметрів корелюються з результатами експериментальних випробувань, що у загальному підсумку вказує на адекватність запропонованих методів оцінки інших параметрів в розширеному діапазоні режимів роботи двигуна.

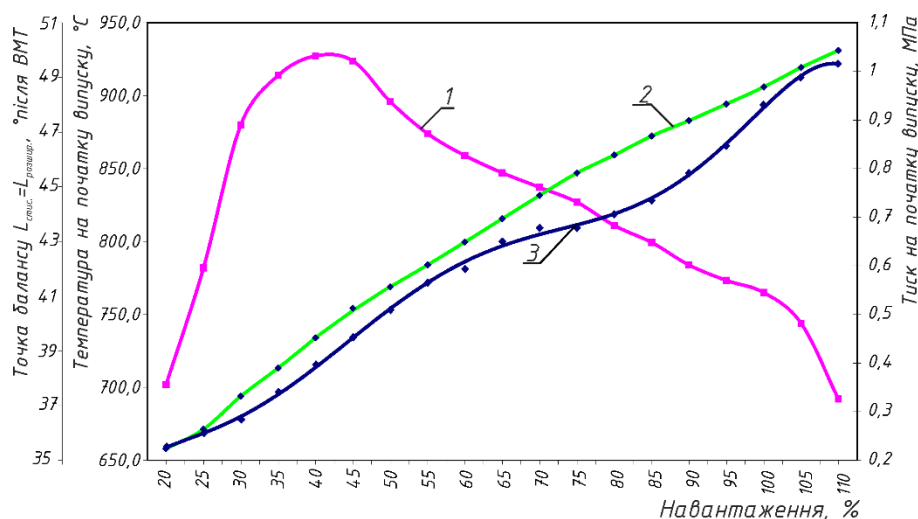


Рисунок 8 – Параметри процесу розширення; 1 – температура на початку випуску; 2 – тиск на початку випуску; 3 – точка балансу $L_{стис.} = L_{розшир.}$

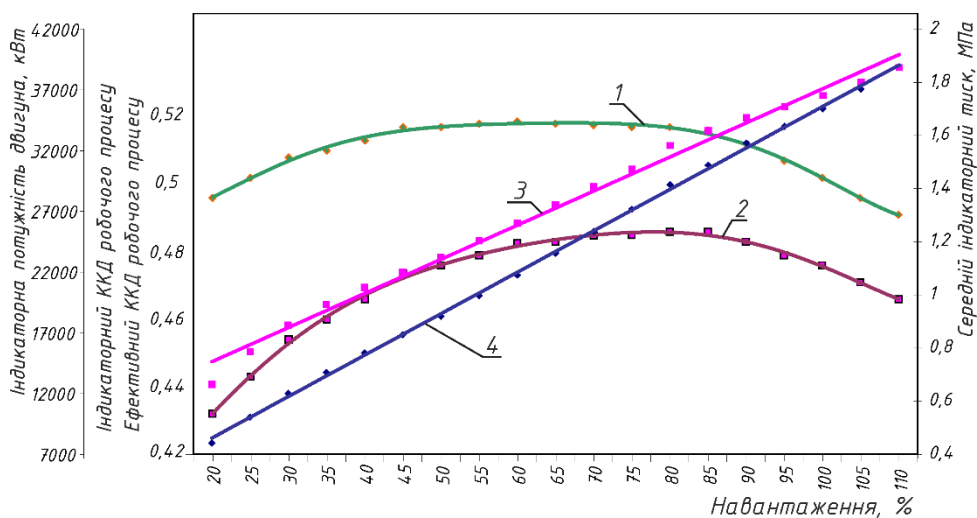


Рисунок 9 – Параметри робочого процесу; 1 – індикаторний ККД; 2 – ефективний ККД; 3 – середній індикаторний тиск; 4 – індикаторна потужність двигуна

Висновки. У формулярах більшості фірм виробників представлені графіки залежностей обмеженої кількості основних параметрів робочого процесу у вузьких межах навантаження двигуна, як правило, від 50% до 100% від MCR. Це пояснюється тим, що на час побудови двигунів не було особливої потреби в цій інформації оскільки більшість суден експлуатувалися на режимах, близьких до MCR, або була можливість щодо збільшення потужності двигуна, на час проведення індиціювання на номінальному навантаженні. Саме така обмеженість критеріїв для оцінки, а також вузькість діапазону їх представлення не дозволяє виконати більш ретельну і глибоку діагностику технічного стану двигуна на всьому можливому діапазоні робочих режимів, особливо, якщо спиратись лише на порівняння індикаторних діаграм отриманих в процесі експлуатації. Розширений перелік параметрів, отриманий з допомогою запропонованої авторами методики, та поданий у формі таблиці значно спрощує процедуру порівняння даних, дозволяє більш ґрунтовно оцінити технічний стан окремих елементів двигуна практично на всіх режимах його роботи.

Аналіз розширеного діапазону параметрів, показав, що на неспецифікаційних режимах роботи, таких як 20...35 та 100...110% від MCR характер їх змін має дуже складну функціональну залежність, що необхідно враховувати під час визначення технічного стану двигуна. Запропонована методика, її інформаційне та програмне забезпечення враховує ці особливості і дає можливість обслуговуючому персоналу проводити діагностичні роботи незалежно від навантажувально-швидкісного режиму двигуна.

ЛІТЕРАТУРА

1. MAN B&W K90MC-C6. Project guide. Camshaft controlled two-stroke engines. 6-th Edition, January 2009. – P. 21.
2. Правила технічної експлуатації морських і речкових суден. Дизелі. Нормативний документ морського транспорту України. Дата введення: 01.02.1997. – 63 с.
3. Sartini N. More haste less speed. Container ship focus. Lloyd's Register, September 2008. Issue 5. – P. 3.
4. Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи судового малообертового двигуна на режимах часткових навантажень Розвиток транспорту № 3(14), 2022. – С. 97-100.

5. Instruction book "Operation" for 46-98 MC/MC-C Engines. Hyundai Heavy Industries Co Ltd. Korea. – 427 p.
6. Білоусов Є.В., Марченко А.П., Рибальченко М.Є., Савчук В.П., Тулученко Г.Я. Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індиціювання робочого процесу на режимах відмінних від номінальних. Двигуни внутрішнього згоряння. №1/2022. – С 51-59.
7. Shop test report of marine low speed diesel engine type: Doosan Man B&W 8K90MC-C, Project name DANA 1671, test date 21.03.2008. – 68 p.
8. Ваншейдт В. А. Суднові двигуни внутрішнього згоряння. Суднобудування. 1977. – 392 с.
9. Белоусов Е.В. Топливные системы современных судовых дизелей: учебное пособие / Е.В. Белоусов. – Херсон: ХГМА, 2014. – 268 с.
10. Варбанец Р.А. Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации: дисс. докт. техн. наук / Р.А. Варбанец – Одесса: Одесская национальная морская академия, 2010, – 314 с.

REFERENCES

1. Man B&W K90MC-C6. Project guide. Camshaft controlled two-stroke engines. 6-th Edition, January 2009. – P. 21.
2. Rules for the technical operation of sea and river vessels. Diesels. Normative document of maritime transport of Ukraine. [Pravyla tekhnichnoyi ekspluatatsiyi mors'kykh i rechkovykh suden. Dyzeli. Normatyvnyy dokument mors'koho transportu Ukrayiny] Date of introduction: 01.02.1997. – 63 p.
3. Sartini N. More haste less speed. Container ship focus. Lloyd's Register, September 2008 Issue 5. – P. 3.
4. Rybalchenko M.Y., Bilousov I.V. Usage of numerical profiles of the work process to analyze the efficiency of the low-speed marine engine at partial loads [Vykorystannya chyslovykh profiliv robochoho protsesu dlya analizu efektyvnosti roboty sudnovoho maloobertovoho dvyhuna na rezhymakh chastkovykh navantazhen']. *Transport Development* No. 3 (14), 2022, pp. 97-100.
5. Instruction book "Operation" for 46-98 MC/MC-C Engines. Hyundai Heavy Industries Co Ltd. Korea. – 427 p.
6. Bilousov I.V., Marchenko A.P., Rybalchenko M.Y., Savchuk V.P., Tuluchenko H.Y. Development of methods for evaluating of technical condition of engines according to the results of indicating of working process on modes excellent from nomin. [Rozrobka metodiv otsinky tekhnichnoho stanu dvyhuniv za rezultatamy indytsiuvannya robochoho protsesu na rezhymakh vidminnykh vid nominalnykh]. *Internal combustion engines*. № 1/2022. pp. 51-59.
7. Shop test report of marine low speed diesel engine type: Doosan Man B&W 8K90MC-C, Project name DANA 1671, test date 21.03.2008, 68 p.
8. Wanscheidt V. A. Marine internal combustion engines. [Sudnovi dvyhuny vnutrishn'oho zhoryannya]. *Shipbuilding*. 1977. – 392 p.
9. Bilousov I.V. Fuel systems of modern marine diesels. Tutorial. [Palyvni systemy suchasnykh sudnovykh dyzeliv. Navchal'nyy posibnyk.] Kherson: KSMA, 2014. – 268 p.
10. Varbanets R.A. Diagnostic control of the working process of marine diesel engines in operation: diss. doc. tech. Scienc. / R.A. Varbanets [Diagnosticheskiy kontrol' rabochoho protsesa sudovykh dizeley v ekspluatatsii: diss. dokt. tekhn. nauk / R.A. Varbanets] – Odessa: Odessa National Maritime Academy, 2010, – 314 p.

USE OF NUMERICAL PROFILES OF THE WORKING PROCESS FOR THE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF WORK OF A SHIP'S LOW-SPEED ENGINE UNDER THE CONDITIONS OF THE CURRENT TENDENCIES TO REDUCE THE OPERATING SPEED OF VESSELS

During the operation of the marine main low-speed engines, according to the requirements of regulatory documentation, it is necessary to regularly check and evaluate a large number of parameters of the work process. Such requirements are necessary in order to monitor changes in the conditions of the main processes at separate stages of the engine's operating cycle, which makes it possible to detect any violations in its operation associated with a change in the technical condition of its individual elements, and the engine as a whole. This allows you to take the necessary operational measures at an early stage of problems in order to prevent their further development. This approach makes it possible to ensure optimal use of the engine and the overall efficiency of the installation as a whole, which is very important with the current trend of increasing fuel prices and increasing environmental requirements. However, in order to evaluate the changes in the parameters of the working process, it is necessary to compare the results of the planned performance test of the engine with the previous data and with the results obtained during the bench tests of the engine or reference charts and parameters obtained by calculation. Modern trends to decrease the operating speed of ships, associated with the efforts of shipowners to reduce costs for the fuel component, make it impossible to carry out performance test of main engine and diagnostics at nominal modes. As a result, there is a need for defined parameters of the work process at partial load modes that differ significantly from the nominal ones. To solve this problem, the authors proposed a methodology that allows analytically obtaining reference indicator diagrams for any mode of operation of the engine, based on the results of its bench tests. The analysis of such diagrams allows expanding the list of parameters characterizing the work process flow and revealing patterns of changes in these parameters. The study, the results of which are presented in this article, is devoted to the definition of an extended list of parameters of the work process in the entire range of operating modes of a marine low-speed engine, based on the analysis of calculated of indicator diagrams.

Key words: *marine low-speed engine, performance test, indicator diagram, work process parameters, work mode.*

Савчук В.П., Білоусов Є.В., Курносенко Д.В., Тулученко Г.Я.

ВПЛИВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ МАСЛЯНОЇ СИСТЕМИ ВИСОКООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ Д 246.4 НА ПАРАМЕТРИ ПУЛЬСАЦІЙ ТИСКУ МОТОРНОГО МАСЛА

Питання підвищення ефективності експлуатації суднових енергетичних установок на сьогодні, зокрема, лежать в площині підвищення експлуатаційної надійності двигунів внутрішнього згоряння. Це, в свою чергу, вимагає їх оснащення діагностичними комплексами безперервної дії, що виявляють несправності на ранніх етапах їх розвитку та порушення умов експлуатації, що викликані людським фактором. Безвідмовна робота суднових двигунів у значній мірі залежить від справності кривошипно-шатунного механізму (КШМ), втрата працездатності якого призводить до зупинки всієї енергетичної установки, а у випадку застосування їх як головних двигунів, то і до втрати руху судном. Складність геометричних (конструктивних) і експлуатаційних параметрів кривошипно-шатунного механізму та відсутність чітко визначених взаємозв'язків між ними ускладнює процес діагностування і призводить до необхідності використання непрямих методів діагностики. Це вимагає проведення досліджень впливу відхилення експлуатаційних показників елементів системи мащення та підшипникових вузлів на вихідний сигнал. На сьогодні найбільш ефективним методом таких досліджень є застосування спеціалізованих програмних комплексів, серед яких відзначимо GT-ISE від Gamma Technologies (США) та AVL, що розроблено Advanced Simulation Technologies (Австрія). Для виявлення взаємозв'язків між технічним станом елементів контуру подачі та очищення системи мащення дизельного двигуна Д246.4 проведено дослідження із використанням комп'ютерного моделювання. Вихідні параметри елементів досліджуваного контуру отримано в результаті стендових досліджень. Наведено детальний опис побудови комп'ютерної I-D моделі, параметри досліджуваних елементів та умови проведення дослідження. Результати проведених досліджень пульсації тиску та зміни продуктивності в об'єктах контуру подачі та очищення моторного масла вказують на те, що найбільш інформативним параметром для діагностування несправностей та відмов є частотний аналіз пульсації тиску на підставі моніторингу гармонік пульсації тиску. Працездатність масляного насоса та запобіжного клапана золотникового типу доцільно оцінювати за характером пульсації тиску, що відповідають гармонікам з порядком, рівним подвоєному числу кількості зубів шестерні масляного насоса. Подальші дослідження з метою визначення зміни працездатності підшипників ковзання необхідно проводити із урахуванням геометричних особливостей масляних каналів та відповідно підшипникових вузлів.

Ключові слова: високообертовий двигун, кривошипно-шатунний механізм, система мащення, масляний насос, запобіжний клапан, пульсації моторного масла, порядок гармоніки.

Постановка проблеми. Питанню підвищення експлуатаційної надійності двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) приділяється багато уваги, що, в першу чергу, викликано необхідністю забезпечення оптимальних значень показників безвідмовності (при мінімальних витратах на виробництво). Сучасний рівень надійності ДВЗ дозволяє цілком

задовольнити вимоги споживачів. Один із доцільних напрямків їх подальшого вдосконалення пов'язаний із мінімізацією впливу людського фактору. При розгляді даного питання для суднових ДВЗ, на наш погляд, найбільш ефективним напрямком підвищення ефективності експлуатації є запровадження нових систем функціонального та тестового діагностування. Деталі кривошипно-шатунного механізму (КШМ) є ресурсовизначальними, а підшипники ковзання є вузлами, безвідмовність яких прямо впливає на працездатність двигунів вцілому. Безпосередній моніторинг технічного стану підшипникових вузлів є ускладненим внаслідок особливостей конструкції КШМ та через функціонування датчиків при високих температурах та в агресивному середовищі. Найбільш ефективним для високооберткових двигунів (ВОД) є безперервний моніторинг та діагностування технічного стану як елементів системи мащення, так і підшипникових вузлів за допомогою аналізу пульсації моторного масла. Складність геометричних (конструктивних) і експлуатаційних параметрів КШМ та відсутність чітко визначених взаємозв'язків між ними переобтяжує процес діагностування та призводить до необхідності використання непрямих методів діагностики. Це вимагає проведення досліджень впливу відхилення експлуатаційних показників елементів системи мащення та підшипникових вузлів на вихідний сигнал. На сьогодні найбільш ефективним методом таких досліджень є застосування спеціалізованих програмних комплексів, таких як GT-ISE від Gamma Technologies (США) або AVL від Advanced Simulation Technologies (Австрія) [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі системи функціонального та тестового діагностування систем мащення ДВЗ все ще не мають узагальнених критеріїв обробки діагностичного параметра з метою визначення несправностей. Такі системи діагностування отримали обмежене застосування на практиці. Результати одного з перших досліджень впливу порушень функціонування підшипників ковзання ДВЗ, що змащуються під тиском, було представлено в роботі [3], де наведено аналіз пульсації тиску моторного масла з метою моніторингу несправностей у вузлах тертя, що пов'язані із системою мащення. Проведено спектральний аналіз, зокрема аналіз гармонік вихідного сигналу, його періодичних складових та дисперсії, досліджено вплив температури моторного масла. В роботах [4, 5, 6] виконано ґрунтовний аналіз впливу складових елементів контурів системи мащення та наведено найбільш інформативні діагностичні параметри і методики діагностування для однієї моделі бензинового ДВЗ. Недоліком використання запропонованих методик є відсутність їх апробації на інших моделях ДВЗ та відсутність врахування конструктивних особливостей системи мащення, кривошипно-шатунного механізму, властивостей моторного масла та чітких умов проведення діагностування. Сучасним універсальним інструментарієм при дослідженні параметрів гідравлічних систем є використання комп'ютерних моделей, що базуються на створенні 1D та 3D CFD (Computational Fluid Dynamics) моделей [7]. Розходження результатів комп'ютерного моделювання при використанні 1D моделі з результатами експериментальних досліджень становить не більше, ніж 10 %, а при використанні 3D моделей – до 6 % [7].

Постановка задачі. Результати теоретичних та експериментальних досліджень вказують на існування взаємного зв'язку між технічним станом елементів систем мащення і підшипникових вузлів, що змащуються під тиском, та характером пульсації моторного масла. Питання забезпечення експлуатаційної надійності та проведення безперервного моніторингу технічного стану підшипників ковзання ДВЗ є пріоритетним питанням, вирішення якого забезпечить підвищення ефективності експлуатації енергетичних установок та, відповідно, і економічної ефективності. Враховуючи конструктивні та експлуатаційні особливості сучасних високооберткових ДВЗ, постає завдання узагальнення критеріїв оцінювання їх впливу на параметри пульсації моторного масла. В даній роботі досліджується частина глобального завдання, а саме, виявлення частотних характеристик

елементів масляної системи, якими є маслоприймач, масляний насос, масляний фільтр, водо-масляний теплообмінник та запобіжний клапан, для діагностування їх несправностей.

Виклад основного матеріалу. При дослідженні доцільно розділити системи мащення ВОД на функціональні контури: подачі та очищення (і охолодження) моторного масла та розподілу моторного масла. Перший контур в класичних системах мащення ВОД складається з маслоприймача, масляного насоса шестеренного типу, що приводиться в дію від колінчастого валу, масляного фільтра, водо-масляного теплообмінника, перепускного та запобіжного клапанів.

Працездатність контуру подачі та очищення (і охолодження) моторного масла залежить від ступеня забруднення сітки маслоприймача, ступеня зносу масляного насоса, налаштування запобіжного клапана та його технічного стану, характеристик масляного фільтра, які залежать від його заводських налаштувань, характеристик фільтрувального елемента та ступеня забруднення. Також необхідно враховувати температуру та властивості моторного масла. Тому, при складанні структурних схем контурів систем мащення, необхідно володіти такими даними як

- в'язкісно-температурна характеристика (ВТХ) моторного масла;
- характеристики масляного насоса;
- конструктивні та гідравлічні параметри масляного фільтра;
- характеристики запобіжного клапана;
- геометрія масляних каналів.

Ці дані характеризують властивості всіх складових частин контурів систем мащення.

Дослідження гідравлічних характеристик елементів контуру подачі та очищення моторного масла здійснені на прикладі стаціонарного ВОД Д246.4, що входить до складу дизель-генераторної установки [8]. Для моделювання масляної системи використовувався програмний комплекс GT-ISE. Авторами розроблена 1-D CFD модель системи мащення ВОД Д246.4. Основною метою моделювання систем мащення є прогнозування витрати та розподілу тиску по всій системі. При виконанні досліджень основна увага приділялася характеристикам маслоприймача, масляного насоса, масляного фільтра, запобіжного клапана та геометрії масляних каналів, оскільки здійснювалось моделювання лише одного контуру. Характеристики деяких елементів системи мащення було визначено за допомогою стендових випробувань [9]. Моделювання масляних каналів, трубопроводів та інших елементів гідравлічних систем здійснювалось за допомогою компонентів бібліотеки *Flow*. Найбільш вживаними елементами цієї бібліотеки є *PipeRound*, *MiterBend*, *FlowSplit-General* та *FlowSplitTRight*.

В модельованій системі моторне масло після масляного насоса рухається по відвідному патрубку до просвердленого каналу в блоці циліндрів. Даний канал під кутом 90° змінює свій напрямок та подає масло до корпусу масляного фільтра (рис. 1а). Вхідний масляний канал у корпусі виконано під кутом близько 60° до горизонтальної площини (рис. 1б). По середині даного каналу має місце відгалуження, по якому масло надходить до запобіжного клапана та частина його скидається до масляного картера. Все інше моторне масло надходить до масляного фільтра, а далі до головної масляної магістралі та до підшипників колінчастого валу, розподільного валу та газотурбонагнітача. *Маслоприймач* складається із зігнутої трубки внутрішнім діаметром 19 мм, довжиною 240 мм, з одного кінця якої встановлено фільтрувальну сітку, а з іншого – фланець, яким деталь кріпиться до масляного насоса.

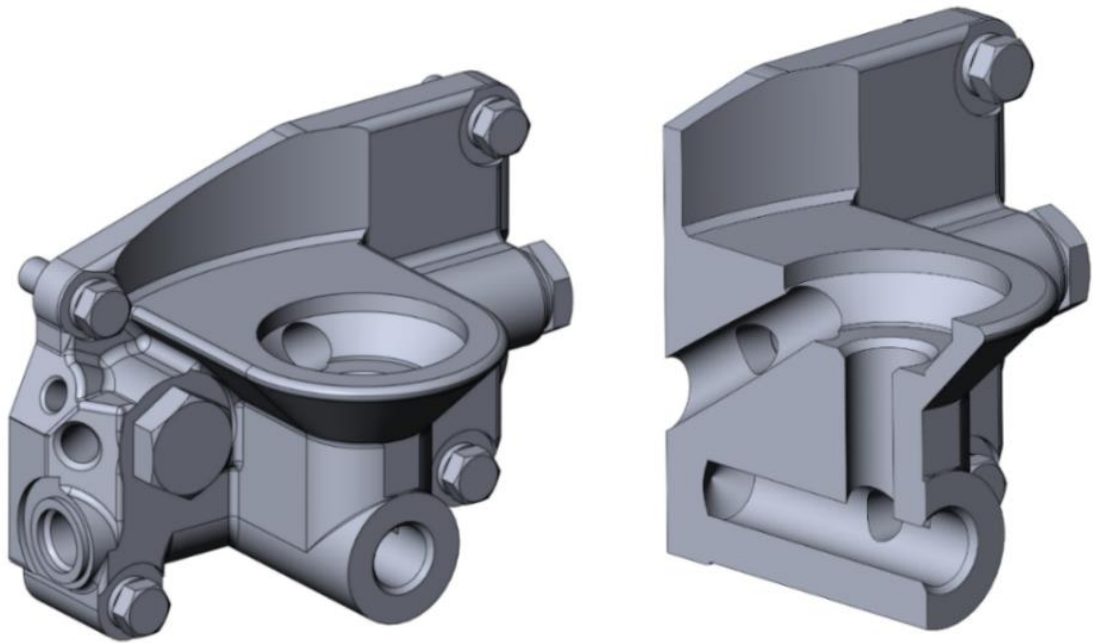


Рисунок 1 – Корпус масляного фільтра (а) та розташування масляних каналів

Таблиця 1 – Позначення та характеристика трубопроводів та масляних каналів системи мащення

Назва елемента	Позначення елемента	Діаметр на вході/виході	Довжина	Кут
Маслоприймач	PumpInlet	19/19	240	–
	Flange1	22/22	–	90
Відвідний патрубок	PumpOutlet	14/14	100	–
Канал підвідний в блоці циліндрів	BlockHole1	14/14	75	–
	CornerBlock1	14	14	90
Кут зміни напрямку руху масла між блоком циліндрів та корпусом масляного фільтра	Corner1	15,11	16	147,7
Вхідний канал в корпусі масляного фільтра	Filter Inlet	16/16	50	–
Канал подачі масла до запобіжного клапана	Tright1-1	15,1	50	–

Для моделювання характеристик всмоктувальної та напірної магістралей складено таблицю параметрів її елементів (табл. 1).

Для моделювання характеристик *масляного насоса* використовується об'єкт **Pump-ExternalGear**, призначенням якого є визначення миттєвих пульсацій продуктивності шестеренного насоса зовнішнього зачеплення. Пульсація ідеального потоку розраховується на основі геометрії насоса та частоти обертання, використовуючи рівняння, викладені в [10]. Основні параметри зубчастого зачеплення масляного насоса двигуна Д246.4 приведено в табл. 2.

Масляні фільтри та охолоджувачі можуть бути змодельовані різними способами:

- шляхом накладання експериментальної кривої перепаду тиску Δp в залежності від витрати Q ;
- шляхом використання безрозмірних експериментальних даних перепаду тиску в залежності від витрати;
- шляхом визначення коефіцієнту втрат C_p в залежності від числа Рейнольдса Re ;
- шляхом налаштування геометричної моделі фільтра з використанням параметрів трубопроводів, розгалужень та отворів.

Моделювання масляного фільтра доцільно здійснювати з урахуванням його геометричних особливостей.

Таблиця 2 – Основні параметри зубчастого зачеплення масляного насоса 240-1400010-Б-01

Параметр	Значення
Передаточне відношення i	1
Модуль t , мм	3,0
Міжцентрова відстань a_w , мм	35,75
Кут зачеплення α_w , град	29,84
Коефіцієнт перекриття ε	1,23
Кількість зубів шестерні/колеса z_1/z_2	11/11
Коефіцієнт зміщення шестерні/колеса x	0,57
Середній діаметр d , мм	33,0
Зовнішній діаметр d_a , мм	42,26
Діаметр впадин d_f , мм	27,74
Основний діаметр кола d_b , мм	31,01
Початковий діаметр d_w , мм	37,75
Ширина зуба b , мм	28,0

Масляний фільтр можна розділити на 3 об'єми, які в GT-SUITE розглядаються як окремі частини гідравлічного потоку: вхідний, зовнішній та внутрішній об'єми (рис. 2). Вхідний об'єм (об'єм масла в корпусі масляного фільтра на лінії подачі) розглядається як частина гідравлічного потоку, що з'єднаний із зовнішнім об'ємом фільтра через з'єднання [OrificeConn](#).

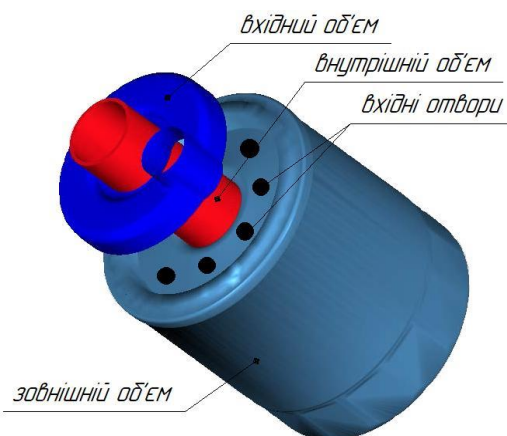


Рисунок 2 – Об'єми фільтра типу «spin-on», що враховуються при його моделюванні

Цей елемент визначає параметри *вхідних отворів* і може бути визначений еквівалентним їх діаметром, який буде відтворювати однакову загальну площу поперечного перерізу всіх вхідних отворів до *зовнішнього об'єму*. Також можна визначити діаметр одного з вхідних отворів, якщо їх кількість визначено параметром **Number of Holes** з опцією **OrificeConn**.

В моделі визначення падіння тиску в масляному фільтрі здійснюється за допомогою шаблону **PressureLossConn**. В даному двигунові застосовують масляні фільтри декількох виробників, які дещо відрізняються за розмірами та характеристиками. Одним із таких фільтрів є масляний фільтр М-019 виробництва компанії Промбізнес (Україна). Геометричні параметри масляного фільтра М-019 представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Геометричні параметри масляного фільтра М-019

Параметр	Значення
Діаметр/висота фільтра, мм	98/128
Зовнішній об'єм, см ³	244
Внутрішній об'єм, см ³	879
Вхідний об'єм, см ³	20
Кількість вхідних отворів	8
Діаметр вхідних отворів, мм	7

Дослідження опору фільтруючих елементів доцільно проводити з використанням спеціалізованих стендів. Опис стенда та результати досліджень характеристик фільтра М-019 та його аналогів, що використовуються для даного двигуна, представлено в роботах [11, 12]. Отримані результати застосовано для моделювання гідравлічного опору масляного фільтра в досліджуваній системі мащення.

Більш складним при моделюванні є визначення характеристик запобіжного клапана. Найбільш розповсюдженими типами запобіжних клапанів в системах мащення тронкових ДВЗ є поршневі клапани. Моделювання їх дії в гідравлічних та пневматичних системах здійснюється шляхом представлення властивостей об'єктами, що визначають:

- характеристику циліндричних пружин стискування, які діють на поршень;
- масу та властивості контакту поршня та посадкової поверхні клапана;
- геометричні властивості напірного та дренажного отворів клапана.

Для представлення властивостей різноманітних клапанів в ГТ створено бібліотеку шаблонів елементів пневматичних та гідравлічних систем. Запобіжний клапан в системі мащення двигунів Д245 (та їх модифікацій) виготовлено в корпусі масляного фільтра. В системі клапан встановлено безпосередньо після масляного насоса, що забезпечує можливість перепускати частину масла до масляного картера двигуна. Таким чином, на номінальному режимі навантаження на прогрітому двигунові підтримується нормоване значення тиску в головній масляній магістралі (0,25...0,35 МПа). Конструктивно клапан складається із безпосередньо запірною елемента – поршня (рис. 3), що перекриває зливний канал, циліндричної пружини стиснення, що забезпечує необхідне зусилля відкриття клапана та регульовального гвинта, яким здійснюється налаштування нормативного значення тиску в головній масляній магістралі.

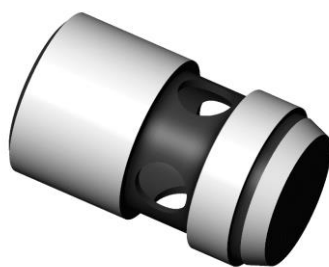


Рисунок 3 – Поршень запобіжного клапана

При моделюванні властивостей пружного елемента (циліндричної пружини), що контролює переміщення поршня клапана, зазвичай застосовується шаблон **FluidPistonAndSpring**. Цей об'єкт використовується для моделювання взаємодії між гідравлічним потоком і механічною системою. Традиційно він використовується в гідравлічних та пневматичних системах. Конкретно цей шаблон моделює наступне:

- зусилля на приєднану масу внаслідок дії тиску в камері;
- зміну об'єму камери внаслідок витіснення маси;
- силу пружини.

Робоча діаграма та загальний вигляд пружини клапана приведено на рис. 4.

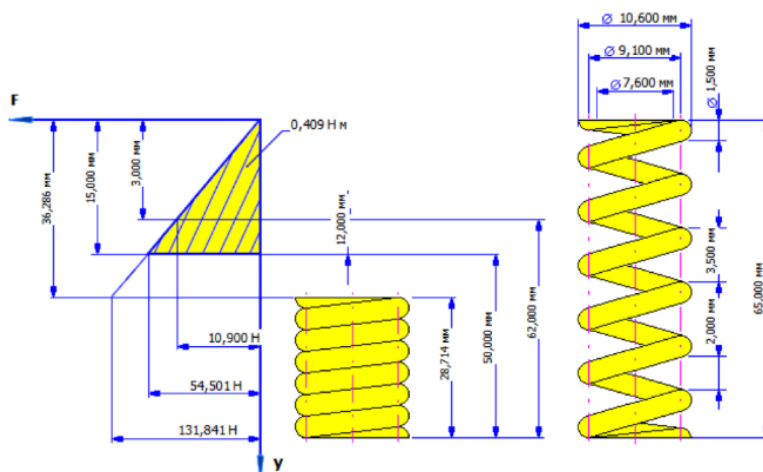


Рисунок 4 – Робоча діаграма пружини запобіжного клапана

Таблиця 4 – Параметри циліндричної пружини запобіжного клапана

Параметр	Значення
Довжина пружини у вільному стані L_0 , мм	65,0
Діаметр дроту d , мм	1,5
Крок пружини t , мм	3,5
Зовнішній діаметр дроту D_1 , мм	10,6
Внутрішній діаметр пружини D_2 , мм	7,6
Індекс жорсткості пружини c	6,067
Кількість робочих витків n	18,143
Робоче навантаження F , Н	36,334
Жорсткість пружини k , Н/мм	3,633

Призначення властивостей маси рухомих елементів клапана здійснюється за допомогою шаблону MassWithContacts, що моделює 1D масу, а також зупинку/контакт як в

прямому, так і в зворотному напрямках руху клапана. Необхідно звернути увагу на те, що це складений шаблон GT, який представляє собою групу «примітивних» шаблонів, об'єднаних в один шаблон. Для заповнення шаблону вказуємо інформацію про:

- масу запірного елемента;
- початкове положення Initial Position та початкову швидкість запірного елемента Initial Velocity;
- зазор між корпусом та клапаном в крайніх його положеннях Lower Gap when Mass at Zero Position/ Upper Gap when Mass at Zero Position;
- параметр жорсткості контакту Maximum Contact Stiffness. У випадку вибору за замовчуванням даного параметра, система приймає значення жорсткості контакту 10^9 Н/м;
- товщину контактної пари Penetration for Max Stiffness, параметри жорсткості в якому зростають від 0 до вказаного значення;
- коефіцієнт демпфування контакту Contact Damping Coefficient;
- наявність демпфування, якщо зазор менший за встановлений значення Apply Damping if Gap Less Than.

Для моделювання геометричних особливостей золотникового клапана застосовується шаблон SpoolCoverHole. Даний шаблон обчислює зміну площі потоку як функцію зміщення золотника, сили тиску на золотник та перерозподілу об'єму приєднаних компонентів потоку внаслідок переміщення золотника. Геометричні параметри шаблону призначають згідно рис. 5. Сама маса золотника в даному шаблоні не моделюється. Механічний порт цього шаблону повинен бути з'єднаний з масою (Mass або MassWithContacts), яка представляє рух золотника.

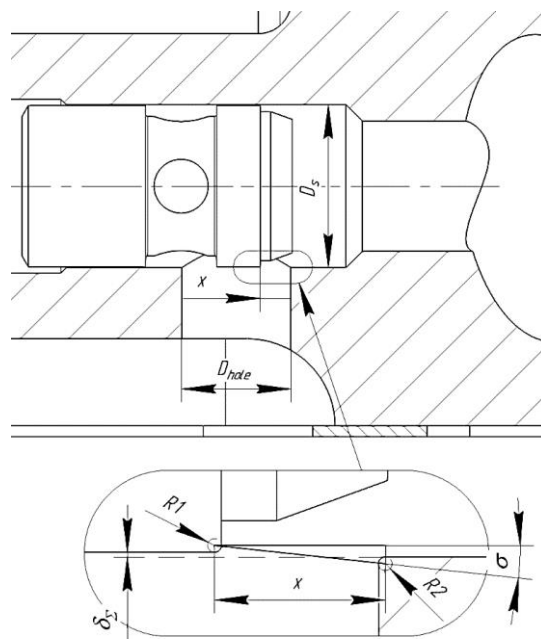


Рисунок 5 – Поперечний переріз золотника клапана та його показники

Конфігурація шаблону SpoolCoverHole вимагає, щоб порт 1 був приєднаний до елемента FlowSplit, що представляє об'єм всередині золотника (елемент ValveIn-1). Порт 2 повинен бути підключений до елемента FlowSplit, що представляє об'єм потоку поза золотником (елемент ValveOut) (рис. 6). Об'єми потоків призначаємо відповідно до положення маси на початку моделювання. Порт 3 з'єднаний з шаблоном MassWithContacts, що представляє механічну складову клапана.

Для моделювання опору в напірній магістралі системи мащення доцільно ввести додатковий елемент, що створює гідравлічний опір, наприклад OrificeConn. В даному дослідженні цей елемент має назву Valve-1, його встановлено поза елементами, що моделюють масляний фільтр. Об'єкти, які були визначено, розміщено на карті у відповідному порядку та з'єднано їх разом, як показано на рис. 6.

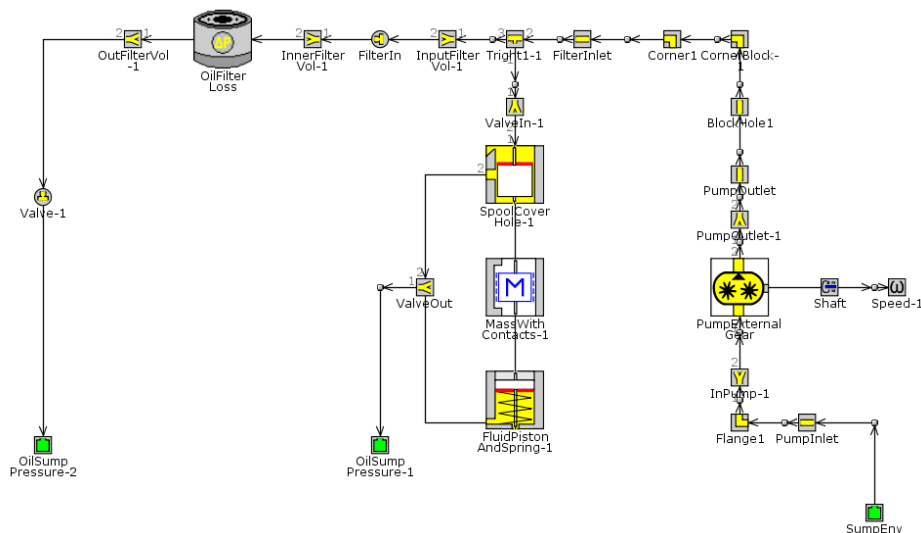


Рисунок 6 – 1D мапа контуру подачі та очищення системи мащення

Значення всіх змінних параметрів, які було створено, представлено у вкладці **Case Setup** рис. 7. Моделювання гідравлічного контуру масляної системи здійснювалось при різних температурах моторного масла, частоті обертання вхідного валу масляного насоса, різних налаштуваннях запобіжного клапана. Головним завданням такого дослідження є визначення діагностичних показників технічного стану масляної системи та місць доцільного встановлення датчиків тиску.

Parameter	Unit	Description	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Case On/Off		Check Box to Turn Case On	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Case Label		Unique Text for Plot Legends					
DX	mm	Pipe** Discretization Length	10 ...	10 ...	10 ...	10 ...	10 ...
OIL-TEMP	C	Oil Temperature	40 ...	60 ...	85 ...	100 ...	110 ...
Diam	mm	Hole Diameter	10 ...	10 ...	10 ...	10 ...	10 ...
speed	RPM	Imposed Speed	2500 ...	2500 ...	2500 ...	2500 ...	2500 ...
PrForce	N	Precompression Force with Mass at Z...	12 ...	12 ...	12 ...	12 ...	12 ...
Eff	fraction	Volumetric Efficiency	0.75 ...	0.75 ...	0.75 ...	0.75 ...	0.75 ...

Рисунок 7 – Додавання додаткових режимів моделювання режиму роботи системи мащення

Всі результати моделювання представлені за один повний цикл роботи масляного насоса. Оскільки дослідження при різних температурах моторного масла демонструють

схожість результатів, тому для визначення головних діагностичних параметрів надано результати моделювання для випадку Case 4, що має задану температуру моторного масла 100 °С.

На рис. 8 представлено залежності витрати моторного масла, що створюється безпосередньо насосом, через масляний канал (об'єкт FilterInlet) та що зливається через запобіжний клапан (об'єкт SpoolCoverHole-1). Наявність подвійного піку залежності витрати масла через масляний канал перед масляним фільтром вказує на те, що на характер пульсацій здійснює вплив запобіжний клапан. Його синхронна робота в системі призводить до перепуску частини моторного масла на піках продуктивності масляного насоса. Частотний аналіз результатів моделювання тиску на об'єкті FilterInlet вказує на те (рис. 9), що максимальна амплітуда тиску відповідає порядку гармоніки, що становить подвійну кількість зубів шестерні масляного насоса (22-й порядок).

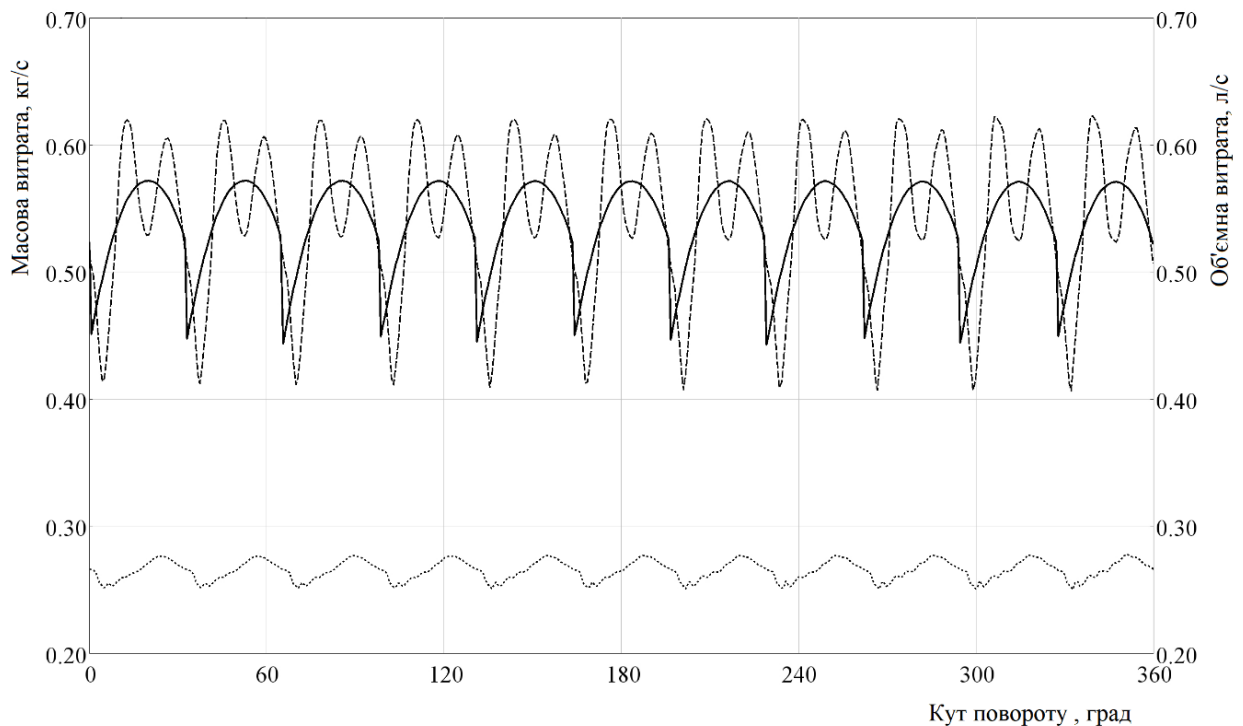


Рисунок 8 – Зміна витрати моторного масла, що продукується масляним насосом (кг/с)
—— в каналі перед масляним фільтром (об'єкт FilterInlet, кг/с); ----- та через запобіжний клапан (л/с); - - - - - в залежності від кута повороту вхідного валу масляного насоса

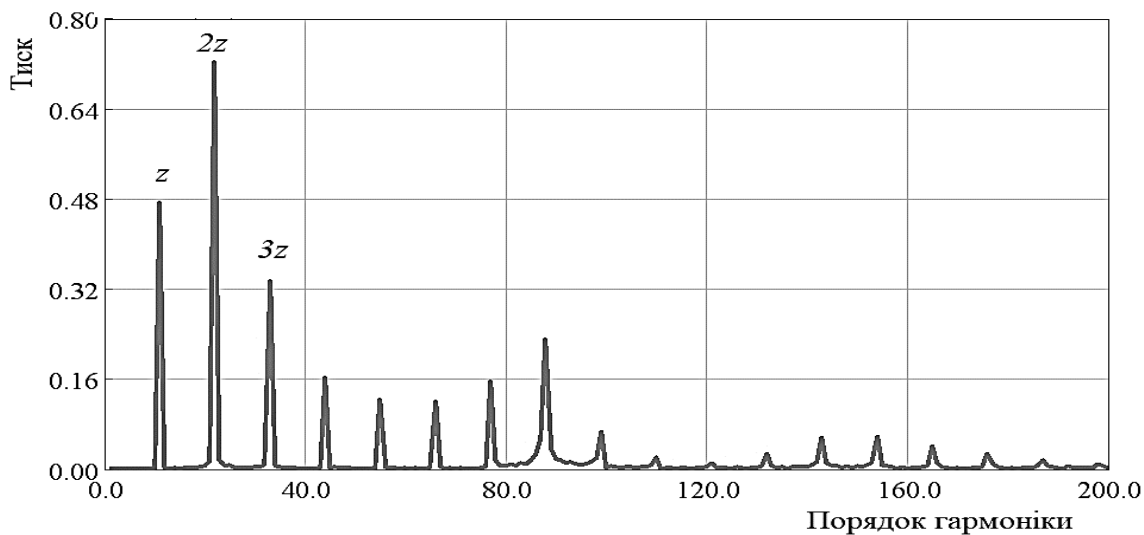


Рисунок 9 – Частотний аналіз пульсацій тиску в системі (об'єкт FilterInlet)

Результати дослідження витрати моторного масла через різні елементи контуру вказують на те, що, найбільша амплітуда досліджуваного показника має місце для об'єкта PumpOutlet, таким чином доцільним місцем встановлення діагностичних датчиків тиску, метою яких є визначення технічного стану масляного насоса та запобіжного клапана, є гідравлічна лінія перед масляним фільтром. При віддаленні від масляного насоса, амплітуда витрати та й, відповідно, амплітуда пульсацій тиску зменшуються та можуть стати неінформативним показником при діагностуванні досліджуваного контуру.

У випадку заклинювання золотника запобіжного клапана, залежності витрати моторного масла представлено на рис. 10, що демонструють стохастичний характер даного параметра. Дослідження спектра пульсацій тиску на об'єкті PumpOutlet вказує на відсутність певної стабільної гармоніки для застосування при діагностуванні цієї відмови системи мащення (рис. 11).

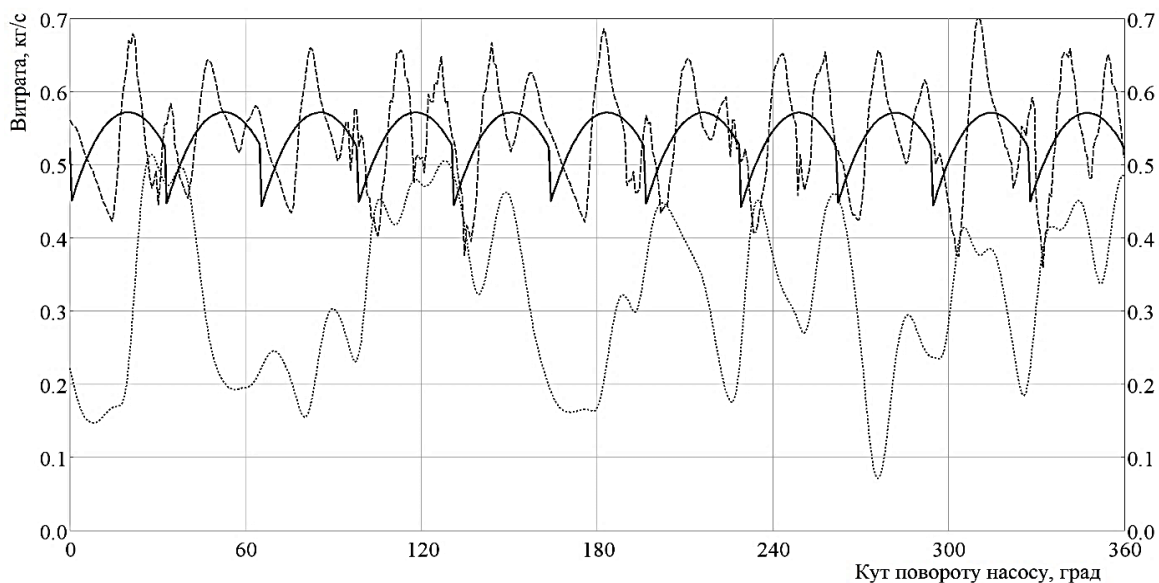


Рисунок 10 – Зміна витрати моторного масла, що продукується масляним насосом (кг/с) — в каналі перед масляним фільтром (об'єкт FilterInlet, кг/с); ----- та через запобіжний

клапан (л/с); - - - в залежності від кута повороту вхідного валу масляного насоса для випадку заклинювання золотника запобіжного клапана у відкритому положенні.

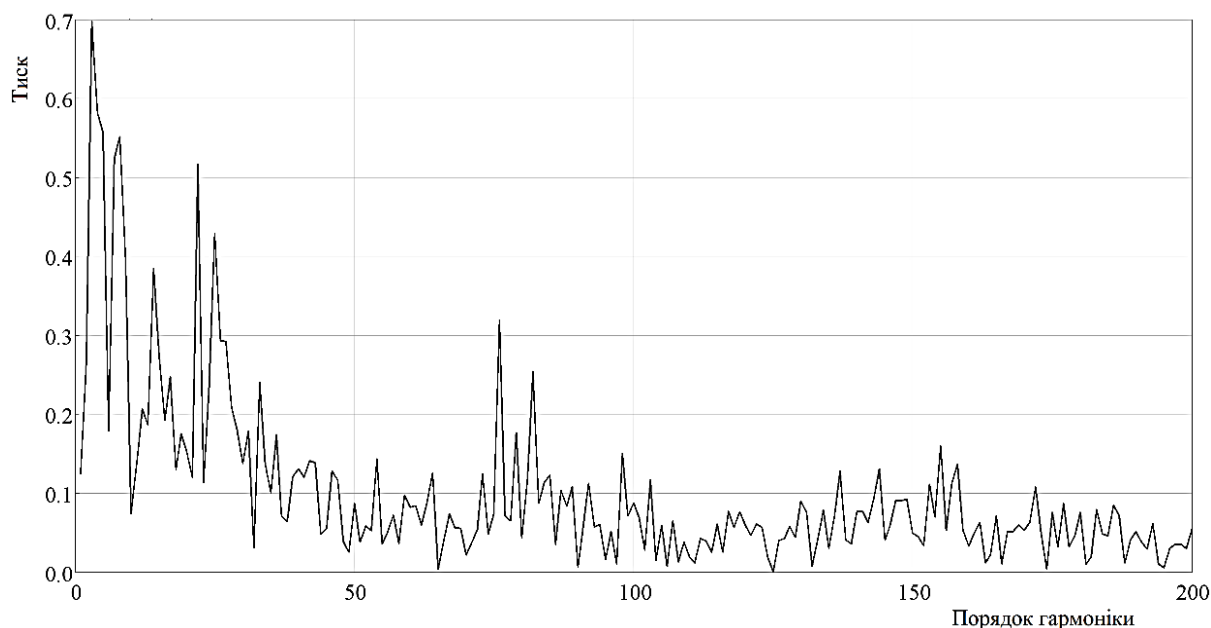


Рисунок 11 – Частотний аналіз пульсацій тиску в системі (об'єкт FilterInlet) для випадку заклинювання золотника запобіжного клапана у відкритому положенні

Висновки та перспективи подальших досліджень. Дослідження пульсацій тиску та зміни продуктивності в об'єктах контуру подачі та очищення моторного масла на прикладі дизельного двигуна Д246.4 дозволяє зробити наступні висновки:

- частотний аналіз пульсацій тиску є найбільш дієвим методом непрямого діагностування несправностей та відмов елементів системи мащення;

- для визначення працездатності масляного насоса та запобіжного клапана золотникового типу доцільно здійснювати безперервний моніторинг пульсацій тиску, що відповідають гармонікам порядку подвоєного числа кількості зубів масляного насоса;

- найбільш доцільним місцем встановлення датчика тиску є гідравлічна лінія між масляним насосом та фільтром.

З метою визначення зміни працездатності підшипників ковзання КШМ ВОД подальші дослідження необхідно проводити із урахуванням геометричних особливостей масляних каналів та відповідно підшипникових вузлів. Дослідження пульсацій моторного масла необхідно провести із урахуванням впливу забруднень маслоприймача, масляного фільтра, зносу підшипникових вузлів з метою виявлення їх впливу на параметри спектра.

ЛІТЕРАТУРА

1. Савчук, В. П., Кухаренко, Г. М., Курносенко, Д. В., Котов, А. І. Дослідження впливу конструктивних та експлуатаційних факторів системи мащення високообертових судових двигунів внутрішнього згоряння на характер пульсацій тиску масла. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: Міжнар. наук.-практ. конференція. Херсон 08-10 вересня 2020 р. Херсон, 2020, с. 208-211.

2. Soltani, R., Ghorbanian, J. A New Approach to Flow Network Analysis of an Engine Lubrication System. The Journal of Engine Research, 18, 2010, pp. 12-19.
3. Seth, B., Field, N. Oil Pressure Signatures for Engine Lubrication System Monitoring. SAE Technical Paper, Letter 840063, 1984, pp. 364-371. <https://doi.org/10.4271/840063>.
4. Гриценко, А. В. Разработка методов тестового диагностирования работоспособности систем питания и смазки двигателей внутреннего сгорания (экспериментальная и производственная реализация на примере ДВС автомобилей): дисс. докт. техн. наук, Челябинск, 2014г. 216 с.
5. Гриценко, А. В. Диагностирование подшипников кривошипно шатунного механизма двигателя внутреннего сгорания по параметрам пульсации давления в центральной масляной магистрали: автореферат дисс. канд. техн. наук, ЧГАУ, Челябинск, 2009г. 23 с.
6. Gritsenko, A. V., Zadorozhnaya, E. A., Shepelev, V. D. Diagnostics of Friction Bearings by Oil Pressure Parameters During Cycle-By-Cycle Loading. Tribology in Industry, 2. 2018. pp. 300-310. doi: 10.24874/ti.2018.40.02.13.
7. Dhar, Sujan, et al. Transient, Three Dimensional CFD Model of the Complete Engine Lubrication System. SAE International Journal of Engines, vol. 9, issue 3. 2022. pp. 54-62.
8. Двигатели Д-246.1, Д-246.2, Д-246.3, Д-246.4: [руководство по эксплуатации]. 2010, Минск, 104 с.
9. Курносенко, Д. В., Савчук, В. П., Білоусов, Є. В., Дзигар, А. К., Котов, А. І. Стенд для дослідження параметрів елементів систем мащення високооберткових двигунів внутрішнього згоряння. Двигуни внутрішнього згоряння, № 2, 2021р., с. 73-79.
10. Manring, N. D., Kasaragadda, S. V. The Theoretical Flow Ripple of an External Gear Pump, Transactions of the ASME. 2003. pp. 396-404.
11. Курносенко, Д. В., Савчук, В. П., Білоусов, Є. В. Дослідження впливу характеристик масляних фільтрів типу «spin-on» на робочі параметри масляної системи. Розвиток транспорту, № 4(11), 2021р. с. 52-64. <https://doi.org/10.33082/td.2021.4-11.05>
12. Курносенко, Д. В., Савчук, В. П., Акімов, О. В., Котов, А. І. Призначення параметрів повнопоточних масляних фільтрів типу «spin-on» при комп'ютерному моделюванні систем мащення двигунів внутрішнього згоряння. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: Міжнар. наук.-практ. конф., 06-08 вересня 2021 р. Херсон, 2021, с. 266-269.

Volodymyr Savchuk, Yevhen Bilousov, Daria Kurnosenko, Halyna Tuluchenko
THE INFLUENCE OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE ELEMENTS OF THE OIL SYSTEM OF THE D246.4 HIGH SPEED DIESEL ON THE PARAMETERS OF PULSATION OF THE ENGINE OIL PRESSURE

The issue of increasing the efficiency of ship power plant operation today, in particular, lies in the area of increasing the operational reliability of internal combustion engines. This, in turn, requires them to be equipped with continuous diagnostic systems in order to be able to detect malfunctions at early stages and detect violations of operating conditions caused by the human factor. The trouble-free operation of ship engines largely depends on the serviceability of the crank-and-connecting mechanism (CCM), the loss of which leads to the shutdown of the entire power plant, and in the case of its use as the main engine, then to the loss of movement of the ship. The complexity of the geometric (constructive) and operational parameters of the crank mechanism and the lack of clearly defined relationships between them complicates the diagnosis process and leads to the need to use non-direct diagnostic methods. This requires conducting research on the impact of deviations in the performance indicators of lubrication system elements and bearing units on the output signal. Today, the most effective method of such research is the use of specialized software packages, among which GT-ISE from Gamma Technologies (USA) and AVL from Advanced Simulation Technologies (Austria). In order to identify the interrelationships between the technical conditions of the elements of the cleaning supply circuit of the lubrication

system of the D246.4 diesel engine, a study was conducted using computer modeling. We used the results of bench research as the initial parameters of the elements of the studied circuit. A detailed description of the construction of the computer 1-D model, the parameters of the studied elements and the conditions of the research are given. The results of the conducted studies of pressure pulsations and changes in productivity in the objects of the engine oil supply and cleaning circuit indicate that the most informative parameter for diagnosing malfunctions and failures is the frequency analysis of pressure pulsations based on the monitoring of harmonics of pressure pulsations. The performance of the oil pump and spool-type safety valve should be evaluated by the nature of pressure pulsations corresponding to harmonics with an order equal to twice the number of gear teeth of the oil pump. Further research in order to determine changes in the performance of sliding bearings must be carried out taking into account the geometric features of the oil channels and, accordingly, the bearing units.

Key words: high-speed engine, crank mechanism, lubrication system, oil pump, safety valve, engine oil pulsations, order of harmonics.

УДК 629.541.4

doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.08

Сьомін О.А., Кукалець Л.М.

ВРАХУВАННЯ КРИТЕРІЮ КУПІВЕЛЬНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА ОНОВЛЕННІ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН ВНУТРІШНЬОГО І ЗМІШАНОГО ПЛАВАННЯ

У статті розглянуто можливість вдосконалення існуючого методу визначення головних параметрів та техніко-експлуатаційних показників при проектуванні нових або оновленні існуючих пасажирських суден внутрішнього та змішаного плавання (ПСВЗП). Запропоновано визначення критерію купівельної спроможності потенційних пасажирів. Обґрунтовано доцільність врахування критерію при проектуванні та оновленні ПСВЗП. Наведено результати визначення основних елементів та категорії комфортабельності судна в залежності від рівня купівельної спроможності пасажирів.

Ключові слова. Пасажирське судно, головні елементи, розміри, характеристики, економічні показники, пасажирів, купівельна спроможність, комерційна ефективність.

Постановка проблеми. Вирішення завдання проектування пасажирського судна, як правило, завершується оцінкою економічних та комерційних параметрів судна: вартості побудови чи оновлення, собівартості утримання та інших. Отримані дані можуть бути вище верхньої межі діапазону купівельної спроможності потенційних пасажирів, що призводить до необхідності перерахунків основних елементів судна. Це може негативно вплинути на групу вихідних даних, необхідних туроператору (замовнику), а саме: заданий рівень комфортабельності, пасажиромісткість, швидкість. Зазначені зміни вихідних даних, у свою чергу, можуть викликати комерційну невідповідність соціальної категорії майбутніх пасажирів з отриманими техніко-експлуатаційними показниками, що призведе до отримання проекту судна, який після будівництва виявиться комерційно неуспішним. Крім того, при розробці проекту побудови або оновлення судна проєктанти зачасту стикаються

з відсутністю необхідних вхідних даних для проектування у зв'язку з тим, що судно для даного району проектується вперше, або з наявними морально застарілими суднами, які вже не підходять у якості прототипу. Таким чином, при розробці проекту нового судна або оновленні існуючого, щоб уникнути конструкторських і, надалі, економічних прорахунків, необхідно враховувати первинні неподільні фактори, якими оперує потенційна цільова аудиторія туроператора (замовника). Таким базовим фактором може бути рівень купівельної спроможності цільової соціальної групи майбутніх клієнтів-пасажирів.

Мета статті. Вдосконалити існуючий метод визначення основних елементів і техніко-експлуатаційних показників нового чи оновлюваного ПСВЗП, описаний в [1], з врахуванням критерію купівельної спроможності потенційних пасажирів.

Аналіз досліджень та публікацій. Питання проектування (побудови) та оновлення суден пасажирського флоту змішаного та внутрішнього плавання розглядали такі фахівці, як Єгоров Г.В., Ільницький І.О., Калугін Я.В. [2,3], Єгоров О.Г. [4,5], Шибаєв А.Г., Боровик С.С., Михайлова Ю.В. [6] та інші. Істотний внесок у розгляд питань оновлення пасажирського круїзного флоту ВЗП зробив Єгоров Г.В. В своїх працях він навів базові принципи великих переобладнань суден змішаного плавання, надав приклади модернізації та будівництва річкових круїзних суден на початку ХХІ ст. Ним було обґрунтовано параметричний ряд сучасних круїзних суден для ВВШ [2], запропоновано стратегію модернізації пасажирських суден та побудови нових суден з використанням елементів суден-донорів [3]. Єгоров О.Г. у своїх статтях проаналізував оцінку впливу старіння пасажирського флоту та модернізацій на пасажиромісткість річкових круїзних суден, а також розглянув особливості компоновання пасажирського та службових блоків на таких судах [4,5]. Шибаєв А.Г. у статті [6] розглянув стратегію ефективності модернізації пасажирських суден шляхом оптимального розподілу коштів судовласника з метою максимізації прибутку. Ним було виділено групи робіт з модернізації судна, а також корисність від їх виконання: безпека пасажирів, технічна справність судна, комфортність та збільшення пасажиромісткості тощо. Але, відповідно робіт інших науковців та інженерів [1,4], збільшення пасажиромісткості судна при модернізації навпаки призводить до зниження його комфортабельності.

Також, авторами статті у своїх попередніх працях були визначені фактори, що впливають на якість туристичного продукту на внутрішньому водному транспорті, розроблені методи проектування та експлуатації ПСВЗП за критерієм комфортабельності, способи оцінки критерія комфортабельності суден [1], ідентифіковані основні напрями модернізації таких суден ВЗП з визначенням основних та супутніх робіт [7].

Слід зауважити, що на сьогодні, розгляд стратегій проектування та оновлення ПСВЗП, а саме визначення основних елементів та категорії комфортабельності судна в залежності від рівня купівельної спроможності пасажирів не проводилось, що визначає новизну та винятковість даних досліджень.

Викладення основного матеріалу. Виконуючи огляд ПСВЗП, побудованих у період 2015-2022 рр. [4] можна відзначити повсюдне зростання площ пасажирських кают приблизно на 15-25% порівняно з суднами, побудованими у період 2000-2015 рр. Аналогічна тенденція існує під час виконання оновлень пасажирських суден у обсягах модернізацій, конверсій тощо. [4]. Таким чином, зростає частка площі пасажирських кают у загальній площі судна, що призводить до зменшення загальної пасажиромісткості судна до 50% після процесу оновлення або зростання величини головних елементів побудованого нового судна. Обидві обставини збільшують собівартість утримання судна, що спричиняє підвищення вартості круїзу. Це, в свою чергу, призводить до того, що судно найчастіше виявляється поза верхньої межі діапазону купівельної спроможності цільової групи пасажирів, і стає ефективним лише за умови стану ринку, наближеного до високого [1].

Відбувається зменшення населення судна та загального пасажирообігу, а саме судно випадає з масового сектора круїзної індустрії і стає ексклюзивним, не володіючи відповідними факторами комфорту для ексклюзивних суден, що робить його непопулярним на круїзному ринку.

Для подальшої комерційно успішної роботи побудованого чи оновленого судна необхідно перед початком проектних робіт врахувати купівельну спроможність планованої цільової групи пасажирів у вигляді суми, яку цільова група має можливість витратити на круїз, враховуючи його тривалість, район оперування, сезонність та інші чинники.

Врахування купівельної спроможності можна здійснити шляхом визначення валового доходу судна за вибраний період часу, величини встановленого місячного зарплатного фонду, визначення числа членів екіпажу для необхідної категорії комфортабельності та пасажиромісткості. На підставі отриманого значення стає можливим визначити площі внутрішніх приміщень, головні елементи та техніко-експлуатаційні показники згідно з рекомендаціями [1]. Діапазон очікуваних витрат цільової соціальної групи пасажирів (купівельна спроможність) встановлюється виходячи з експертної оцінки діючого туристичного ринку, де належить працювати судну, регіону агентських продажів або вже традиційно встановленого діапазону вартості аналогічних круїзів.

Фонд заробітної плати екіпажу судна F зручно визначити виходячи з валового доходу судна за кількість днів навігації та очікуваної купівельної спроможності запланованого туроператором стандартного терміну круїзу:

$$F = k_n P_C N f_{\%},$$

де k_n – кількість повних днів навігації;

N – повна пасажиромісткість судна, чол;

P_C – прогнозована купівельна спроможність пасажирів за один круїз, віднесена до однієї доби круїзу, у.о./добу;

$f_{\%}$ – частка фонду заробітної плати екіпажу у загальному балансі витрат на утримання судна за навігацію (зазвичай 7-15%).

Від отриманого значення фонду заробітної плати необхідно перейти до мінімально допустимої кількості членів екіпажу судна:

$$n_{min} = F / S_{зп},$$

де $S_{зп}$ – усереднений рівень заробітної плати одного члена екіпажу за навігацію, у.о.

Отримане значення n_{min} необхідно зіставити з діючим співвідношенням числа членів екіпажу та пасажирів залежно від категорії комфортабельності судна відповідно до рекомендацій [1], [4] та встановити прийнятне $n_{ек}$. З метою оптимізації вартості побудови та виконання умови відповідності судна купівельній спроможності рекомендується наближатися до мінімально допустимої кількості членів екіпажу.

Використовуючи отримане значення числа членів екіпажу $n_{ек}$, можна визначити загальну площу всього судна $S_{пп}$:

$$S_{пп} = (n_{ек} s_{ек}) / S_{ек\%}, m^2,$$

де $S_{ек}$ – відносна площа приміщень для екіпажу, (зазвичай 8,5-10 м²/чл.ек) [1];

$S_{ек\%}$ – частка площі приміщень екіпажу у загальній площі судна $S_{пп}$ (зазвичай 8-13%) [1].

Отримане значення загальної площі судна рекомендується порівняти з діапазонами загальної площі ПСВЗП залежно від коефіцієнта і категорії комфортабельності, наведених у Таблиці 4.3 [1]. Якщо отримане значення $S_{пп}$ входить у діапазон, що рекомендується в таблиці, для бажаної категорії комфортабельності подальше визначення площ приміщень і

головних елементів проводиться відповідно до рекомендацій [1]. Якщо значення $S_{\text{пп}}$ потрапило в бажану категорію комфортабельності, необхідно провести коригування числа членів екіпажу та наново виконати перерахунок. Значна розбіжність значень $S_{\text{пп}}$ і очікуваної категорії комфортабельності також може свідчити про те, що для заданої купівельної спроможності загальна площа судна, рівень (категорія) комфортабельності та її основні елементи не можуть бути вищі, ніж отримані. Таким чином, отримане значення $S_{\text{пп}}$ прямо вкаже на можливість реалізації очікувань туроператора та потенційних пасажирів, а також на ті значення рівня комфортабельності та головних елементів, які можна отримати з огляду на плановану купівельну спроможність. У таблиці 1 наведено результати розрахунку основних елементів судна залежно від рівня купівельної спроможності від 400 до 700 ам. дол. за місце при семиденному круїзі на європейських ВВШ.

Таблиця 1 - Результати визначення основних елементів судна в залежності від рівня купівельної спроможності (круїз 7 днів у розрахунку на 1 пасажир)

Рівень купівельної спроможності P_c , ам. долл	Бажана пасажиро-місткість N , чол.	Число членів екіпажу, $n_{\text{ек}}$, чол.	Категорія комфортабельності	Отримана загальна площа судна $S_{\text{пп}}$, м^2	Отримані розміри, $L \times B$, м
400	200	32	***	2916	85x11,4
500	200	40	***	3750	110x11,4
600	200	48	****	4000	116x11,4
700	200	56	****	4670	135x11,4

Ілюстрації 1-4 характеризують судна, які приблизно відповідають розрахованим рівням купівельної спроможності.



Рисунок 1 – Судно з рівнем купівельної спроможності бл. 700 долл/тиждень



Рисунок 2 – Судно з рівнем купівельної спроможності бл. 600 долл/тиждень



Рисунок 3 – судно з рівнем купівельної спроможності бл. 500 долл/тиждень



Рисунок 4 – Судно з рівнем купівельної спроможності бл. 400 долл/тиждень

Що стосується виконання проекту оновлення судна обсягом модернізації чи переобладнання, головні розміри зазвичай не змінюються (винятком буде такий напрям модернізації як конверсія) [7]. У зв'язку з цим, облік купівельної спроможності матиме характер зворотного завдання – визначення розрахункового рівня купівельної спроможності $P_c^{\text{факт}}$ та порівняння його з прогнозованою (очікуваною) купівельною спроможністю P_c цільової соціальної групи пасажирів. Як правило, перед початком проектування замовник вже самостійно заздалегідь визначає бажану площу пасажирського блоку $S_{\text{пп}}$, чисельність екіпажу $n_{\text{ек}}$ та пасажиромісткість N . Виходячи з цих величин можна оцінити необхідний рівень купівельної спроможності для заданих величин:

$$P_c^{\text{факт}} = \frac{S_{\text{пп}} n_{\text{ек}}}{k_{\text{н}} N f_{\%}}, \text{ у. о./тиждень}$$

За результатами порівняння необхідно зробити висновок про можливість коригування розрахункового рівня купівельної спроможності з метою приведення його до очікуваного. Отримане значення $P_c^{\text{факт}}$ необхідно порівняти з P_c . Якщо дані величини збіглися в межах 10%, можна зробити висновок про те, що судно, яке оновлюється, може виправдати комерційні очікування замовника. У разі розбіжності зазначених величин більш ніж на 10% необхідно провести коригування пасажиромісткості в межах прийнятних для замовника, кількості екіпажу, фонду заробітної платні. Якщо коригування виявляться неприйнятними з погляду подальших інженерних або ринкових комерційних планів/очікувань замовника, можна зробити висновок про те, що бажаний обсяг оновлення недоцільний та/або оновлене судно буде комерційно неуспішним.

Висновки.

1. Вперше у розрахунку основних елементів ПСВЗП, як спроектованих суден, так і оновлюваних, враховано критерій купівельної спроможності потенційних пасажирів.
2. Отримав подальший розвиток метод проектування ПСВЗП, описаний у попередніх дослідженнях[1].
3. Удосконалено підхід до проектування ПСВЗП, який дозволяє отримати основні елементи судна для заявленої потенційної соціальної групи пасажирів із властивим їй діапазоном купівельної спроможності.
4. Запропоновано визначення розрахункового рівня купівельної спроможності для ПСВЗП, що оновлюються для порівняння його з очікуваною купівельною спроможністю цільової соціальної групи пасажирів.

Література

1. Сёмин А.А. Проектирование и эксплуатация пассажирских судов внутреннего и смешанного плавания по критерию комфортабельности: монография. Киев: Издательство Лира-К, 2020. 190 с.
2. Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Калугин Я.В. «Линейка» круизных пассажирских судов для внутренних водных путей. *Вісник ОНМУ*. Одеса. 2013. Вип. 2 (38). С. 20-40.
3. Егоров Г.В., Калугин Я.В. Опыт модернизации и строительства речных круизных судов с использованием элементов судов-доноров. *Збірник наукових праць НУК*. Морское инженерное бюро. Одесса. 2013. № 2. С.4-11.
4. Егоров А.Г. Модернизация и конверсия речных круизных пассажирских судов // *Вісник ОНМУ*. Одеса: ОНМУ, 2019. №2(59). С.41-76.

5. Егоров, А. Г. Анализ возможности реализации инновационных решений на модернизированных и конверсионных речных круизных пассажирских судах. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2019. № 1, С. 240–246. doi: [10.24937/2542-2324-2019-1-s-i-240-246](https://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-1-s-i-240-246)
6. Шибаев А.Г., Боровик С.С., Михайлова Ю.В. Разработка стратегии модернизации пассажирских судов путем оптимального распределения денежных средств. *Восточно-Европейский журнал корпоративных технологий*, 2020. № 6 (3(108)). С. 33-41. doi: [10.15587/1729-4061.2020.219293](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.219293)
7. Кукалец Л.М. Ідентифікація та класифікація напрямів оновлення круїзного пасажирського флоту змішаного та внутрішнього плавання // Вісник ОНМУ. Одеса, 2018. №1(54). С.61-72.

References

1. Syomin, A.A. Proektirovanie i ekspluatatsiya passazhirskih sudov vnutrennego i smeshannogo plavaniya po kriteriyu komfortabelnosti: monografiya. [Design and operation of passenger ships for inland and mixed navigation according to the criterion of comfort: monograph] Kiev: Izdatelstvo Lira-K, 2020.190 s.[in Ukrainian]
2. Egorov, G.V., Initskiy, I.A., Kalugin, Ya.V. «Lineyka» kruiznyih passazhirskih sudov dlya vnutrennih vodnyih putey["Line" of cruise passenger ships for inland waterways]. Visnik ONMU. Odesa. 2013. Vip. 2 (38). S. 20-40.[in Ukrainian]
3. Egorov, G.V., Kalugin, Ya.V. Opyit modernizatsii i stroitelstva rechnyih kruiznyih sudov s ispolzovaniem elementov sudov-donorov[Experience in the modernization and construction of river cruise ships using elements of donor ships]. ZbIrnik naukovih prats NUK. Morskoe inzhenernoe byuro. Odessa. 2013. # 2. S.4-11.[in Ukrainian]
4. Egorov, A.G. Modernizatsiya i konversiya rechnyih kruiznyih passazhirskih sudov [Modernization and conversion of river cruise passenger ships]Visnik ONMU. Odesa: ONMU, 2019. #2(59). S.41-76.[in Ukrainian]
5. Egorov, A. G. Analiz vozmozhnosti realizatsii innovatsionnyih resheniy na modernizirovannyih i konversionnyih rechnyih kruiznyih passazhirskih sudah. [Analysis of the possibility of implementing innovative solutions on modernized and conversion river cruise passenger ships].Trudy Kryilovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra.2019. # 1, S. 240–246. doi: [10.24937/2542-2324-2019-1-s-i-240-246](https://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-1-s-i-240-246)[in Russia]
6. Shibaev, A.G., Borovik, S.S., Mihaylova, Yu.V. Razrabotka strategii modernizatsii passazhirskih sudov putem optimalnogo raspredeleniya denezhnyih sredstv.[Development of a strategy for the modernization of passenger ships through the optimal distribution of funds] Vostochno-Evropeyskiy zhurnal korporativnyih tehnologiy, 2020. # 6 (3(108)). S. 33-41. doi: [10.15587/1729-4061.2020.219293](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.219293)
7. Kukalets, L.M. Identifikatsiya ta klasifikatsiya napryamiv onovlennya kruYiznogo pasazhirskogo flotu zmIshanogo ta vnutrIshnogo plavannya [Identification and classification of renewal ways of cruise passenger fleet of coastal and inland navigation] Vestnik ONMU, Odesa, 2018. #1(54). S.61-72.[in Ukrainian]

Syomin O.A., Kukalets L.M.

ACCOUNTING OF THE CRITERION OF PURCHASING POWER IN DESIGN AND RENEWAL OF PASSENGER VESSELS FOR INLAND AND MIXED NAVIGATION

The article considers the possibility of a thorough method of designating the main parameters and technical and operational indicators in the design of new or upgraded passenger ships for inland and international navigation (PSIIN). It was approved by the criterion of buying capacity

of potential passengers. It was grounded the compliance with the criterion when designing and updating the PSIIN. The results of the assessment of the main elements of that category of the ship's comfort in the fallow are given in terms of the purchasing capacity of the passengers.

Key words. Passenger ship, head elements, rosemaries, characteristics, economic indicators, passengers, purchasing capacity, commercial efficiency.

УДК 623.81-024.24

doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.09

Сапіга В. В., Онищенко О. А., Шуміло О. М.

РОЗВИТОК СУЧАСНИХ ВІЙСЬКОВО-МОРСЬКИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ: МОДУЛЬНІ КОНЦЕПЦІЇ

Представлено критичний аналіз класичної моделі побудови існуючих морських флотів. За допомогою відкритих джерел інформації, у статті наводиться аналіз існуючих у різних військових флотах Світу різновидів модульних концепцій побудови кораблів, суден допоміжного флоту, енергетичних установок тощо, які активно використовуються у сучасному суднобудуванні, зокрема, при реновації та конверсії суден, проектуванні, побудові та експлуатації військових кораблів та суден подвійного призначення, у тому числі - автономних. Результати аналізу свідчать, що практичне використання модульних концепцій дозволяє суттєво знизити негативні риси класичної моделі побудови флоту. Для найбільш розповсюджених типів модульних концепцій, які використовують різновиди модульних концепцій, наведена стисла ретроспектива їх появи, створення та загальної ідеології реалізації, що покладені у застосовані принципи їх концептуально-архітектурної композиції і необхідних для створення ресурсів. Обґрунтовано тезу, що на теперішній час існуючі різновиди модульних концепцій являють собою обмежений за структурою симбіоз відомих і дуже складних, рішень. На основі проведеного аналізу різновидів модульних концепцій, зокрема, їх позитивних рис, показана можливість обрання оптимальних (за заданими критеріями) їх різновидів, або поєднання різновидів, з метою формування перспективних архітектурно-композиційних обрисів кораблів та суден допоміжного флоту Військово-Морських Сил Збройних Сил України.

Ключові слова: життєвий цикл корабля, гнучкі рішення, модернізація, конверсія, Standard Flex, модульні системи, МЕКО, інтегровані показники якості.

1. Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. В керівних документах, що стосуються сектору безпеки і оборони держави, зокрема, у “Стратегічному оборонному бюлетені України” (Указ Президента України від 17.09.2021, № 473/2021), чітко визначаються стратегічні оборонні цілі та шляхи їх досягнення. Однією із стратегічних цілей є, “Інтегровані оперативні (бойові та спеціальні) спроможності сил оборони, що забезпечують стримування, стійкість і відсіч збройної агресії проти України, протидію гібридним загрозам” [1], досягнення якої здійснюється шляхом практичної реалізації низки оперативно-тактичних завдань та заходів. Зокрема, до них відноситься “Формування військово-морських спроможностей України, достатніх для забезпечення оборони

морського узбережжя та захисту національних інтересів в акваторії Чорного та Азовського морів”. В “Стратегії Військово-Морських Сил Збройних Сил України 2035” [2] (січень 2019 р.), дається чітка відповідь на питання, як це буде досягнуто. Таким чином, вирішення проблеми відновлення та найскорішого нарощування морського потенціалу України, у першу чергу її Військово-Морських Сил (ВМС) в умовах сьогодення, є вкрай актуальним.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій у вільних і загальнодоступних джерелах інформації у галузі використання модульних концепцій в суднобудуванні, зокрема, при проектуванні та будівництві військових кораблів [3-8] показує, що з метою зменшення класів кораблів із одночасним розширенням діапазону їх спроможностей модульні концепції використовуються у ВМС різних країн. Так, завдяки розумінню переваг і досвіду застосування модульних концепцій у суднобудуванні, країнами Європейського союзу доведена здатність таких концепцій у забезпеченні зниження вартості побудови, покращанні, майже всіх етапів, життєвого циклу (ЖЦ) військових кораблів (далі – кораблів), підвищенні гнучкості у застосуванні сил флоту [4-7]. У Наказі Командування ВМС ЗС України від 05.06.2019 року № 141 “Про затвердження Тимчасового положення про класифікацію військових кораблів Військово-Морських Сил Збройних Сил України” визначено, що “Військовий корабель – це корабель (катер, судно), що належить до Військово-Морських Сил, має зовнішні розпізнавальні знаки державної належності і є під командуванням офіцера (мічмана, старшини), який перебуває на військовій службі в Збройних Силах України або є працівником Збройних Сил України.

Модульні концепції у суднобудуванні виходять, у першу чергу, із уніфікації корабельного оснащення та можливості його швидкої інтеграції із рештою корабельних систем. Наприклад, під час розробки концепції гнучких систем *Standard Flex*, спеціалістами датських ВМС була висунута вимога, яка найшла позитивну підтримку фахівців – час зміни профілю корабля (призначення, місії) повинен бути до 8, максимум до 10, годин. При цьому, з метою скорочення часу, всі технологічні процеси інтеграції повинні протікати паралельно і незалежно. Результатом реалізації такої “перебудови” є зміна призначення корабля та його можливостей виконувати певні завдання (місії).

Існуючі модульні концепції [8], як правило, відрізняються:

- ✓ системами зброї, у першу чергу артилерійської та ракетної – для виконання ударних завдань або завдань самооборони;
- ✓ спеціальними засобами, у першу чергу безекіпажними (автономними, безпілотними) апаратами – для виконання протимінних завдань або завдань протичовнової боротьби;
- ✓ допоміжним устаткуванням, таким, як кранове обладнання та обладнання для завантаження/вивантаження спеціальних засобів.

Під час розробки і реалізації сучасних проектів кораблів, використовують різновиди модульних концепцій. У суднобудуванні існує реалізація трьох основних різновидів модульних концепцій (рис. 1).



Рисунок 1 – Різновиди модульних концепцій та їх призначення [8]

Таким чином, практичне застосування модульних концепцій, зокрема, їх використання у концептуально-архітектурних композиціях корабля або судна під час проектування, спрощує визначення обрису перспективного транспортного засобу (корабля, судна, апарата) і створює умови до адаптації корабельного угруповання (флоту) в умовах швидкої зміни обстановки (у тому числі в умовах гібридних дій противника). З метою швидкого нарощування спроможностей ВМС, такий принцип дозволяє використовувати вже апробовані проектні рішення для кораблів одного класу, суттєво зменшує витрати на проектування, надає можливість швидкої зміни кораблю відповідного завдання (місії) під час особливого періоду або воєнного стану.

Мета статті – аналіз існуючих модульних концепцій і їх різновидів у суднобудуванні, зокрема, при проектуванні і побудові суден різного типу. Подальший поглиблений розвиток і практичне використання проведеного аналізу, дозволить обирати оптимальні за різними заданими критеріями різновиди архітектурних концепцій проектування, побудови, реновації (або їх поєднання) суден при формуванні перспективних обрисів суден, зокрема – кораблів ВМС Збройних Сил України (ЗСУ).

3. Основний матеріал. Починаючи з 2014 року, Уряд України та Командування ВМС ЗСУ постійно вирішує суперечну ситуацію – знаходить компроміс між можливостями держави у нарощуванні і утриманні корабельного складу ВМС та ефективністю вирішування, покладених на ВМС, завдань. Слід відзначити, що проблема практичного використання сучасних модульних концепцій є комплексною та системною. Її вирішення дозволить усвідомити, які переваги та недоліки несе “класична” модель ВМС, тобто модель флоту, що побудована на базі кораблів різних класів та підкласів, та раціонально витратити ресурси. Представлений на рис. 2 своєрідний обрис класичної “моделі флоту”, дозволяє говорити про означену проблему за двома напрямками.

“Класична модель” флоту



Рисунок 2 – Загальні проблеми “класичної моделі” побудови флоту

Перший напрямок стосується ефективності експлуатації та застосування флоту:

– наявність різноманітних підкласів кораблів для виконання строго визначеного завдання/місії (патрулювання, пошуку і знищення підводних човнів тощо). Виключенням є наявність у складі флоту таких підкласів кораблів, як фрегат та есмінець. Але їх ціна та витрати на експлуатацію дуже великі. Наприклад, річне обслуговування лише одного фрегату типу “*Олівер Перрі*” становить майже 25 млн. доларів [9];

– темпи розвитку сучасних систем озброєння, інформаційно-телекомунікаційних і інших спеціальних систем різко зростають. Це («гонка озброєння») потребує створення відповідної сучасної виробничої бази із необхідним технологічним оснащенням і підготовкою фахівців. Це веде до суттєвого збільшення витрат суднобудівного виробництва. Розвиток таких систем і урахування тривалого строку служби корабля, повинен передбачити відповідний резерв часу на модернізацію виробництва. Наприклад, проведення робіт із модернізації, у залежності від підкласу корабля, може займати до 30 % від його повного ЖЦ;

– у випадку прихованої агресії проти країни (так звані війни 4-го покоління у формі “гібридних” дій), обмежуються можливості різкого нарощування і використання окремих підкласів кораблів, наприклад, таких як, патрульні та кораблі протимінної оборони для забезпечення безпеки судноплавства у національній зоні відповідальності. Події навколо Азовського моря (починаючи з 2018 року і до теперішнього часу) підтверджують ці обмеження [10]. Використання у цьому випадку кораблів підкласів фрегат і есмінець значно підвищує фінансові витрати оборонного бюджету та країни у цілому.

До другого напрямку віднесена **розробка та проектування** кораблів, які пов’язані із наявним підходом до індивідуального проектування відповідного підкласу корабля. Різні погляди (суб’єктивізм, авторитарність і навіть протекціонізм) на застосування кораблів та різноманіття вимог конкретного замовника приводять до:

– неприпустимо тривалого часу проектування корабля, і як наслідок, суттєвого збільшення необхідних ресурсів, необхідних для завершення етапів аван-, ескізного та технічного проектування;

– збільшення часових та матеріальних витрат на розробку унікальних технологій побудови та технологічного оснащення для її створення. Це, у більшості випадків, одноразова і тому вкрай неефективна задача, що суттєво обтяжує судноверфі та проектні організації;

– морального старіння корабля вже на стадії проектування, внаслідок стрімкого розвитку систем озброєння, інформаційно-телекомунікаційних систем, технологій та різних допоміжних суднових систем і комплексів.

Напрямки, що дозволяють нівелювати ці негативні чинники, за баченням авторів, можуть бути наступними.

1. Абсолютна (максимальна) уніфікація не тільки обладнання та елементів кораблів, а і виробничого процесу побудови корабля. Це приводить до зменшення часу на проектування та побудову корабля, скорочення затрат на всіх етапах ЖЦ корабля і, як наслідок, приводить до найкращого співвідношення ціни та інтегрованої якості готового виробу.

2. Поєднання з Класифікаційними товариствами зусиль конструкторських бюро, проектних інститутів всіх рівнів, які спеціалізуються на розробці та створенні продукції воєнного призначення. Поява даного напрямку пов'язана із основними змінами у сучасних Світових концепціях суднобудування:

– розвиток комп'ютерно-обчислювальної техніки та технологій, у тому числі – інтелектуальних, призвели до створення та сертифікації (у відповідності до вимог Стандарту *ISO 9000:2015*) потужних науково-інженерних прикладних програмних продуктів, таких як *SolidWorks* (інженерний аналіз та підготовка виробництва будь-якої складності та призначення), *Autodesk Inventor* (автоматизоване проектування 3D обладнання, конструкцій, моделювання, візуалізації та документації), *Femap with NX Nastran* (аналіз динаміки і міцності конструкцій, машин і споруд, вирішення нестационарних нелінійних просторових задач, задач механіки композитів і композитних структур, аналіз процесів складного теплообміну, рішення задач механіки рідини і газу) та інші. Сучасні програмні продукти, крім високої вартості, потребують сертифікованих спеціалістів не тільки з відповідним фахом і досвідом проектування, а і з розвинутою креативністю. Такі складнощі призвели до комерціалізації процесів проектування суден (зокрема, бойових кораблів) за допомогою більшості програм і програмних продуктів різних типів *CAD/CAM/CAE*;

– активне застосування аутсорсінгу під час розробки та проектування кораблів.

3. Використання концепції модульності. Модульні концепції корабля виходять, у першу чергу, із можливостей такого конкретного корабельного оснащення, яке має здатність швидко й легко замінюватись. Результатом реалізації такої заміни є зміна призначення корабля та його можливостей виконувати певні задачі.

Першим вдалим рішенням концепції модульності у військовому кораблебудуванні (з елементами першого та другого різновиду (рис. 1), є концепція *MEKO (MEhrzweck-Kombination* – багатоцільовий комбінований корабель), яка належить німецькій суднобудівній та інжиніринговій компанії *Blohm+Voss* [11]. Концепція *MEKO* є прикладом втілення такого різновиду модульних концепцій у проектуванні і будівництві кораблів, який знайшов найбільш широке застосування у суднобудуванні. Концепція ґрунтується на блочно-модульному агрегуванні систем корабля та їх інтеграції зі всіма компонентами, що необхідні для роботи й управління цими системами. Модулі підключаються через стандартні інтерфейси до джерел живлення, вентиляції, кондиціонування, до інших модулів, а також до мереж (внутрішніх і зовнішніх) передачі даних і керування.

Первинний задум і зусилля розробників концепції *MEKO* (рис. 3) направлений на створення універсальної платформи корабля, на базі якої пропонуються різні варіанти його

оснащення, що можуть змінюватись і настраюватись під час розробки проекту корабля відповідно до вимог замовників. Використання уніфікованих модульних елементів в концепції *MEKO* (модулі (блоки) *FES – Funktionseinheiten System*), таких як зброя і техніка, приносить значну економію виробничих витрат та дає можливість завершити системне, а головне – серійне, виготовлення і випробування модулів ще у цеху, тобто на березі.

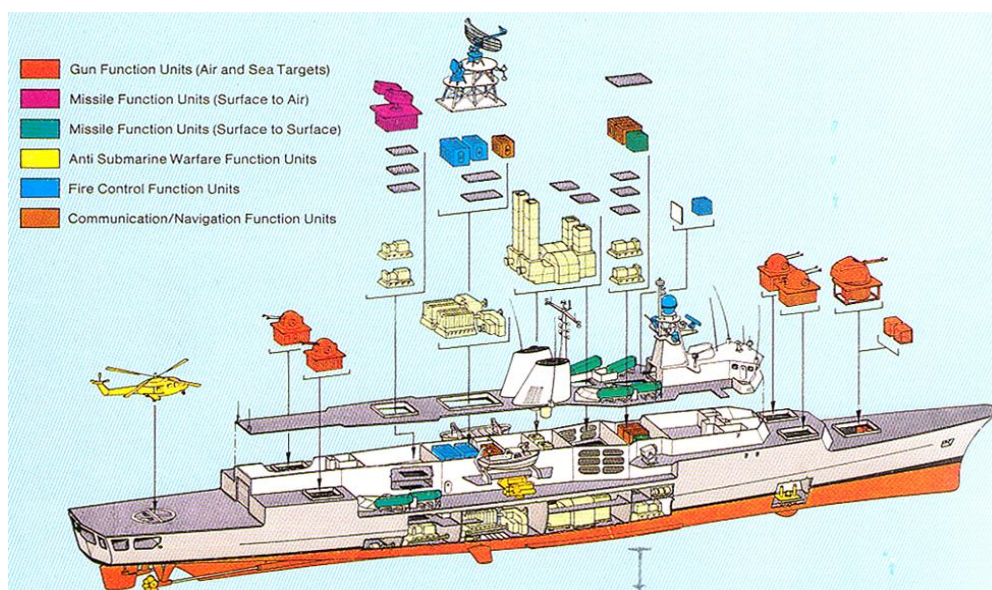


Рисунок 3 – Фрегат *MEKO 360H1 “Aradu”* (ВМС Нігерії, 1981 р.): варіанти зміни комплекту озброєння та обладнання у відповідності до місії [12].

В основу концепції *MEKO* покладені принципи:

- зменшення вартості будівництва кораблів за рахунок оптимізації виробництва на підприємствах суднобудівної галузі та інфраструктури і підприємств, які задіяні у виготовленні озброєння та комплектуючих;

- зменшення вартості будівництва кораблів за рахунок скорочення строків виконання замовлення (у тому числі – урахування ризиків інфляції), що є наслідком організації виробничих процесів, які відбуваються паралельно, з будівництвом самого носія та відповідних модулів;

- зниження витрат на підтримку корабля у готовності до виконання завдання (місії) у період експлуатаційного етапу ЖЦ, за рахунок зменшення часу на ремонт та проведення робіт з модернізації (можливість швидкої заміни модуля, якій вийшов з ладу або заміни на більш сучасний зразок).

За концепцією *MEKO* було побудовано та поставлено, у різних комбінаціях, більше 60-ти багатоцільових кораблів (фрегати та корвети) для потреб ВМС різних країн [12]. Останній варіант цієї концепції є “бойовий корабель для прибережних вод” (корабель літоральної зони) – *MEKO CSL* (рис. 4), якій поєднує можливості усіх трьох основних концепцій модульності у суднобудуванні.

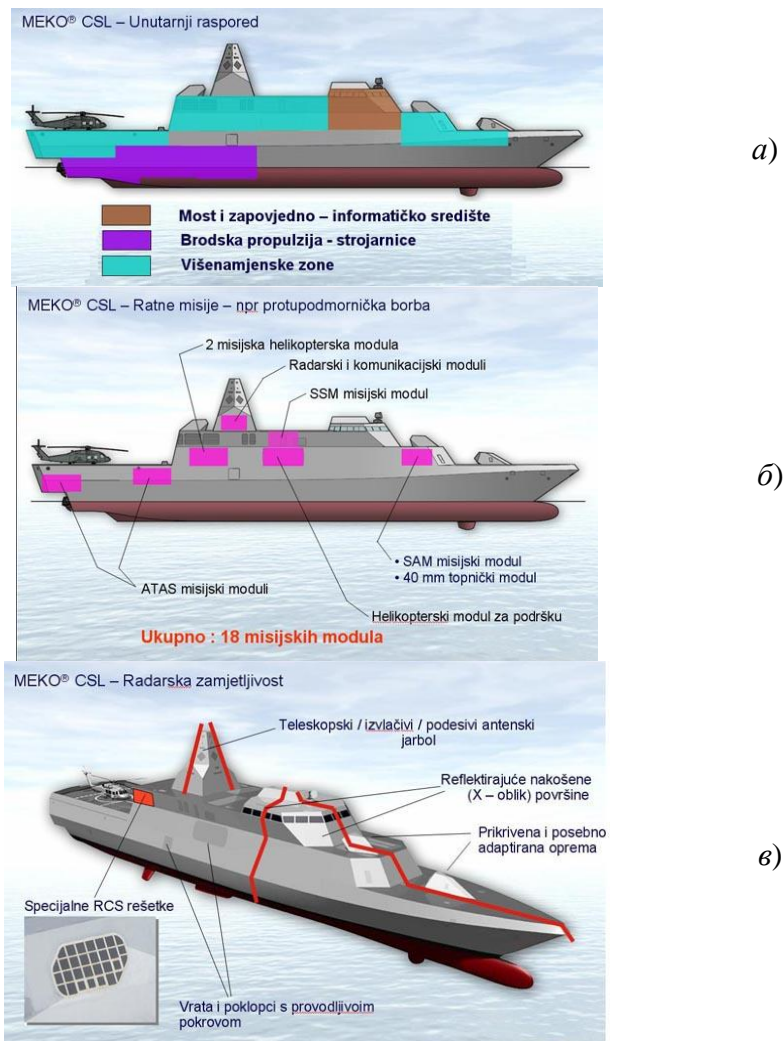


Рисунок 4 – Проект корабля літоральної зони *MEKO CSL* компанії *Thyssen Krupp Technologies AG* [13]: а), б) – варіанти використання концепцій модульності у відповідності до місії корабля; в) – приклад застосування технологій “малопомітності”.

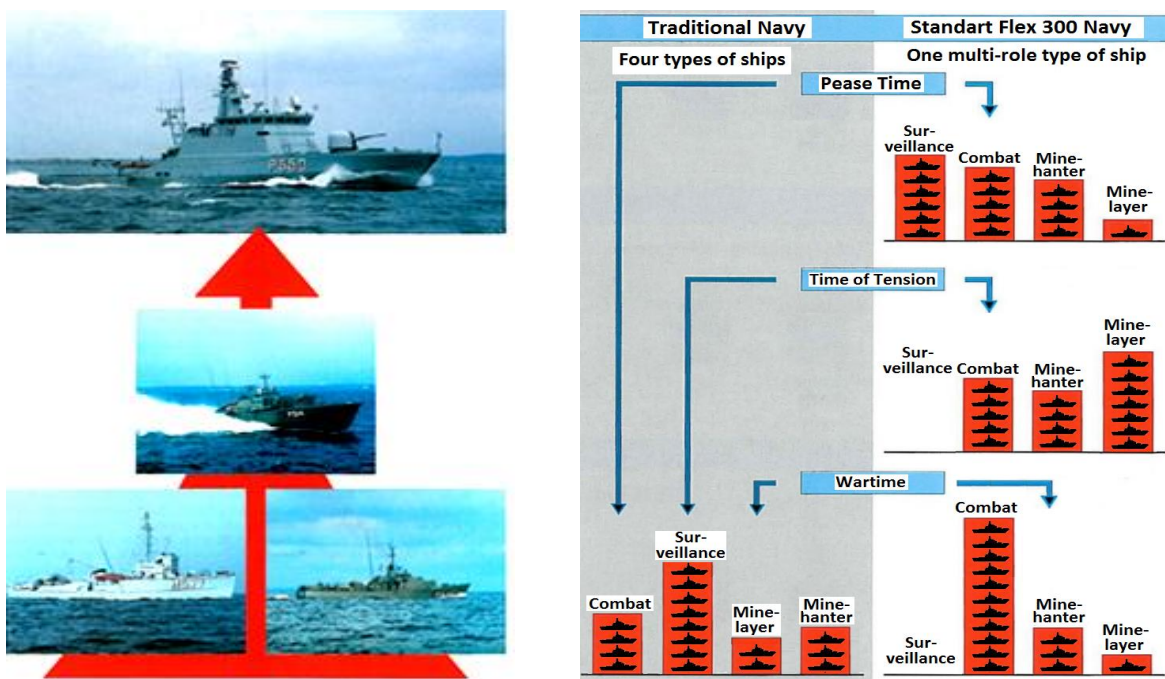
Під час розробки цього варіанту концепції *MEKO* був врахований досвід проектування та експлуатації інших типів кораблів (корветів класу *Visby*, кораблів класу *USS Freedom* проекту американської компанії *Lockheed Martin Corporation*). Це дозволило отримати новий проект корабля, якій за своїми можливостями та архітектурно-конструкторськими рішеннями є дуже привабливим для потенційних клієнтів, зокрема, завдяки урахуванню принципу «вільного простору», корабель легко адаптується для участі у тривалих та спільних міжнародних військових операціях, у тому числі, корабель здатний виконувати роль командної платформи. Завдяки уніфікації технології заміни модулів у концепції *MEKO CSL*, як і у *Standart Flex*, виконується головна вимога – час зміни місії корабля не перевищує 8...10 годин [13].

Інноваційним рішенням компанії *ThyssenKrupp Technologies AG* (Німеччина) є, також, невійськова версія корабля *MEKO Fusion*, яка призначена, насамперед, для поліцейських операцій, охорони виключних економічних зон, контролю зони рибальства, виконання митних завдань, моніторингу із дотримання екологічного законодавства тощо.

Ще одним прикладом реалізації першого різновиду модульних концепцій є концепція *Standart Flex* [14] – комплектування корабля модулями у залежності від бойового завдання.

Цю концепцію розроблено у 80-х роках минулого століття для заміни застарілого датського флоту й практично застосовано у ВМФ Данії. Так, на початку 80-х років ХХ століття, Королівський датський флот зіткнувся з проблемою, що до 1990 року необхідно вивести зі складу флоту 32 одиниці застарілих кораблів, з них – 10 підводних човнів, приблизно стільки ж фрегатів та інших класів кораблів. Залишені у складі флоту 22 корабля (6 – швидкохідних і 8 – патрульних, решта – тихохідні, з обмеженими морехідними якостями кораблі) були неспроможні виконувати наявні завдання. З метою створення реалістичної кораблебудівної програми, при визначених строках і ресурсах, був потрібен принципово новий підхід, який дозволяє реалізувати в одному корпусі корабля три класи кораблів – торпедні катери, міно-тральні та сторожеві (патрульні) кораблі (рис. 5).

Таку концепцію сформовано на модульній здатності конкретного обладнання вміщуватися у стандартний інтерфейс контейнера, який може бути швидко змінено на універсальній платформі. За результатами реалізації відповідної програми, ВМФ Данії отримала 14 кораблів проекту “Standart Flex-300” або класу “Flyvefisken”, які охоплювали можливості еквівалентні або більші, ніж увесь попередній корабельний склад.



a)

б)

Рисунок 5 – Концепція Standart Flex [14]: а) – задум концепції; б) – приклад нарощування спроможностей флоту при зміні безпекового середовища

Кораблі класу “Flyvefisken” (проект Standart Flex-300) дозволяють вирішувати завдання за декількома напрямкам, а саме [14]: *Surveillance Unit* – контроль за повітряною та надводною обстановкою в операційній зоні; *Combat Unit* – місія корабля, яка передбачає пошук та знищення надводних цілей (використання ракетної зброї); *Minelayer Unit* – корабель здатний виконувати завдання з постановки морських мін (до 60 мін); *Anti Submarine Warfare Unit* – завдання виявлення та знешкодження підводних човнів; *MCM Unit* – пошуку, розпізнавання та знешкодження мін; *Anti Pollution Unit* – дозволяє кораблю вирішувати завдання боротьби з забрудненням морських акваторій та захисту

навколишнього середовища. Водночас проект *Standart Flex-300* (рис. 6) використовує концепцію модульності з метою забезпечення підвищеного рівня спроможностей корабельного складу флоту зі зменшенням числа класів кораблів за видами зброї.

Головна ідея концепції корабля проекту *Standart Flex-300* – можливість встановлювати відповідне озброєння та обладнання в уніфіковані контейнери (модулі *Stanflex*, див. рис. 7), з наступним їх розміщення у чотирьох “комірках” кормової частині корабля класу “*Flyvefisken*”. Саме таким чином змінюється цільове призначення і місія корабля.

Кожен модуль розміщений у контейнері із нержавіючої сталі розміром 3 × 3,5 × 2,5 м.

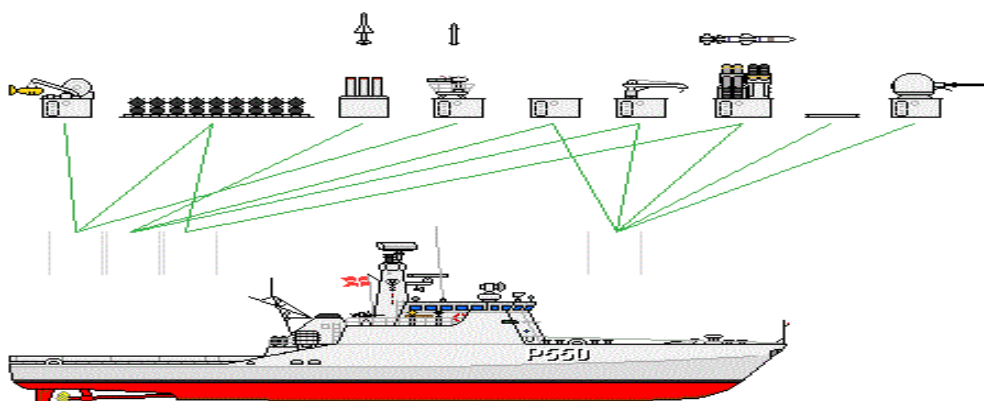


Рисунок 6 – Корабель проекту *Standart Flex-300* [6, 15]: приклад встановлення модулів *Stanflex* у відповідності до місії корабля

Прецизійне оброблення фланців гарантує якість ущільнення та комутацію із з'єднаннями для живлення, вентиляції, кондиціонування, зв'язку, подачі технічних речовин та передачі даних. При цьому виключений недолік, якій був притаманний на початковому етапі використання модулів *FES* в концепції *MEKO*, а саме, проблема ущільнення модуля з корабельними конструкціями. Зброя, або система, монтується на даху модуля, тоді як пристрої, електроніка та допоміжне обладнання розміщуються усередині. Модулі, як правило, встановлюються та замінюються 15-тонним автокраном. Загалом, було побудовано близько 100 різних модулів. Будь-який модуль можна замінити протягом 30 хвилин, а після завершення тестування системи, корабель готовий до розгортання і виконання місії протягом декількох годин. У бойовому інформаційному центрі встановлюються стандартизовані консолі, роль яких визначається встановленим програмним забезпеченням, яке швидко замінюється. Легкість встановлення та використання справедливо порівнюється військово-морськими спеціалістами з іншим датським продуктом – конструктором *Lego*.

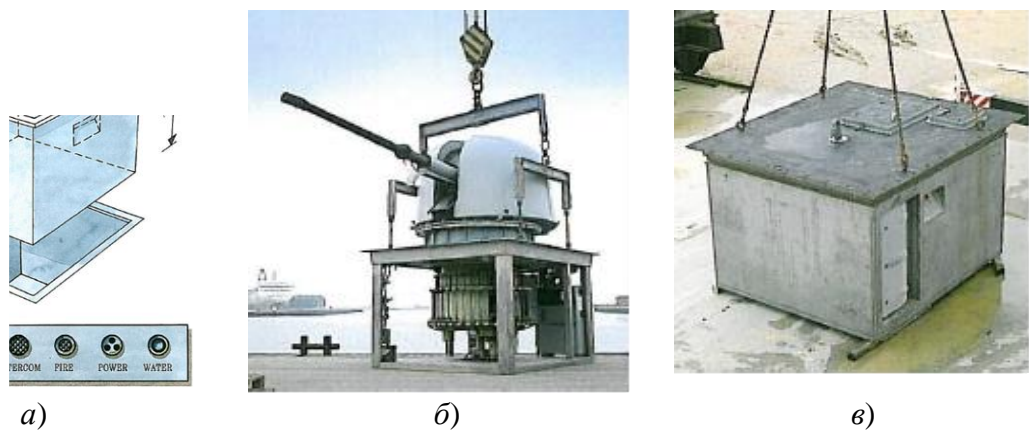


Рисунок 7 – Модулі типу *Stanflex* [14]: а) – габаритні розміри та підключення комунікацій; б) – приклад модуля з артилерійської установкою; в) – зовнішній вигляд контейнеру з розміщеним у ньому спеціальним обладнанням

Наступним інноваційним рішенням під час проектування та будівництва кораблів проекту *Standart Flex-300* є те, що корпус корабля виконаний за технологією “сендвіч-конструкції” із немагнітних матеріалів. Тим самим забезпечуються вимоги щодо фізичних полів корабля (початкове електромагнітне та електричне поле), зменшення ваги корпусних конструкцій та зниження експлуатаційних витрат на обслуговування та ремонт корпусу та корпусних конструкцій.

До переваг концепції – модульні контейнери (див. рис. 1), можна віднести: зручність технічного обслуговування та ремонту модулів; умови зберігання згідно інструкції з експлуатації (у тому числі в захищених від впливу навколишнього середовища приміщеннях); відсутність необхідності виводити корабель з компанії для технічного обслуговування модуля (озброєння та обладнання, що входять до його складу). При виведенні корабля з бойового складу ВМС, модулі можуть використовуватися іншими кораблями даного або іншого класу. Наприклад, модулі типу *Stanflex* з проекту корабля *Standart Flex-300* були адаптовані для використання на кораблях інших класів (типу *Absalon*), це значно збільшує гнучкість корабельного складу ВМС та зменшує витрати на утримання. Також, до переваг слід віднести комерційну привабливість кораблів, що будуються для іноземного замовника, тому що модулі вже виготовлені.

До недоліків віднесемо: витрати на виготовлення надлишкового числа модулів, витрати на технічне обслуговування під час зберігання, необхідність мати додаткові площі для зберігання модулів, утримувати персонал, що обслуговує їх та мати відповідні технічні засоби для здійснення демонтажних та монтажних робіт при заміні модулів.

Другою генерацією (*Second Generation 2000*) концепції *Standart Flex* прийнято рахувати їх адаптацію до використання на кораблях типу *Absalon* та патрульних кораблів типу *Knud Rasmussen* (рис. 8).

Використання одночасно концепції “модульний контейнер та модульний потенціал вільного простору”, дозволив у проекті корабля типу *Absalon* реалізувати п’ять “комірок” для різних модулів. Багатоцільова палуба (площею 900 м²) з кормовою рампою для горизонтальної вантажної обробки дозволяє створювати простір для похідного штабу (місія корабля управління), плавучу ремонтну базу для проведення робіт з технічного обслуговування та ремонту корабельного устаткування (чисельність технічного персоналу до 70 осіб), розгортати мобільний госпіталь, якій розрахований на надання допомоги 40 пацієнтам у добу або до 10 великих хірургічних операцій у випадку виникнення надзвичайних ситуацій [16].



а)

б)

Рисунок 8 – Приклад *second generation 2000* концепції *Standart Flex* [17]: а) – корабель типу *Absalon*; б) – патрульний корабель типу *Knud Rasmussen*

Інший корабель, що відноситься до *Second Generation 2000* є патрульний корабель типу *Knud Rasmussen* [17], які призначений для виконання місій в арктичних умовах експлуатації. Завдяки передбаченню під час проектування можливості використання модульної концепції (модульних контейнерів), корабель може виконувати завдання, щодо пошуку та порятунку, інспектування та захисту зон рибальства, виконувати проводку кораблів та суден в умовах льодової обстановки, виконувати функції корабля берегової охорони та інші. У випадку зміни безпекового середовища, завдяки швидкому встановленні необхідних модулів, корабель може отримати 76-мм артилерійську установку, ракети *Evolved Sea Sparrow* або протичовнові торпеди.

Аналіз досвіду використання кораблів (концепції *MEKO* та *Standart Flex*), дозволив науковцям та конструкторам створити нову концепцію типу *МОРСО (Modular Platform Concept)* [18], що підвищує безпеку кораблів протимінної оборони під час тралення. Ідея концепції (рис. 9) полягає у ретельному опрацюванні модульного обладнання, що досягається в уніфікації з'єднань та інтерфейсів для різних модулів (контейнерів) та обладнання місії, наприклад вантажних пристроїв (лебідки, крани тощо).



Рисунок 9 – Приклад реалізації концепції типу *МОРСО* [18]

Проектне бюро судноверфі *Abeking & Rasmussen* (Німеччина) та компанія *Lürssen Werft* в рамках програми *MJ2000 I (Minenjagd 2000 – полювання на міни 2000)*, яка проводилась в інтересах німецьких ВМС, створили платформу *SWATH* (рис. 10), яка

використовує модулі, розраховані на вплив ударної хвилі (вибух морської міни). Ця платформа оптимізована за такими чинниками, як висока ударостійкість, низький рівень магнітного поля, низька вібро-акустична шумність механізмів тощо. Надбудова і рубка об'єднуються в “цільовий модуль”, який жорстко встановлюється фронтально, тим самим поєднують два корпуси. Конструктивно у “цільовому модулі” розташоване усе основне та допоміжне енергетичне обладнання, яке забезпечує функціонування додаткових модулів, що визначають місію корабля. У залежності від встановлених додаткових модулів, корабель вирішує завдання протимінного забезпечення, розміщення та постановка мін, запуску підводних апаратів тощо. Зміна місії корабля у цьому випадку досягається за рахунок повної заміни модуля протимінного забезпечення базової платформи будь-яким іншим. Передбачено встановлення до трьох додаткових модулів, що забезпечують розміщення систем озброєння, обладнання для гідрографічних робіт, заходи охорони навколишнього середовища, підтримку роботи водолазів або операції протимінного забезпечення [19].

Наступна концепція “Venator”, розробка (рис. 11) британського проектного центру *BMT Defence Services* [20]. Вона є результатом широкої програми досліджень, щодо опрацювання нових архітектурно-конструкторських і технологічних рішень стосовно корпусу та корпусних конструкцій, створення уніфікованої платформи, яка здатна вирішувати значну кількість завдань кораблів, удосконалення і розвитку існуючих різновидів модульних концепцій у суднобудуванні військових кораблів. Проект фрегата типу *VENATOR-110* включає інноваційні рішення щодо побудови внутрішнього простору корабля з використанням модульної концепції – модульний потенціал простору. Ідеологія проекту *VENATOR-110* полягає у поєднанні потужних керованих та адаптованих спроможностей в межах оптимізації співвідношення між тактико-технічними характеристиками “легкого” фрегату та обмеження його вартості. На відміну від концепції *Standart Flex*, в якій за короткий час змінюється озброєння та обладнання, що розміщено в модулі (контейнері), концепція “Venator” базується на використанні модульного потенціалу простору корабельних приміщень. Це співпадає з філософією дизайну/проектування, що має назву “Middle Out” і дозволяє знаходити компроміс [21] між постійно зростаючими вимогами до військових кораблів та їх спроможностями. Завдяки цьому можна уникнути ризику безперервного зростання вартості проектування та побудови корабля.



а)

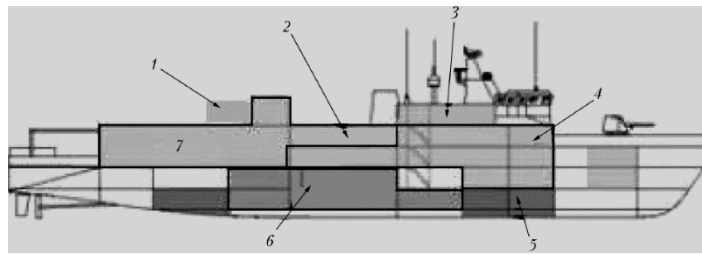


б)



в)

Рисунок 10 – Платформа типу *SWATH* [19]: а) – патрульний катер типу *Skrunna*; б) – пояснення, щодо “цільового модуля”; в) – приклад встановлення модуля з обладнанням для виконання завдань оборони



а)

б)

Рисунок 11 – Проект фрегату типу *VENATOR-110* [8, 20]: а) – проект фрегату; б) – концепція “*Venator*” компанії *BMT Defence Services*, де 1 – телескопічний ангар; 2 – модульний простір місій задач; 3 – простір бойового управління; 4 – житлові та службові приміщення; 5 – носові й кормові цистерни запасів; 6 – простір для машинних відділень та електростанцій; 7 – простір для безпілотних апаратів та засобів

Приміщення реконфігуруються (налаштовуються) під відповідні місії (завдання). Концепція передбачає наявність достатнього вільного простору (у тому числі, телескопічного ангара), яке пристосовано для реконфігурації під відповідне завдання, зокрема, розміщення безпілотних морських апаратів, технічних засобів, безпілотних літальних апаратів. Кормове приміщення, що пристосоване для реконфігурації простору, закінчується кормовою рампою, яка забезпечує можливість запуску безпілотних морських, у тому числі – підводних, плавальних апаратів, інших надводних технічних засобів. Для виконання таких завдань, як пошук, розпізнання та знищення морських мін, використовуються морські автономні апарати (це може бути як надводний, так і підводний безпілотний плавальний апарат), які розміщені та готуються до використання за призначенням у передбаченому корабельному приміщенні. Керування такими технічними засобами може здійснюватися, як з мобільного посту управління, так і із контейнеру (звичайного 20-ті футового), що розміщений у телескопічному ангарі на верхній палубі. Використання безпілотних автономних технічних засобів дозволяє вирішувати завдання протимінного забезпечення на достатньої відстані від корабля, що створює безпечні умови для проведення такої операції. З іншого боку, це дає можливість проектантам корабля мінімізувати вимоги до нього з питань ударостійкості та рівня фізичних полів, що у підсумку знижує вартість корабля.

Таким чином, спираючись на накопичений багатий досвід розробки та проектування військових кораблів, компанія *BMT Defence Services*, створила проект *VENATOR-110* – надзвичайно гнучкого та легко адаптованого до різних місій сучасного військового корабля [20]. Корабель цього проекту, являє собою платформу, здатну забезпечити широкий спектр завдань (місій) за оптимальною інтегрованою якістю [22].

Висновки. Проведений аналіз різновидів модульних концепцій, які впроваджені або плануються до використання під час проектування військових кораблів та суден свідчить про наступне.

1. Концепції *MEKO* та *Standart Flex* у свій час були проривними рішеннями для військових флотів окремих країн Світу. Надлишковість обладнання та необхідність в додаткових силах та засобах їх реалізації, призводять до суттєвих фінансових витрат при реалізації, утриманні і практичному використанні. Саме ці чинники доводять необхідність відмови від таких концепцій.

2. Концепції *МОPCO* та *Venator* залишилися "на папері", внаслідок складності конструкторських рішень та необхідності у додаткових силах, додаткових технологіях та засобах реалізації.

3. Стрімкий розвиток інформаційних технологій, ідеології побудови "інтелектуального" озброєння (зокрема, на нових фізичних принципах), активна інтеграція

військових та комерційних конструкторських установ у проектуванні, побудові і утриманні військових кораблів, розвиток теорій ведення бойових дій (теорія роя та інших) та практичного застосування морських та літальних безпілотних апаратів, які керуються за допомогою штучного інтелекту, змусили науковців та конструкторів розглядати військовий корабель як складну, модульну, синергетичну систему, що інтегрується у дії флоту. В умовах сьогодення найбільш вживаним різновидом модульної концепції є модульний потенціал простору.

4. Використання різновидів модульних концепцій під час проектування перспективних кораблів ВМС ЗС України або модернізації (реновації) наявних, слід вести з погляду:

– передбачення штатних місць на кораблі для кріплення додаткового устаткування, що дозволить використовувати безпілотні системи;

– можливості зміни конфігурації приміщень, які за короткий проміжок часу дозволять перетворити корабель або катер в командну платформу для керування морським роєм або інтегруватися в єдину систему висвітлення надводної обстановки та ін.

5. Поєднання позитивних чинників модульних концепцій дозволить:

– по-перше, забезпечити оптимізацію витрат, як під час побудови кораблів так і протягом їх життєвого циклу (завдяки універсальності носія та уніфікації процесів технічного обслуговування і ремонту);

– по-друге, знайти компромісне рішення між забезпеченням спроможностей країни у розвитку ВМС та утримання сил та засобів для рішення безпекових завдань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 20 серпня 2021 року “Про Стратегічний оборонний бюлетень України”. Указ президента України від 17 вересня 2021 року №473/2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.president.gov.ua/documents/4732021-40121>.
2. Стратегія Військово-Морських Сил Збройних Сил України 2035 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://navy.mil.gov.ua/strategiya-vijskovo-morskyh-syl-zbrojnyh-syl-ukrayiny-2035>.
3. Erikstad S. O. Modularisation in Shipbuilding and Modular Production. – Trondheim (Norwegian University of Science and Technology), Norway, 2009. – 56 p.
4. Babcock team 3. Next-generation frigate for Royal Navy [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://odensemamrtime.com/cases/case1>.
5. Doerry N, Koenig P. Modularity and Adaptability in Future U.S. Navy Ship Designs [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://doerry.org/norbert/papers/20171010%20Doerry-Koenig%20Modularity%20distro%20A.pdf>.
6. Volker Bertram. Modularization of Ships. Report within the Framework of Project “Intermodul” s/03/G IntermareC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pdfcoffee.com/modularization-of-ships-pdf-free.html/>
7. Голиков В. В., Мазур О. Н., Онищенко О. А. Особенности проектирования многоцелевого судна двойного назначения ледового класса. Вісник Нац. техн. ун-ту “ХПІ” зб. наук. пр. сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2016. – № 42 (1214). – С. 29-37.
8. Киристюк О. М. Оцінка можливостей модульних технологій кораблебудування в інтересах ВМС Збройних Сил України / Озброєння і військова техніка. – Київ: НУ Оборони України, 2014. – Вип. 3. – С.44-48

9. США запропонували Україні два фрегати типу Oliver Perry [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://milnavigator.tv/ssha-zaproponuvaly-ukrayini-dva-fregaty-typu-oliver-perry-video>.
10. Клименко А. Блокування портів Маріуполя та Бердянська силами РФ: статистика та тенденції. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.mfa.ua/org/uk/publications/blokuvannia-portiv-mariupolia-ta-berdianska-sylamy-rf-statystyka-ta-tendentsii>.
11. Press release Company Thyssenkrupp AG. Blohm + Voss on the exhibition Pacific 2004 in Sydney [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/blohm---voss-on-the-exhibition-pacific-2004--in-sydney--australien---german-pavilion-2751.html>.
12. Aradu A. Multi-role frigate [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<http://www.military-today.com/navy/aradu.htm>.
13. МЕКО CSL: нјемацки пројект корвете за приобални поја [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hrvatski-vojnuk.hr/meko-csl-njemacki-projekt-korvete-za-priobalni-pojas>.
14. Standard Flex 300 the true multi-role ship. – DanYard, Frederikshavn – Denmark. 1992 – 16 p.
15. Данія готова продати кораблі Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://mil.in.ua/uk/daniya-hotova-prodaty-korabli-ukrayini>.
16. Absalon Class Combat / Flexible Support Ship [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.naval-technology.com/projects/absalon>.
17. Ships And Platforms / Standard flex concept. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://navalteam.dk/ships-and-platforms>.
18. Douglas C Deans. Warships Cost Reductions and Longevity / C Deans Douglas // Indian Defence Review. – 2011. – Vol 26.2, pp. 37-44.
19. Skrunda SWATH@A&R patrol boat. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.abeking.com/en/ship/skrunda>.
20. ВМТ VENATOR-110 Frigate. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://mil.in.ua/uk/daniya-hotova-prodaty-korabli-ukrayini>.
21. Волянська Я., Обнявко Т., Волянський С., Онищенко О. Методика підтримки прийняття "компромісних рішень" при синтезі складних систем різного призначення. Управління проектами та розвиток виробництва: Зб. наук. пр. – 2018. – № 3(67). – С. 5-15.
22. Обнявко Т. С., Онищенко О. А. Визначення ефективності тендерних проєктів у військовій економіці методами економетрики. Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія "Економічні науки", № 9, Ч. 2, 2014. – С. 212-218.
1. On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine dated August 20, 2021 "On the Strategic Defense Bulletin of Ukraine". Decree of the President of Ukraine dated September 17, 2021 No. 473/2021 [Electronic resource]. - Access mode:
<https://www.president.gov.ua/documents/4732021-40121>.
2. Strategy of the Naval Forces of the Armed Forces of Ukraine 2035 [Electronic resource]. – Access mode:
<https://navy.mil.gov.ua/strategiya-vijskovo-morskyh-syl-zbrojnyh-syl-ukrayiny-2035>.
3. Erikstad S. O. Modularisation in Shipbuilding and Modular Production. – Trondheim (Norwegian University of Science and Technology), Norway, 2009. – 56 p.
4. Babcock team 3. Next-generation frigate for Royal Navy [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://odensemaritime.com/cases/case1>.
5. Doerry N, Koenig P. Modularity and Adaptability in Future U.S. Navy Ship Designs [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

- <http://doerry.org/norbert/papers/20171010%20Doerry-Koenig%20Modularity%20distro%20A.pdf>.
6. Volker Bertram. Modularization of Ships. Report within the Framework of Project “Intermodul” s/03/G IntermareC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pdfcoffee.com/modularization-of-ships-pdf-free.html/>
 7. Golikov V. V., Mazur O. N., Onishchenko O. A. Features of the design of a multi-purpose ice-class dual-purpose vessel. Bulletin of the National technical University "KhPI" Coll. of science pap. Ser.: New solutions in modern technologies. – 2016. – № 42 (1214), pp. 29-37.
 8. Kuryzyuk O. M. Evaluation of the capabilities of modular shipbuilding technologies in the interests of the Navy of the Armed Forces of Ukraine. Armament and military equipment. – Kyiv: National University of Defense of Ukraine, 2014. – Vol. 3, pp. 44-48
 9. The USA offered Ukraine two frigates of the Oliver Perry type [Electronic resource]. - Access mode: <https://milnavigator.tv/ssha-zaproponuvaly-ukrayini-dva-fregaty-typu-oliver-perry-video>.
 10. Klymenko A. Blocking the ports of Mariupol and Berdyansk by the forces of the Russian Federation: Statistics and Trends. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mfaua.org/uk/publications/blokuvannia-portiv-mariupolia-ta-berdianska-sylamy-rf-statystyka-ta-tendantsii>.
 11. Press release Company Thyssenkrupp AG. Blohm + Voss on the exhibition Pacific 2004 in Sydney [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/blohm---voss-on-the-exhibition-pacific-2004--in-sydney--australien---german-pavilion-2751.html>.
 12. Aradu A. Multi-role frigate [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.military-today.com/navy/aradu.htm>.
 13. МЕКО CSL: njemački projekt korvete za priobalni poja [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hrvatski-vojniki.hr/meko-csl-njemacki-projekt-korvete-za-priobalni-pojas>.
 14. Standard Flex 300 the true multi-role ship. – DanYard, Frederikshavn – Denmark. 1992, 16 p.
 15. Denmark is ready to sell ships to Ukraine [Electronic resource]. – Access mode: <https://mil.in.ua/uk/daniya-hotova-prodaty-korabli-ukrayini>.
 16. Absalon Class Combat / Flexible Support Ship [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.naval-technology.com/projects/absalon>.
 17. Ships And Platforms / Standard flex concept. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://navalteam.dk/ships-and-platforms>.
 18. Douglas C Deans. Warships Cost Reductions and Longevity. Indian Defence Review. – 2011. – Vol. 26.2, pp. 37-44.
 19. Skrunda SWATH@A&R patrol boat. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.abeking.com/en/ship/skrunda>.
 20. BMT VENATOR-110 Frigate. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mil.in.ua/uk/daniya-hotova-prodaty-korabli-ukrayini>.
 21. Volyanskaya Ya., Obnyavko T., Volyanskiy S., Onishchenko O. Techniques for supporting the adoption of "compromise decisions" in the synthesis of complex systems of various purposes. Project management and production development: Coll. of science pap. – 2018. – № 3(67), pp. 5-15.
 22. Obnyavko T. S., Onishchenko O. A. Determining the effectiveness of tender projects in the military economy using econometric methods. Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Economic Sciences", № 9, Part 2, 2014, pp. 212-218.

Sapiha V. V., Onishchenko O. A., Shumylo O. M.

DEVELOPMENT OF THE MODERN MILITARY AND NAVAL FORCES OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE: MODULAR CONCEPTS

A critical analysis of the classic model of building existing naval fleets is presented. With the help of open sources of information, the article provides an analysis of the types of modular concepts existing in various military fleets of the world. These are the concepts of building ships, vessels of the auxiliary fleet, power plants, etc. Such concepts are actively used in modern shipbuilding. In particular, in the renovation and conversion of ships, design, construction and operation of warships and dual-purpose ships, including autonomous ones. The results of the analysis show that the practical use of modular concepts allows to significantly reduce the negative features of the classic model of fleet construction. For the most widespread types of modular concepts, which use varieties of modular concepts, a brief retrospective of their appearance, the ideology of implementation, the principles of their conceptual and architectural composition and the resources necessary for their creation is given. The thesis that currently existing varieties of modular concepts represent a structurally limited symbiosis of well-known and very complex solutions is substantiated. Based on the analysis of the varieties of modular concepts, in particular, their positive features, the possibility of choosing the optimal (according to the given criteria) their varieties, or a combination of varieties, with the aim of forming promising architectural and compositional outlines of ships and vessels of the auxiliary fleet of the Naval Forces of the Armed Forces of Ukraine is shown.

Keywords: life cycle of the ship, flexible solutions, modernization, conversion, Standard Flex, modular systems, MEKO, integrated quality indicators.

УДК 629.5 656.13

doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.10

Мельник О.В., Сорока В.В., Довгаль І.І.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЗМАЩУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СУДНОВИХ ДИСТИЛЯТНИХ ПАЛИВ

У дослідженні проведено комплексний аналіз, що включає дослідження фізико-хімічних та трибологічних властивостей сумішевих палив, а також проведений моторний експеримент дозволили встановити оптимальну концентрацію ПО в СДП. Вона становить 1-3%. Подальше збільшення вмісту ПО недоцільне, оскільки дає незначний триботехнічний ефект, але при цьому погіршуються фізико-хімічні показники композиційного суднового палива. Проведено моторний експеримент на розроблених сумішевих паливах з додаванням ПО, який засвідчив, що їх застосування в СДВЗ не викликає будь-яких значущих змін параметрів робочого процесу двигуна і вони можуть використовуватися без обмежень. Досліджено натурний стенд для випробування ПНВТ, на якому виконано оцінку стану плунжерних пар ПА при роботі на різних типах СДП. Вимірами шорсткості поверхонь у нанометровому діапазоні методами інтерферометрії високої роздільної здатності встановлено негативний вплив НМДП на стан поверхні плунжерних пар ПНВТ. Додавання ПО до НМДП сприяє покращенню їх змащувальної можливості. Знос плунжера знизився на 63,7% порівняно зі втратою маси деталі, що працювала на вихідному НМДТ, а параметри шорсткості Ra та Rz відповідно зменшилися

у 2,75 та 4,44 разів. Розроблено високоефективну систему паливопідготовки при роботі на НМДТ, яка за рахунок реалізації комплексу науково-технічних заходів дозволяє мінімізувати процес зношування прецизійних пар ПА за рахунок добавки ПО та одночасного охолодження НМДП АБХМ.

Ключові слова: енергетичні установки, математична модель, дистилатні палива, екологічність.

Постановка проблеми. Підвищення вимог до екологічності суднових енергетичних установок (СЕУ) призводить до переходу з важких сірчастих палив до дистилатних палив, з низьким (до 0,5% вмістом сірки). Крім того дистилатні палива є мастильним матеріалом для рухомих деталей паливної апаратури. Надійна робота суднового дизеля багато в чому залежить від ступеня зносу вузлів та агрегатів паливної апаратури (ПА).

Найбільш схильні до зносу прецизійні вузли паливного насоса високого тиску (ПНВТ) та форсунок [1]. Однак численні експерименти та результати експлуатації двигунів з використанням низькосірчастих дистилатних палив виявили високу інтенсивність зношування прецизійних пар ПА. Зниження вмісту сірки в паливі призводить до погіршення їх протизносних властивостей [2, 3], внаслідок чого відбувається збільшення зносу пар тертя ПА двигунів. Крім того, видалення сірки з палива в процесі гідроочищення проводиться до видалення поверхнево-активних речовин (ПАР), які сприяють утворенню змащувальних плівок на поверхні металу.

При експлуатації дизелів на таких паливах йде інтенсивне зношування як плунжера, так і втулки ПНВТ. Зношування цих деталей призводить до збільшення зазорів. При збільшенні зазорів плунжерних пар знижується тиск подача палива, погіршується якість розпилування, порушується регулювання паливного насоса, виникають перебої в роботі двигуна та його зупинка [1, 4].

Існує ряд способів регулювання протизносних властивостей палив відповідно до сучасних вимог. Перший – це застосування спеціальних протизносних присадок. Іншим є покращення триботехнічних характеристик палив за рахунок додавання до дистилату палива олії рослинного походження (рапсова, соєва, соняшникова, пальмова та ін.), біодизеля або мінеральної олії у певних співвідношеннях [2].

Отримання значень даних співвідношень для підвищення екологічності та економічності суднових дизелів і є **метою даного дослідження**

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання роботи автотракторних двигунів внутрішнього згоряння на низькосірчастих ДП та їх впливу на надійність роботи ПА цих дизелів докладно розглянуті у наукових працях учених Т. М. Мітусової, В. Г. Спіркіна, А. М. Данілова, та ряду інших дослідників, а також знайшли своє відображення в роботах зарубіжних вчених, таких як М. А. Hazrat, Р. І. Lacey, D. Cooper, Danping Wei та інших. В результаті виконаних робіт було запропоновано різні шляхи для підвищення надійності роботи та покращення протизносних властивостей дизельного палива.

Питання підвищення експлуатаційної надійності роботи ПА судових двигунів внутрішнього згоряння (СДВЗ) знайшли своє відображення в роботах Л. Б. Леонтєва, Г. Б. Гореліка, Г. С. Юра та ін. Однак ці дослідження не були пов'язані безпосередньо з оцінками впливу суднових низькосірчастих малов'язких дистилатних палив на роботу ПА.

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день існують суперечливі відомості про вплив в'язкості СДП на їхню змащувальну здатність. Відповідно до вимог стандартів на судові бункерні палива (ISO 8217) фізико-хімічні показники СДП повинні відповідати вимогам, зазначеним у табл. 1.

Таблиця 1 – Вимоги до суднових дистилатних палив

Найменування показника	Марка			
	DMX	DMB	DMZ	DMB
Кінематична в'язкість при температурі 40 °С, сСт	1,4–5,5	2,0–6,0	3,0–6,0	2,0–11,0
Масова частка сірки %, не більше	1,0	1,50	1,50	1,50
Щільність при 1,5 °С кг/м ³	–	890,0	890,0	900,0
Змащувальна здатність скоригований ДПЗ при 60 °С, мкм, не більше	520	520	520	520

Як видно з табл. 1, нижня межа в'язкості СДП варіюється в діапазоні від 1,4 до 6 сСт до 6 сСт при температурі 40 °С для марок DMX і DMA. Нова марка DMZ має нижню межу в'язкості 3,0 сСт при температурі 40 °С [7].

У зв'язку з погіршенням протизносних СДП були поставлені завдання встановити залежність змащувальної здатності СДП з низьким вмістом сірки від в'язкості, а також визначити її нижнє граничне значення, що забезпечує задовільну змащувальну здатність.

З метою оцінки впливу в'язкості на протизносні властивості СДП були досліджені зразки палив з різною в'язкістю, які незначно відрізняються як за вмістом сірки, так і за іншими показниками. Результати експериментальних досліджень СДП на чотирикульковій машині тертя представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Діаметр плями зносу різних зразків

№ зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
В'язкість, сСт	7,26	6,82	5,64	5,43	5,14	4,40	3,39	3,06	2,82	2,76	2,58	1,93	1,90
ДПЗ, мкм	433	463	438	400	443	464	496	437	580	445	492	592	683

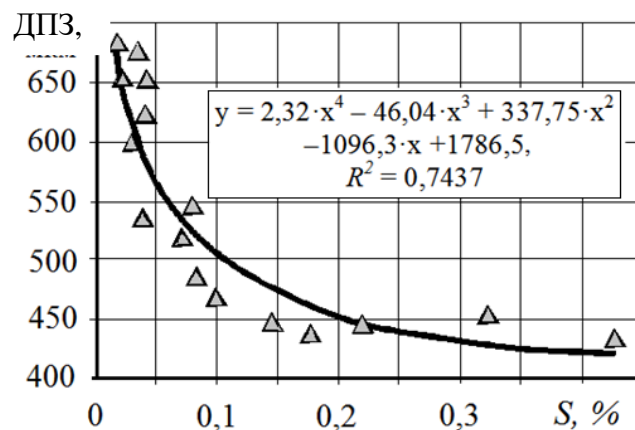


Рисунок 1 – Залежність ДПЗ від в'язкості СДП

Отримані експериментальні дані показують, що коефіцієнт детермінації рівняння кореляції між ДПЗ та в'язкістю досить високий і становить $R^2 = 0,744$, що вказує на те, що в'язкість СДП істотно впливає на його змащувальну здатність.

Зі зменшенням в'язкості палива з 7,26 до 1,9 сСт ДПЗ збільшується з 433 до 682 мкм (рис. 1). Це пов'язано з тим, що більш в'язкі палива містять більшу кількість природних поверхнево-активних речовин, ніж мало-в'язкі, що покращує умови тертя та зношування.

Проте, вплив в'язкості СДП на його трибологічні характеристики стає вкрай незначним, якщо величина цього показника перевищує 3 сСт. Зменшення в'язкості призводить до зниження товщини мастильного шару між сполученими поверхнями, що змінює режим змащення від рідинного до граничного, тому і зростає величина ДПЗ.

В'язкість палива нижче 3 сСт серйозно впливає на ресурс і надійність роботи паливних насосів високого тиску. Коли в'язкість палива дуже низька, гідродинамічна змащувальна плівка в плунжерних парах суднових ПНВТ може бути недостатнім, в результаті чого йде підвищений знос і виникають задирки ПНВТ [7].

При розробках технологій виробництва низькосірчастих СДП велика увага приділяється вивченню розподілу сіркоорганічних сполук в залежності від інтервалу температур кипіння нафтових і газоконденсатних фракцій і реакційної здатності окремих сірчастих з'єднань.

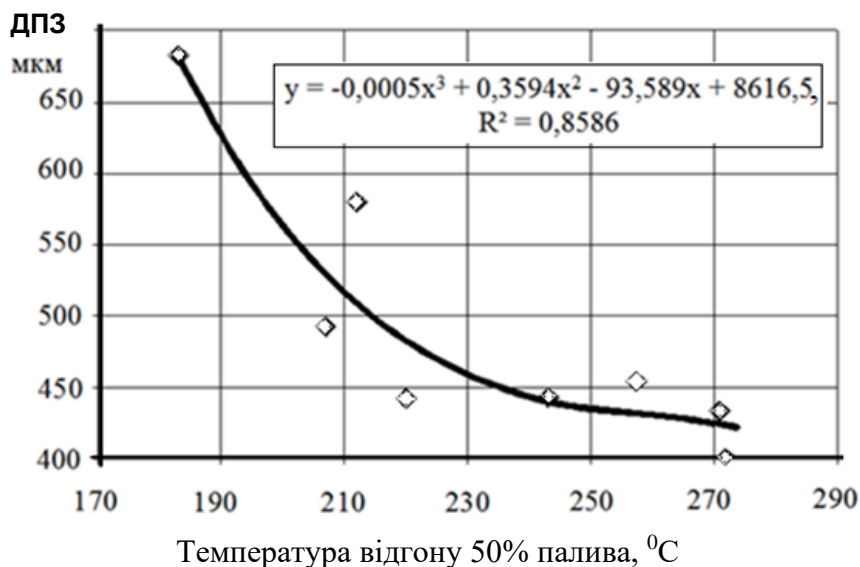


Рисунок 2 – Залежність ДПЗ від температури відгону 50% палива

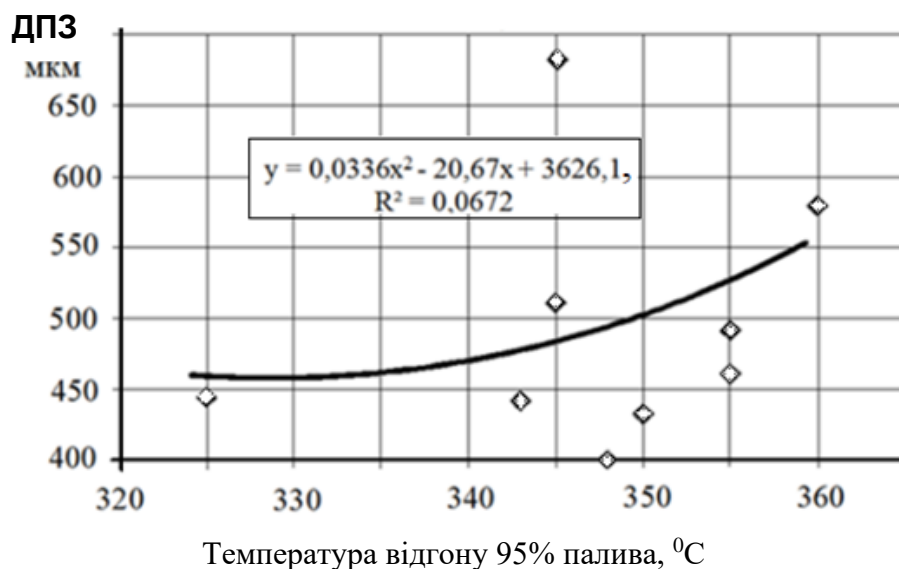


Рисунок 3 – Залежність ДПЗ від температури відгону 95% палива

На протизносні властивості СДП великий вплив має не лише вміст сірки, а й фракційний склад, який визначається двома показниками: температура відгону 50% та 95%

палива. Як встановлено в результаті експериментального моделювання, перший з аналізованих показників надає значний вплив на величину ДПЗ [7].

Зі зниженням температури відгону 50% палива ДПЗ значно збільшується (рис. 3). Зниження точки 50% відгону палива пов'язане зі зменшенням в СДП гетероатомних сполук і ароматичних вуглеводнів, в результаті чого відбувається полегшення фракційного складу, а це викликає погіршення триботехнічних характеристик СДП.

Експерименти також проводилися для СДП з різним значенням щільності. Залежність ДПЗ від щільності представлена на рис. 4.

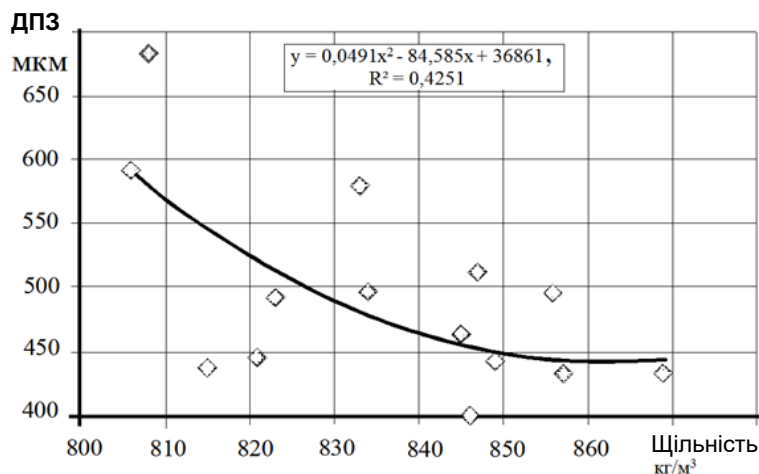


Рисунок 4 – Залежність ДПЗ від щільності СДП

Між щільністю та протизносними властивостями ДП взаємозв'язку не виявлено (рис.4). Квадрат коефіцієнту множинної кореляції має для цього показника досить низьке значення. Однак можна стверджувати, що добрі протизносні властивості мають палива з щільністю більше 850 кг/м³ при 20 °С [7].

Були проаналізовані фактори, що впливають на протизносні властивості СДП. Встановлено, що визначальними є в'язкість та вміст сірки. Всі інші показники СДП практично не впливають на їхню змащувальну здатність. Проте в реальності в пробах палива СДП, що надходять для дослідження, відсутнє поєднання щодо високої в'язкості з низьким вмістом сірки. Для того, щоб охопити всі області факторного простору потрібно розробити і відпрацювати методику знесірювання СДП, з тим щоб можна було отримати високов'язкі палива з низьким вмістом сірки.

Були проаналізовані різні методи знесірювання і проведений вибір найбільш ефективної та реалізованої в лабораторних умовах методики з тим, щоб досягти різних поєднань факторів, що впливають на змащувальну здатність СДП.

Сірка вважається одним із найважливіших гетероелементів нафти через її велику поширеність і широке коло ефектів, що викликаються наявністю сіркоорганічних сполук у сирих нафтах і нафтопродуктах. В елементному складі нафт сірка може містити від 0,2 до 8% мас., іноді до 10% мас. і навіть 14% мас. (нафти США, штат Юта). Сірковмісні сполуки в нафті нерівномірно розподілені за її фракціями і зазвичай їх вміст збільшується з підвищенням температури кипіння [8].

У складі СДП, сполуки сірки (СС) представлені меркаптанами, дисульфідами сульфідами, гомологами та бензолами тіофену. У фракції 200-360 ° С міститься до 7,33% їх маси [8, 9, 10].

У СДП зустрічаються такі сульфіди:

- 1) аліфатичні (ді-н-бутил сульфід, ді-н-гексил сульфід, ді-(2,4-диметилбутил)-сульфід та ін.);
- 2) ароматичні (етилфенілсульфід, дибензилсульфід, дифенілсульфід та ін.);
- 3) жирноароматичні (наприклад, бензилфенілсульфід);
- 4) циклічні сульфідні – тіациклани (тіациклопентан, тіациклогексан, тіациклогептан та ін. та їх алкіл-і алкілпохідні), що містять у своєму складі 1-4 цикли.

Основні способи видалення сірчистих сполук з СДП можна розділити на дві групи: каталітичне знесірчування нафтопродуктів і некаталітичні способи.

Гідрознесірчування засноване на гідруванні СС у середовищі водню на каталізаторах з утворенням сірководню та вуглеводнів. Цей метод використовується для усіх нафтопродуктів від бензинів до котельного палива. Технологічні режими та каталізатори, що використовуються при гідроочищенні, залежать від складу сірчистих сполук та їх вмісту у нафтопродуктах. Процес ведуть при 350-450 °С та 2,5-20 МПа. Як каталізатори використовують оксиди або сульфідні кобальту, молібдену, нікелю, заліза на окиси алюмінію.

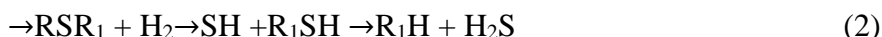
Принциповий механізм утворення первинних продуктів при гідрогенолізу сірчистих сполук відомий лише для простих сполук. Меркаптани руйнуються через зв'язок С-S з утворенням сірководню, вуглеводню, сульфідів [11]:

меркаптани:

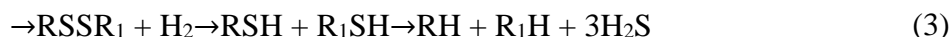


Сульфідні та дисульфідні гідруються через стадію утворення меркаптанів. У циклічних сульфідних сполуках спочатку руйнується кільце, потім відщеплюється сірководень і утворюється відповідний вуглеводень. Тіофен, бенз- і дибензтіофен спочатку гідруються до похідних тетрагідротіофену, які потім перетворюються на алкани і алкілпохідні аренив:

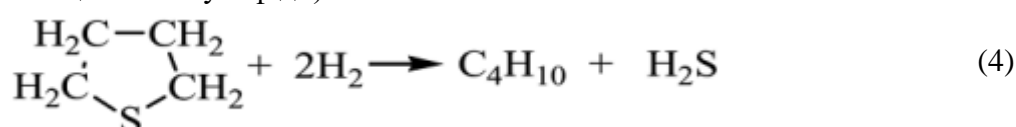
сульфідні:



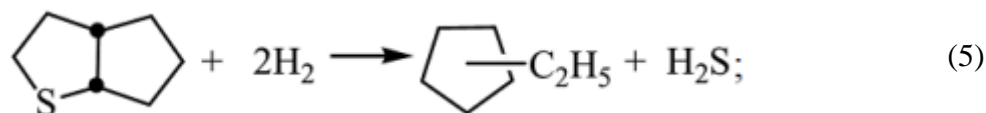
дисульфідні:



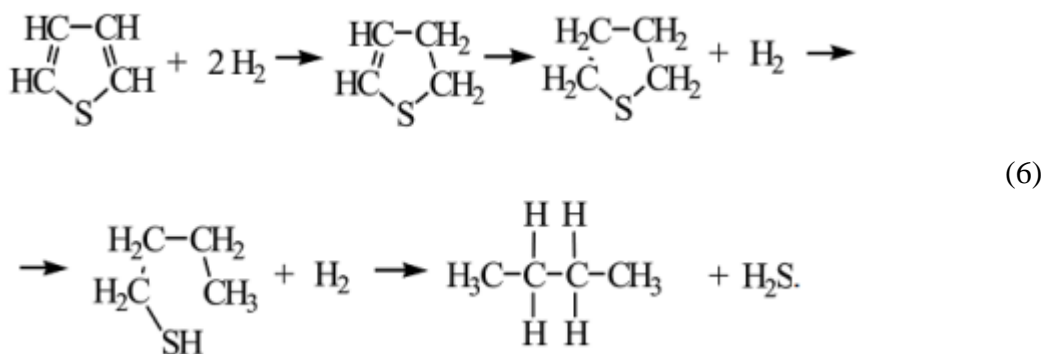
тіофани (моноциклічні сульфідні):



біциклічні сульфідні:



тіофени:



Стійкість сірчистих сполук зростає у ряду: меркаптани – дисульфіди – сульфіді – тіофани – тіофени [12].

У процесах гідронессіювання, що проводяться на сучасних сульфідованих алюмокобальтмолібденових або алюмонікельмолібденових каталізаторах, меркаптани, сульфіді, дисульфіди, тіофени та бензтіофени видаляються, отже моторні дистилати, що містять сполуки сірки тільки цих типів, можуть бути досить глибоко очищені від них, причому тіофени і бензтіофени легко розщеплюються [12].

Проте у зв'язку з тим, що гідроочищення є дорогим процесом, потрібна підвищена витрата водню (співвідношення водень – сировина зазвичай становить 300–600:1), потрібне високоякісне обладнання, високий тиск та температура, каталізатори: реалізувати його в лабораторних умовах неможливо.

Лужне очищення застосовується для видалення СС (переважно H_2S нижчих меркаптанів) із бензино-лігроїнових фракцій. Сірководень реагує з утворенням кислих та середніх солей. Меркаптани утворюють при взаємодії з лугом меркаптиди. До недоліків лужного очищення слід віднести безповоротну втрату дорогого реагенту та утворення побічних продуктів, які важко утилізуються [20]. Крім того, цей метод не застосовується до СДП.

Сутність методу полягає в тому, що сировину у спеціальному апараті змішують із екстрагентом. Під впливом сил тяжіння або відцентрових сил екстрактна та рафінатна фази розшаровуються. З екстрактної фази виділяють (екстрагують) розчинену в ній речовину. Екстрагент повертають на змішання з новою порцією сировини. У лабораторних умовах з ДП екстракцією діетиленгліколем виділені сірчисті з'єднання разом з ароматичними. За розрахунками, витрати на отримання 1 тони ДП (даним способом), що містить 0,2% мас. загальної сірки, вдвічі менше, ніж при гідроочищення [8]. Запропоновано ряд екстракційних способів знесірювання палив з використанням як розчинників ацетон-етанольних сумішей, суміші тетраетиленгліколю з метокситригліколем, азотовмісних речовин та інших екстрагентів [2]. Ці способи дозволяють знизити вміст сірки у продукті на 50-90%.

В роботі [8] наведено спосіб десульфуризації з використанням іонних рідин (солей з кватернізованими атомами азоту в катіоні, що плавляться при температурі нижче за кімнатну). Іонна рідина не переходить у ДП навіть у слідових кількостях. В даному методі селективність екстракції сульфоксидів у 3-4 рази вище, ніж сульфонів, і в 10-20 разів вище, ніж сульфідів.

Даний метод так само не застосовується, оскільки вимагає спеціалізованого обладнання. Для можливості ефективного використання СДП необхідна оперативна оцінка їх протизносних властивостей. Метою проведених досліджень є виявлення основоположних фізико-хімічних показників, що визначаються при стандартному лабораторному аналізі, які впливають на змашувальну здатність СДП, і отримання

експериментальної моделі взаємозв'язку між цими показниками й змащувальною здатністю СДП.

В результаті проведених лабораторних досліджень здійснено відбір факторів, пов'язаних з триботехнічними властивостями СДП. Встановлено, що найбільший вплив на змащувальну здатність СДП надає вміст сірки S та в'язкість ν . Всі інші показники СДП або чинять несуттєвий вплив, або взагалі не впливають на їх протизносні властивості.

Область факторного простору для ν знаходилася в діапазоні від 0,93 до 6,25 сСт, а для S становила 0,017-0,22% мас. Експериментальні дані охоплюють практично весь можливий діапазон характеристик СДП.

Виконати планування експерименту та реалізувати його в нашому випадку неможливо, тому що необхідного поєднання факторів S і ν досягти навіть при використанні методики окисного знесірювання не вдається. Домогтися точного влучення в точки факторного простору з жорстко заданим поєднанням S та ν неможливо. Тому використовували пасивний експеримент, а обробки експериментальних даних застосовували різного виду нелінійні регресійні моделі.

Аналіз апріорної інформації дозволив вибрати кілька моделей апроксимації, які були досліджені:

– степенева:

$$\text{ДПЗ} = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2}$$

– показова:

$$\text{ДПЗ} = b_0 b_1^{x_1} b_2^{x_2}$$

– експоненційна:

$$\text{ДПЗ} = e^{(b_1 x_1^{c_1} + b_2 x_2^{c_2})}$$

– поліноміальна:

$$\text{ДПЗ} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2,$$

де ДПЗ – діаметр плями зношування; b_0, b_1, \dots, b_5 – коефіцієнти регресії; c_1, c_2 – ступінь коефіцієнта.

Обробка експериментальних даних здійснювалася у програмі Математика. Результати обчислювального експерименту у вигляді різних типів нелінійних регресійних моделей представлені нижче:

– степенева:

$$\text{ДПЗ} = 351,5401 * S^{-0.1875} * \nu^{-0.06144};$$

– показова:

$$\text{ДПЗ} = 744,8906 * 0,10917^S * 0.96337^\nu;$$

– експоненційна:

$$\text{ДПЗ} = e^{(4.6142 * S^{-0.03655} + \nu^{-0.04333})};$$

– поліноміальна:

$$\text{ДПЗ} = 808,536 - 3704,785 S - 20,486\nu + 28,817S\nu + 10667,460S^2.$$

Адекватність експериментальних моделей оцінювали за такими критеріями: відносна середня помилка апроксимації A , коефіцієнт детермінації R^2 , критерій Фішера F [13].

Фактичні значення результативної ознаки відрізняються від теоретичних, розрахованих за рівнянням регресії. Величина відхилень по кожному спостереженню є помилкою апроксимації. Їх число відповідає обсягу сукупності k . В окремих випадках помилка апроксимації може виявитися рівною нулю. Для порівняння використовуються величини відхилень, виражені у відсотках до фактичних значень.

Середня помилка апроксимації A показує відсоткове значення відхилення розрахункових значень від експериментальних:

$$A = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y - y_t}{y} \right| \cdot 100\% \quad (7)$$

де n - кількість досліджень; y - результативне експериментальне значення; y_t - розрахункове значення.

Якщо $A \leq 5\%$, то вважається, що модель має достатньо високу точність, при від 5 до 10% точність моделі гарна, при 10-15% - задовільна, а більш 15 - незадовільна.

Найбільш ефективною оцінкою адекватності регресійної моделі, мірою якості рівняння регресії, характеристикою прогностичної сили аналізованої регресійної моделі є коефіцієнт детермінації, визначаємо за формулою:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_t - \bar{y}_t)^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (8)$$

Коефіцієнт детермінації показує частку варіації результативної ознаки, що знаходиться під впливом вивчаємих факторів, тобто визначає, яка доля варіації ознаки у врахована в моделі і обумовлена впливом на нього факторів. Чим ближче до 1, тим вище якість моделі [13].

Оцінка значимості рівняння регресії в загалом виробляється на основі F - критерія Фішера, яка передуює дисперсійний аналіз. Згідно основної ідеї дисперсійного аналізу, загальна сума квадратів відхилень змінної y від середнього значення \bar{y} у розкладається на дві частини - «пояснену» та «не пояснену» [9]:

$$\sum (y - \bar{y})^2 = \sum (\bar{y}_t - \bar{y})^2 + \sum (y - \bar{y}_t)^2 \quad (9)$$

де $\sum (y - \bar{y})^2$ - загальна сума квадратів відхилень; $\sum (\bar{y}_t - \bar{y})^2$ сума квадратів відхилень, пояснена регресією (або факторна сума 12-ти квадратів відхилень); $\sum (y - \bar{y}_t)^2$ остаточно сума квадратів відхилень, що характеризується впливом неврахованих в моделі факторів. Схема дисперсійного аналізу має вигляд, який представлений в табл. 3 (n - кількість спостережень, m - число параметрів).

Таблиця 3 - Схема дисперсійного аналізу

Компоненти дисперсії	Сума квадратів	Число ступенів свободи	Дисперсія на одну ступінь свободи
Загальна	$\sum (y - \bar{y})^2$	$n-1$	$S_{\text{зар}}^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n-1}$
Факторна	$\sum (\bar{y}_t - \bar{y})^2$	m	$S_{\text{фак}}^2 = \frac{\sum (\bar{y}_t - \bar{y})^2}{m}$
Остаточна	$\sum (y - \bar{y}_t)^2$	$n - m - 1$	$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y - \bar{y}_t)^2}{n - m - 1}$

Визначення дисперсії на одну ступінь свободи призводить дисперсію до порівнювального вигляду (ступені свободи - це числа, які показують кількість елементів варіювання, які можуть приймати довільні значення, які не змінюють задані характеристики). Зіставляючи факторну та залишкову дисперсії в розрахунку на одну ступінь свободи, отримаємо величину F - критерія Фішера:

$$F = \frac{S_{\text{факт}}^2}{S_{\text{ост}}^2} \quad (10)$$

Величина F – критерія у нелінійній парній регресії, яка пов'язана з індексом детермінації:

$$F = \frac{R^2/k}{(1 - R^2)/(n - m - 1)} \quad (11)$$

Фактичне значення часткового F -критерія порівнюється з табличним $F_{\text{табл}}(\alpha; k_1; k_2)$ при рівні значимості α та числі ступенів свободи: $k_1 = m$ та $k_2 = n - m - 1$. Розраховане значення F -критерія визначається достовірним, якщо воно більше табличного, тобто $F_{\text{роз}} > F_{\text{табл}}$. В цьому випадку висунута гіпотеза відхилена та робиться висновок про суттєвість статичного зв'язку між ДПЗ та значеннями вмісту сірки й в'язкості. Якщо $F_{\text{роз}} < F_{\text{табл}}$, то рівняння регресії вважається статично значущим і зв'язок між цими факторами і результатами відсутній.

Таблиця 4 – Узагальнена характеристика математичної моделі

Модель	Коефіцієнт детермінації R^2	Середня помилка апроксимації A	Критерій Фішера F
Статична регресійна модель	0,751	7,14	18,17
Показова регресійна модель	0,671	0,671	0,671
Експоненційна регресійна модель	0,741	0,741	0,741
Поліноміальна регресійна модель	0,856	0,856	0,856

Аналіз даних табл. 4 свідчить, що найбільш високі значення показників якості моделі знаходяться у поліноміальній регресійній моделі. Так коефіцієнт детермінації R^2 має 0,856. Середня помилка апроксимації цієї експериментальної моделі дорівнює 4,39%, а критерій Фішера майже в 10 разів вище табличного.

На підставі цього можна робити висновок, що дана модель найбільш повно описує зв'язок між змащувальною здатністю СДП та його показниками - в'язкістю й вмістом сірки, тому вона обрана для подальшого дослідження. Показники якості інших моделей, як це свідчать дані у табл. 7, значно гірше.

Графічна ілюстрація поверхні відгуку, отриманої нелінійної багатофакторної експериментальної регресійної моделі зміни величини ДПЗ від S та v , представлена на рис. 5. Отримана поверхня відгуку дозволяє визначити значення ДПЗ у будь-якій точці вибраного факторного простору.

Як видно з графіка, значення ДПЗ зменшується зі збільшенням вмісту сірки та в'язкості СДП. Навпаки, при зменшенні вмісту сірки або в'язкості значення ДПЗ збільшується, тобто погіршується змащувальна здатність палива. Величина ДПЗ значно збільшується, коли концентрація сірки в СДП менше 0,05% мас., а в'язкість менше 2 сСт. У зв'язку з цим при такому поєднанні параметрів необхідні спеціальні заходи для покращення змащувальної здатності НМДП.

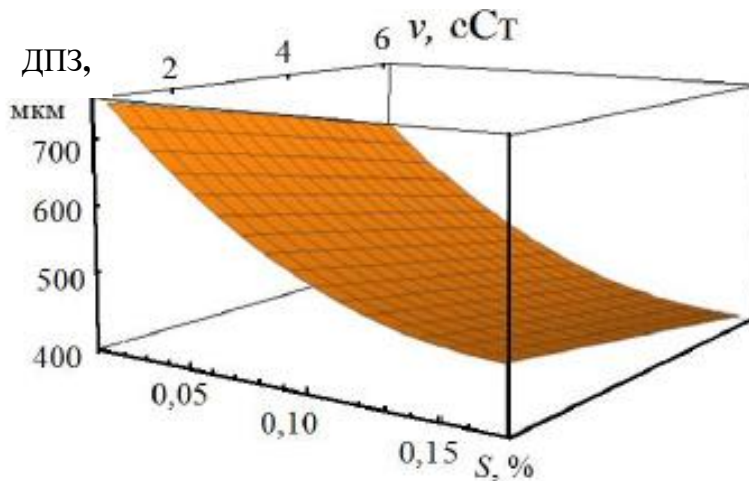


Рисунок 5 – Факторна модель

На підставі отриманої нелінійної регресійної моделі змащувальної здатності СДП можна оцінити вплив величини v та S на інтенсивність зношування плунжерних пар ПА.

Як слідує з результатів виконаного моделювання, найбільший вплив на величини ДПЗ надає вміст сірки. При її зниженні з 0,15 до 0,02% інтенсивність зношування значно зростає.

Величина ДПЗ збільшується в 1,52 рази за фіксованого значення в'язкості. У той же час ДПЗ знижується в 1,14 рази при вмісті сірки в паливі, що дорівнює 0,02% та збільшення в'язкості з 1,5 до 6 ст.

Це не компенсує змащувальної здатності, обумовленої зниженням вмісту сірки в СДП, але тим не менш, за рахунок цього можна зменшити величину зносу деталей ПА. Тому в експлуатації слід рекомендувати додатково проводити охолодження палива перед ПА з тим, щоб максимально збільшити значення СДП.

При аналізі експериментальних даних, що задаються набором N пар $\{x_i; y_i\}$, розглянемо таку проблему: у припущенні монотонної теоретичної залежності регресійної функції $y(x; p_1, p_2)$ на досліджуваному інтервалі потрібно знайти критичну точку $x_{\text{крит}}$, на околицях якої вплив x на y починає істотно зростати. (x – це вміст сірки в паливі при фіксованому значенні в'язкості СДП, а y – ДПЗ).

Це завдання актуальне під час розгляду процесу, перебіг якого описується величиною y , що характеризує задовільний або критичний режим зношування. Ця величина y свою чергу істотно залежить від деякої величини x , що описує колективний ефект зовнішніх впливів на процес, а також деяких додаткових параметрів $\{p_1; p_2\}$, якими є величина в'язкості. Як правило, в цих випадках околиця $x_{\text{крит}}$ відповідає перехідній області між критичним та задовільним режимами протікання процесу зношування, і пошук $x_{\text{крит}}$ стає дуже актуальним завданням. Очевидно, для різних залежностей $y(x)$ методики пошуку таких критичних точок можуть суттєво відрізнятися. В разі, коли похідна $y'(x)$ також монотонна на допустимому інтервалі $[a; b]$, в якості такого критерію можна вибрати умову мінімуму радіусу кривизни:

$$R = \frac{(\sqrt{1 + (y'')^2})^3}{y^n} \quad (12)$$

з лінії тренду $y(x)$. Наприклад, в окремому випадку експоненціальної залежності: $y(x) = A \exp(-\alpha x)$ маємо $x_{\text{крит}} = \frac{1}{\alpha} \ln(\sqrt{2} \alpha A)$. Однак навіть цей простий приклад показує, що якщо параметри регресії такі, що $\alpha A < 1/\sqrt{2}$, виходить: $x_{\text{крит}} < 0$, а якщо величина x

може приймати тільки позитивні значення, то критерій мінімуму кривизни тут не спрацює, оскільки $x_{\text{крит}} \notin [a; b]$

Ефективним першим кроком у пошуку $x_{\text{крит}}$ є розбиття набору попередньо впорядкованих за зростанням x експериментальних пар значень $\{x_i; y_i\}$, $i = \overline{1, N}$ на два піднабори A та B зі значеннями індексів $1 \leq i_A \leq N_A$ і $N_B \leq i_B \leq N$, де в загальному випадку, крім варіанта не пересікаються піднаборів ($N_B = N_A + 1$), слід також розглянути варіанти з декількома спільними парами у перетині піднаборів, коли $N_A \geq N_B$.

На наступному кроці обмежимося лінійними апроксимаціями для кожного з піднаборів:

$$y_A = k_A x + b_A; y_B = k_B x + b_B \quad (13)$$

де регресійні параметри $\{k_A; b_A\}$ та $\{k_B; b_B\}$ знаходяться за методом найменших квадратів для кожного з піднаборів. В якості основного критерію при порівнянні різних розбиттів виберемо загальне відхилення $S_{\{A;B\}}$ експериментальних значень від регресійної залежності, яке розраховується за формулою:

$$S_{\{A;B\}} = \sqrt{S_A^2 + S_B^2};$$

$$S_A = t_{N_A; 0.95} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_A} (y_i - k_A x_i - b_A)^2}{N_A (N_A - 1)}};$$

$$S_B = t_{N_B; 0.95} \sqrt{\frac{\sum_{i=N_B}^N (y_i - k_B x_i - b_B)^2}{(N - N_B) (N - N_B + 1)}} \quad (14)$$

де $t_{N, 0.95}$ - коефіцієнт Стюдента при заданій довірчій ймовірності 0,95, необхідний для корекції величини відхилення при малій кількості N експериментальних точок. Тут S_A і S_B мають сенс відхилень експериментально спостережуваних даних від лінійних трендів (3.12) для відповідних піднаборів.

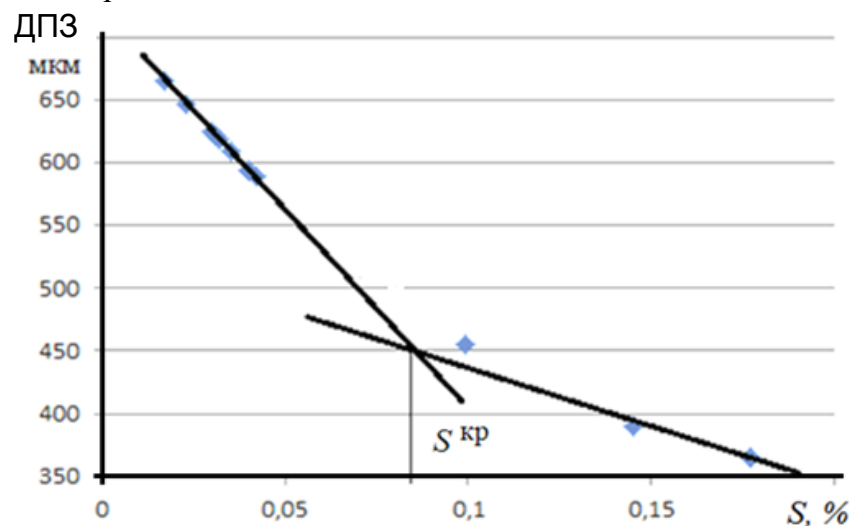


Рисунок 6 – Розподіл експериментальних точок

На заключному етапі з усіх можливих розбиттів із заданою кількістю загальних пар виберемо варіант з найменшим значенням $S_{\{A;B\}}$ та відповідними регресійними

параметрами $\bar{k}_A, \bar{b}_A, \bar{k}_B, \bar{b}_B$. Тоді шукана величина $x_{\text{крит}}$ може бути оцінена співвідношенням:

$$x_{\text{крит}} = \frac{\bar{b}_B - \bar{b}_A}{\bar{k}_A - \bar{k}_B} \quad (15)$$

На рис. 7 наведена графічна інтерпретація застосування цього методу до конкретного набору даних, отриманих при аналізі СДП при фіксованому значенні в'язкості СДП.

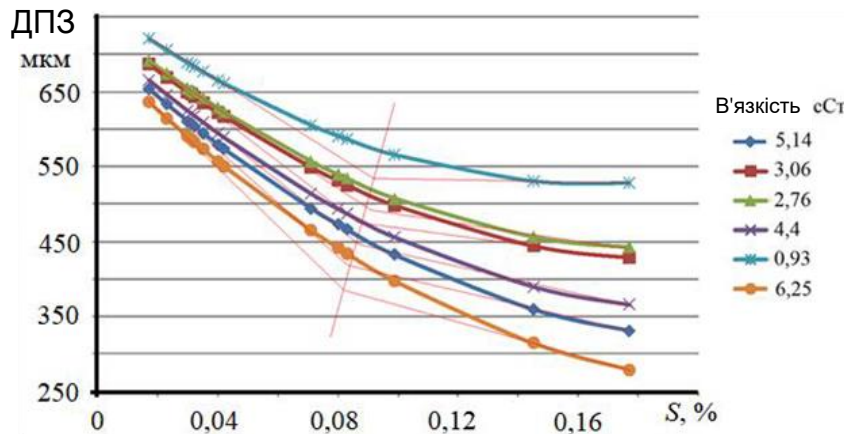


Рисунок 7 – Залежність ДПЗ від S при фіксованому v

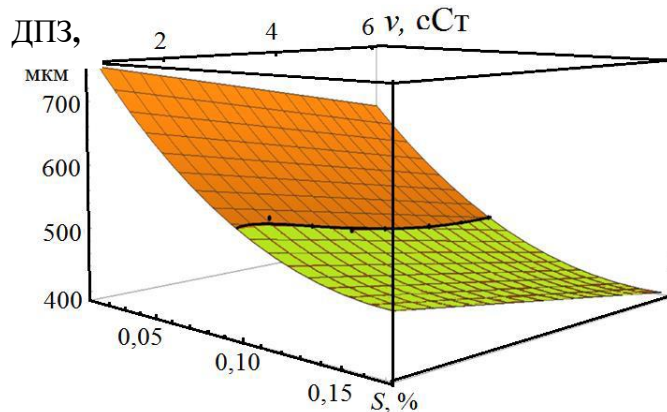


Рисунок 8 – Зони протікання процесу зношування

За цим методом було оброблено відібрані для аналізу дані. На рис. 8 представлено сімейство кривих залежності ДПЗ від вмісту сери при фіксованому значенні в'язкості. Для кожної кривої отримано значення критичної точки $S_{\text{крит}}$ при відповідному значенні в'язкості.

Таким чином, розрахований набір параметрів S і v, що забезпечують розподіл області факторного простору на дві зони – задовільного та критичного перебігу процесу зношування. Їх перенесення на площину, отриману в результаті розрахунку за розробленою моделлю і розділив її факторний простір на дві шукані зони (рис. 8).

Висновки. В результаті проведеного експериментального моделювання встановлено вплив різних показників якості СДП на їх протизносні властивості. Виявлено, що найбільший вплив на триботехнічні характеристики СДП надає його в'язкість і вміст у

ньому сірки. Фракційний склад і значення щільності надає несуттєвий вплив на змащувальну здатність палива.

2. Виконаний аналіз різних методів знесірювання встановив, що в лабораторних умовах для видалення сірчистих сполук СДП найбільш раціональним є використання методу окислювального знесірювання.

3. Застосування методу окисного знесірювання дозволило досягти 90% зниження вмісту сірки в СДП. Для регулювання концентрації сірки в паливі експерименти можна проводити при різних молярних співвідношеннях і часі окислення, що дозволяє отримати зразки палива з різним вмістом сірки для подальших досліджень.

4. Проаналізовано різні види нелінійних багатофакторних регресійних моделей. Встановлено, що за показниками якості найкращі результати досягнуті при застосуванні нелінійної поліноміальної регресійної моделі. Розроблена експериментальна нелінійна поліноміальна регресійна модель змащувальної здатності СДП має високий рівень достовірності, що підтверджується відповідним критерієм адекватності.

5. За допомогою розробленої експериментальної моделі ідентифікації функції змащувальної здатності СДП було знайдено закономірності, що описують ступінь зміни протизносних властивостей при зменшенні вмісту сірки та в'язкості у СДП. Встановлено, що вміст сірки в СДП має найбільший вплив на величину ДПЗ.

6. Розрахований набір параметрів S та v , що забезпечують розподіл області факторного простору на дві зони – задовільного та критичного перебігу процесу зношування. При поєднанні параметрів S та v СДП, що знаходяться в критичній зоні, необхідно проводити спеціальні заходи для поліпшення змащувальної здатності СДП в умовах експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cooper, D. Laboratory screening tests for low sulfur diesel fuel lubricity / D. Cooper // *Lubricity Scientific*. – 1995. – 7(2). – P. 133–148.
2. Galbraith Rob M. C. The ROCLE test for diesel and biodiesel fuel lubricity / Galbraith Rob M. C, Hertz P. Barry // *Soc. Automot. Eng.*, [Spec. Publ.], SP 1997, SP-1303, P. 61 – 66.
3. Занько О. Н. Технология использования рабочих веществ в судовых энергетических установках / О. Н. Занько, В. Н. Калугин, И. В. Логишев. – Одесса : Фенікс, 2005. – 508 с.
4. Wang, J. Predicting Lubricity of Low Sulfur Diesel Fuel / J. Wang, C. Cusano // *SAE Technical Paper*, 1995. – 10 p.
5. Cooper, D. Laboratory screening tests for low sulfur diesel fuel lubricity / D. Cooper // *Lubricity Scientific*. – 1995. – 7(2). – P. 133–148.
6. Danping Wei. The lubricity of diesel fuels / Danping Wei, H. A. Spikes // *Wear*, 111 (1986) 217–235. 135 Demirbas A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*. – 2009(50). – P. 14–34.
7. Danping Wei. The lubricity of diesel fuels / Danping Wei, H. A. Spikes // *Wear*, 111 (1986) 217–235. 135 Demirbas A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*. – 2009(50). – P. 14–34.
8. Corrosion attacks on marine centrifuges used in fuel operation / Alfa Laval, Bulletin № 32390, 2016. – 3 p.
9. Hazrat, M. A. Lubricity Improvement of the Ultra-low Sulfur Diesel Fuel with the Biodiesel / M. A. Hazrat, M. G. Rasul, M. M. K. Khan // *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE*. – 2015. – P. 111–117.

10. Спиркин В.Г. Экологические проблемы применения топлив с присадками / В.Г. Спиркин, И.И. Ткачев, П.А. Татарышкина // Вестник национального авиационного университета. – 2009. – Т. 1. – № 38. – С. 68-79.
11. Zabloysky Yu. V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of Marine Diesel When using Fuel Additives / Yu. V. Zabloysky, S. V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol 9(46). – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.
12. Guoxian, Yu. Oxidative desulfurization of diesel fuels with hydrogen peroxide in the presence of activated carbon and formic acid / Shangxiang Lu, Hui Chen, Zhongnan Zhu // Energy&Fuels. – 2005. – V. 19. – P. 447–452.
13. Пеэ Дэсин. Биодизель для улучшения смазывающих свойств дизельных топлив с низким содержанием серы / Дэсин Пеэ // Химия и технология топлив и масел. – 2016. – № 6. – С. 46-48.

Melnik O., Soroka V., Dovhal I.

MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE LUBRICATING CAPACITY OF SHIP DISTILLATE FUELS

In the study, a comprehensive analysis was carried out, including the study of the physio-chemical and tribological properties of mixed fuels, as well as the conducted motor experiment, which made it possible to establish the optimal concentration of PO in SDP. It is 1-3%. A further increase in the PO content is impractical, as it gives an insignificant tribotechnical effect, but at the same time, the physical and chemical indicators of the composite marine fuel deteriorate. An engine experiment was carried out on the developed mixed fuels with the addition of PO, which proved that their use in SDVZ does not cause any significant changes in the parameters of the engine's work process and they can be used without restrictions. A full-scale test stand for PNVT was studied, on which the condition of PA plunger pairs was evaluated when working on different types of SDP. Measurements of surface roughness in the nanometer range using high-resolution interferometry methods established the negative influence of NMDP on the surface condition of PNVT plunger pairs. Adding PO to NMDP helps to improve their lubricating ability. Plunger wear decreased by 63.7% compared to the mass loss of the part working on the original NMDT, and the roughness parameters Ra and Rz decreased by 2.75 and 4.44 times, respectively. A highly efficient system of fuel preparation during work at NMDT has been developed, which, due to the implementation of a complex of scientific and technical measures, allows to minimize the process of wear of precision PA pairs due to the addition of PO and simultaneous cooling of NMDP ABHM.

Keywords: power plants, mathematical model, distillate fuels, environmental friendliness.

Ганношина І.М., Калініченко Т.В., Нікітін П.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ РУХУ, ПОШУКУ ТА СУПРОВОДЖЕННЯ МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ

У ході дослідження систематизовано проблеми, здійснено класифікацію методів пошуку та супроводження об'єктів на морі, які дозволяють виділити часткові та загальні підходи вирішення пошукових завдань у різних умовах з метою формалізації моделей пошукових процесів і процесів. Проведено дослідження методів пошуку, введено поняття пошукової одиниці, проведено теоретично-множинне обґрунтування районів та умов пошуку. Обґрунтовано доцільність та розроблено технології множинного аналізу формування навігаційної обстановки, районів та умов пошукових операцій як універсального математичного апарату планування пошукових дій та супроводження об'єктів пошуку. Розроблені принципи імовірнісної оцінки пошукових процесів. Теоретичним дослідженням та комп'ютерним моделюванням методів пошуку та супроводження морських динамічних об'єктів встановлено найбільш придатні роздільні за параметрами та комбіновані моделі супроводження та прогнозування руху об'єкта пошуку з оцінкою дій дрейфу, течії. Обґрунтовано доцільність та апробовано алгоритми згладжування та оцінювання кінематичних елементів руху об'єкта, що супроводжується часовим рядом вимірювань з використанням експоненційного фільтра за трьома вимірам з адаптацією за поточними вимірами. Розроблено технологію фільтрації та оцінювання кінематичних елементів руху та супроводження об'єкта, на підставі α та β -фільтра та сформовано алгоритми адаптації коефіцієнтів α та β -фільтра за поточними вимірюваннями параметрів.

Ключові слова: *методи, прогнозування, пошук, супроводження, морські динамічні об'єкти.*

Завдання пошуку та супроводження морських об'єктів має багатоаспектне значення як в теорії навігації, так і в теорії прийняття рішень, а галузь застосування відповідних методів та моделей відноситься до пошуково-рятувального забезпечення, забезпечення навігаційної безпеки та ведення бойових (спеціальних) дій. Математичні моделі пошуку на морі достатньо складні та вимагають певних алгоритмічних обчислень, отже доцільно задачі пошуку розглядати у складі систем підтримки прийняття рішення (СППР) або автоматизованих систем управління (АСУ) розвідкою.

Метою дослідження є підвищення ефективності пошуку та супроводження морських об'єктів за рахунок розроблення відповідних моделей та методів зі складу СППР.

У процесі пошуку використання засобів виявлення поєднується з активним маневром носія цих засобів. Отже, вивчення закономірностей взаємного руху спостерігача та об'єкта пошуку стає особливо важливим. Ці закономірності є невід'ємною частиною теорії пошуку – кінематики пошуку. Мається на увазі, що кінематичні характеристики пошукових об'єктів можуть бути відомі та можуть бути оцінені на основі вимірювань.

Одним з найважливіших показників ефективності пошукової операції, а також експлуатації суднових та берегових систем управління рухом суден (СУРС), контролю, забезпечення безпеки мореплавання є відстеження та супроводження об'єктів спостереження. У морі об'єкти переміщуються від дії власних двигунів та під впливом постійної течії, вітру, хвилювання. Операції супроводження дозволяють проводити аналіз,

оцінювати параметри та траєкторії руху різних морських динамічних об'єктів, контролювати їх маневри та діяльність. При цьому вирішуються задачі фільтрації, згладжування, прогнозування (екстраполяції) траєкторних параметрів за динамічними, кінематичними та статистичними моделями прогнозованих процесів з урахуванням сумарного зносу [1-5].

Основною характеристикою супроводження та отримання прогнозних параметрів руху об'єктів на морі, які вимірюються, можуть бути:

1) координати об'єкта географічні (широта, довгота) або плоскі прямокутні (за меридіаном та паралелями);

2) координати об'єкта полярні по відношенню до спостерігача (пеленг, відстань);

3) елементи руху об'єкта (істинний курс, швидкість).

Аналіз ряду досліджень [6, 1] свідчить, що при вирішенні завдань пошуку та супроводження об'єктів (морських, високошвидкісних повітряних, наземних), як правило, використовують кінематичні моделі прогнозування їх руху першого порядку, враховуючи швидкість зміни спостерігаемого параметру, або другого порядку, який враховує швидкість та прискорення зміни спостерігаемого параметру. На основі цього та принципів механіки кінематичної моделі іншого окремого супроводжуваного та прогнозованого параметру при руху об'єкту можливо представити у такому вигляді [4,5]:

$$\tilde{X}_i = \hat{X}_{i-1} + \hat{V}_i t_i; \quad t_i = T_i - T_{i-1}; \quad (1)$$

$$\tilde{X}_i = \hat{X}_{i-1} + \hat{V}_i t_i + 0,5 \hat{a}_i t_i^2, \quad (2)$$

де \hat{V}_i, \hat{a}_i – згладжування виміру або оцінки швидкості при прискоренні окремого траєкторного параметру;

$\tilde{X}_i, \hat{X}_{i-1}$ – прогнозовані та попередні виміряні або згладжені значення окремого траєкторного параметру;

T_i, T_{i-1}, t_i – моменти часу та інтервал між вимірюваннями параметру.

Компоненти швидкості та прискорення руху об'єкта можуть бути представлені сумою, яка становить власний рух та сумарний вплив зовнішнього середовища, похибками вимірювань або оцінкою:

$$\hat{V}_i = \hat{V}_{ui} + \hat{V}_{ci}; \hat{a}_i = \hat{a}_{ui} + \hat{a}_{ci}, \quad (3)$$

де $\hat{V}_{ui}, \hat{a}_{ui}$ – компоненти власної вимірної швидкості та прискорення об'єкту за допомогою лагу та датчика кутової швидкості;

$\hat{V}_{ci}, \hat{a}_{ci}$ – компоненти швидкості та прискорення сумарного знесення об'єкта від впливу зовнішнього середовища та похибок.

Компоненти швидкості та прискорення сумарного зносу об'єкта від впливу зовнішнього середовища та похибки можуть бути представлені так:

$$\hat{V}_{ci} = \hat{V}_{дi} + \hat{V}_{Тi} + \hat{V}_{Пi}; \hat{a}_{ci} = \hat{a}_{дi} + \hat{a}_{Тi} + \hat{a}_{Пi}, \quad (4)$$

де $\hat{V}_{дi}, \hat{a}_{дi}$ – швидкість та прискорення дрейфу об'єкта під впливом вітру;

$\hat{V}_{Тi}, \hat{a}_{Тi}$ – швидкість та прискорення зносу об'єкта течією;

$\hat{V}_{Пi}, \hat{a}_{Пi}$ – швидкість та прискорення об'єкта від дії помилок.

Складові виразу (2.4) можуть посилити або компенсувати один одного. Тому сумарна складова повинна оцінюватися за поточними вимірами.

У результаті завершених досліджень [4, 5], заснованих на комбінації різних варіантів виразів 1-4 у залежності від здатності вимірювати та визначати вхідні вихідні дані можуть бути сформовані варіанти незалежних за окремими параметрами та ієрархічними комбінаціями з різних параметрів моделі супроводження та прогнозування руху об'єкта спостереження.

Розробляються моделі для прогнозування рухових елементів судна першого порядку типу (1). Ці моделі складаються з незалежних основних кінематичних параметрів: швидкості руху, курсу та географічних координат, які отримані на основі безпосередніх вимірювань та згладжувань на судні або вилучені з приладів судна, як об'єкту спостереження, за допомогою автоматичних ідентифікаційних систем (AIC):

$$\tilde{V}_i = \hat{V}_{i-1} + \hat{a}_i t_i; \tilde{K}_i = \hat{K}_{i-1} + \hat{\omega}_i t_i; \quad (5)$$

$$\tilde{\varphi}_i = \hat{\varphi}_{i-1} + \hat{V}_{\varphi i} t_i; \tilde{\lambda}_i = \hat{\lambda}_{i-1} + \hat{V}_{\lambda i} t_i, \quad (6)$$

де \tilde{V}_i, \tilde{K}_i – прогнозовані значення швидкості та курсу об'єкта спостереження;

$\hat{K}_{i-1}, \hat{V}_{i-1}$ – попередні виміряні або згладжені значення курсу та швидкості об'єкта спостереження;

$\hat{a}_i, \hat{\omega}_i$ – попередні вимірювання або оцінки лінійного прискорення та кутової швидкості руху об'єкта спостереження;

$\tilde{\varphi}_i, \tilde{\lambda}_i$ – прогнозовані значення широти, довготи об'єктів на поточних моментах часу;

$\hat{\varphi}_{i-1}, \hat{\lambda}_{i-1}$ – попередні виміряні (обсервовані) або згладжені значення широти та довготи об'єкта;

$\hat{V}_{\varphi i}, \hat{V}_{\lambda i}$ – оцінки швидкостей зміни координат (широти, довготи) траєкторії руху об'єкта.

Курс, швидкість, широта та довгота об'єкта спостереження також можуть бути отримані на основі непрямих вимірювань зовнішнім спостерігачем та їх подальших оцінок.

На основі траєкторійних вимірювань (обсервацій) руху об'єкта з'являється можливість отримати додаткову інформацію у вигляді елементів вектора фактичної швидкості об'єкта (щодо ґрунту). Для реалізації цієї мети розглянемо два підходи. Перший пов'язаний з апроксимацією вимірюваних (обсервованих) або згладжених значень широти та довготи при руху об'єкта за локсодромією (при постійних курсах), другий – з використанням швидкості вимірювання широти та довготи руху об'єкта за траєкторією, відповідно:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \hat{\Pi Y} &= \frac{\sum_1^n (\Delta \varphi_{oi} \Delta \lambda_{oi} \cos \hat{\varphi}_i) / \sum_1^n \Delta \varphi_{oi}^2}{\hat{V}_g = \sum_1^n \left[\Delta \varphi_{oi}^2 + (\Delta \lambda_{oi} \cos \hat{\varphi}_i)^2 \right]^{0.5} / \sum_1^n t_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \hat{\Pi Y} = \hat{V}_{\lambda i} \cos \hat{\varphi}_i / \hat{V}_{\varphi i}; \hat{V}_{gi} = \left[\hat{V}_{\varphi i}^2 + (\hat{V}_{\lambda i} \cos \hat{\varphi}_i)^2 \right]^{0.5}, \quad (8)$$

де $\hat{\Pi Y}, \hat{V}_g$ – оцінки фактичної швидкості та шляхового кута об'єкта по відношенню до ґрунту на прямій лінії;

$\Delta \varphi_{oi}, \Delta \lambda_{oi}$ – виміряні (обсервовані) або згладжені значення приросту широти та довготи при руху об'єкта на локсодромії.

При наявності на судні датчика кутової швидкості, його вимір та прогнозування також пропонується здійснювати на основі типової моделі першого порядку (1), (5), (6):

$$\tilde{\omega}_i = \hat{\omega}_{i-1} + \hat{a}_{\omega i} t_i, \quad (9)$$

де $\tilde{\omega}_i$ – прогнозовані значення кутової швидкості об'єкта спостереження;

$\hat{\omega}_{i-1}$ – попередні вимірювання або згладжені оцінки кутової швидкості об'єкта спостереження;

$\hat{a}_{\omega i}$ – згладжені оцінки кутового прискорення об'єкта спостереження.

При спільному використанні виразів (5) та (9) виробляється комбінована модель курсу об'єкту, в якій кутова швидкість знаходиться на нижньому рівні ієрархії.

Після підстановки прогнозованої кутової швидкості об'єкта (9) у другому виразі (5) отримується модель супроводження та прогнозування курсу об'єкту другого порядку, типу (2):

$$\tilde{K}_i = \hat{K}_{i-1} + \hat{\omega}_i t_i^2. \quad (10)$$

Більш повний варіант комплексного використання всіх параметрів рядів траєкторних вимірювань для супроводження та прогнозування руху об'єкта пропонується формувати за допомогою традиційних методів аналітичного розрахунку шляху судна [7, 2]. При цьому проєктовані дані перерахованих варіантів моделей курсу та швидкості об'єкта (5)-(8) використовуються елементами нижнього рівня ієрархії в комбінованій моделі прогнозування координат руху об'єкта з урахуванням елементів сумарного зносу та залишкових помилок (3), (4) [4, 5]:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\varphi}_i &= \hat{\varphi}_{i-1} + (\hat{V}_i \cos \hat{K}_i + \hat{V}_{ci} \cos \hat{K}_{ci}) t_i; \\ \tilde{\lambda}_i &= \hat{\lambda}_{i-1} + (\hat{V}_i \sin \hat{K}_i + \hat{V}_{ci} \sin \hat{K}_{ci} +) t_i \sec \hat{\varphi}_i, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де, $\hat{K}_{ci}, \hat{V}_{ci}$ – оцінки значень курсу та швидкості сумарного зносу об'єкта.

Таким чином, модель координат траєкторії об'єкта (11) буде відповідати моделі другого порядку (2), яка містить прогнозовані значення курсу та швидкості від нижнього рівня ієрархії (5)-(10).

З аналізу різних досліджень з мореплавання [7-9] швидкість дрейфу об'єкта залежить від швидкості та курсового кута вітру, швидкості об'єкта, його форми та розміру. Часто в літературі використовується формула:

$$\hat{V}_{Di} = k_{\alpha} W, \quad (12)$$

де \hat{V}_{Di} – швидкість вітрового дрейфу, вуз;

k_{α} – коефіцієнт дрейфу;

W – швидкість вітряного дрейфу, м/с.

Коефіцієнт дрейфу визначається для кожного конкретного типу судна або плавзасібства.

У морехідних таблицях МТ-2000 швидкість вітрового дрейфу представлена в іншому вигляді:

$$\hat{V}_{Di} = 1,94 k_{\alpha} U, \quad (13)$$

де U – істинна швидкість вітру, м/с.

Значення коефіцієнту вітрового дрейфу приводиться у МТ-2000:

- буй (плавуча міна): $k_{\alpha} = 0,012 - 0,015$;
- шлюпка: $k_{\alpha} = 0,032 \div 0,045$;
- катер (рятувальний бот): $k_{\alpha} = 0,0650$;
- судно: $k_{\alpha} = 0,056 - 0,062$.

З посібника IAMSAR [10], для розрахунку району, в якому може розташовуватися об'єкт пошуку, необхідно визначити швидкість та напрямок дрейфу, що складається з двох компонентів: дрейфу в підвітряній стороні та сумарної водної течії.

Дані про розмір цих дрейфів, наведені у вигляді таблиці та графіків, вхідних аргументів, в яких є швидкість вітру у вузлах та тип морського динамічного об'єкту.

Швидкість вітрової течії на поверхні моря, як правило, є емпіричною формулою в залежності від швидкості вітру та широти місця:

$$\hat{V}_{Ди} = \frac{k_{ТВ}}{\sqrt{\sin \varphi}} U, \quad (14)$$

де $k_{ТВ}$ – коефіцієнт вітрової течії.

Коефіцієнт вітрової течії визначається з експериментальних спостережень, його величина коливається від 0,04 при швидкості вітру 2 м/с, до 0,012 при швидкості вітру 20 м/с. Найчастіше всього безпосередньо в формулі (14) підставляється значення коефіцієнту вітрової течії 0,0127 [7].

Вітрова течія у відкритому морі відхиляється від напрямку вітру в північній півкулі на 45° праворуч, на півдні – на 45° ліворуч під впливом відхиляючих сил обертання Землі [19]. Причому це відхилення не залежить ні від швидкості вітру та течії, ні від широти місця.

Для визначення величини вітрової течії, можна використовувати методики (графіки), наведені в посібнику [10]. Однак, аналіз цього графіка свідчить, що він не в повній мірі враховує силу Коріоліса.

Широту, для якої побудовано графік, можна визначити за формулою (14) та даними МТ-2000, які дозволяють виявити, що широта для графіків є змінною величиною та коливається від 40° при швидкості вітру 1-2 вузли, до 2° при швидкості вітру 33-34 вузли.

На рис. 1 наведені результати розрахунків швидкості дрейфової течії з використанням формули (14) при швидкості вітру 10, 20 та 30 м/с.

З графіків видно, що для широт менше 20° використовується формула (14), обмежена через великі похибки.

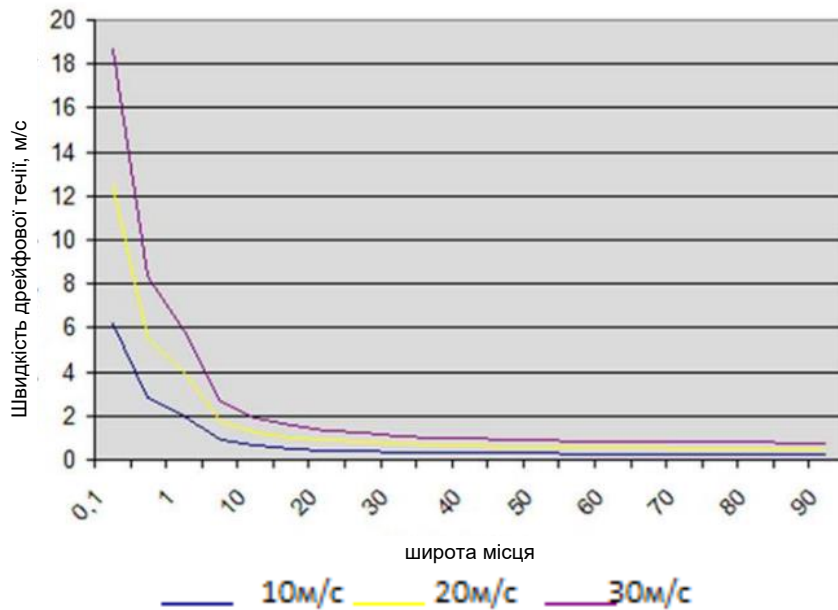


Рисунок 1 – Графіки швидкості поверхневої дрейфової течії залежно від швидкості вітру та широти місця

З [11] (графік N-1) очевидно, що при вітру 20 вузлів (10 м/с) швидкість вітрової течії становить 0,7 вуз, та з рисунку 1 та виразу (14) слідує, що при вітру 10 м/с, у залежності від широти, швидкість струму вітрової течії становить від 0,44 вуз ($\varphi = 20^\circ$) до 0,26 вуз ($\varphi = 90^\circ$.)

При вітру 34 вузли (20 м/с) швидкість течії становить 1,25 вуз., а з рис. 2.1 зрозуміло, що швидкість течії змінюється від 0,88 вузлів ($\varphi = 20^\circ$) до 0,52 вуз. ($\varphi = 90^\circ$).

Як зрозуміло, вже при швидкості вітру 10 м/с різниця швидкості вітрової течії, розрахованої за формулою (2.4), та графіком (N-1) керівництва [11], становить від 0,26 до 0,44 вуз. При проведенні тривалих морських пошукових операцій використання методики, яка наведена в [12], підвищує точність розрахунку найбільш ймовірного місця розташування пошукового об'єкта. Однак в методиках 12 при розрахунку не використовуються величини розгону та тривалість дії вітру.

У роботі [9] розрахунок вітрового дрейфу здійснюється за номограмою, вхідними параметрами якої є швидкість, розгін та тривалість дії вітру. При відсутності даних про напрямок та силу вітру використовується номограма, наведена в роботі [9]. При цьому використовуються градієнти атмосферного тиску для розрахунку швидкості вітру у відкритому океані, а потім за швидкістю вітру – швидкістю течії. Напрямок течії збігається з дотичною, яка проведена до ізобари в даній точці, якщо дивитися в напрямку потоку, праворуч повинен бути високий тиск, ліворуч – низький. Оскільки швидкість вітрової течії пов'язана з крутизною та висотою хвилі, то повноцінний розвиток хвилювання та вітрової течії досягається практично одночасно.

Разом з впливом вітру у відкритому морі на динамічний морський об'єкт має вплив усталене хвилювання, створюючи додаткову хвильову течію. У роботі [9] наведено формулу для розрахунку швидкості хвильової течії (см/с):

$$V_{\text{волт.т}} = \left((0,5h)^2 \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} \right), \quad (15)$$

де h, λ – висота та довжина хвилі відповідно;

g – прискорення сили тяжіння.

Детальний алгоритм розрахунку величини та напрямку приливної течії наведено у багатьох посібниках.

Проведений аналіз свідчить, що виникає необхідність уточнення методики розрахунку складових швидкості переміщення динамічного об'єкта в морі під дією зовнішніх впливів. На теперішній час для цієї мети можуть бути використані поточні вимірювання елементів обстановки, на основі яких комп'ютерні технології дозволяють значно спростити та уточнити розрахунки у порівнянні з графіками та номограмами. Це дозволить скоротити час пошуку та збільшити ймовірність знаходження об'єкта пошуку.

При вирішенні завдань пошуку об'єкта на морі для прийняття рішення, відповідно до вимог посібника IAMSAR, необхідно встановити передбачуване місце розташування пошукового об'єкта для проведення пошукових операцій. Під впливом зовнішніх факторів об'єкт пошуку буде переміщуватися. Існує кілька методів розрахунку координат місця повільно дрейфуючого об'єкта з урахуванням впливу зовнішніх факторів – вітру, течії.

Актуальність даного питання обумовлена складністю пошуково-рятувальних операцій при пошуку невеликих об'єктів в морі.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що у спільних діях на об'єкт вітру, хвилювання та течії практично неможливо оцінити окремі елементи зносу та дрейфу, а відповідно і застосувати існуючі методи розрахунків у припущенні дії тільки одного з зовнішніх факторів. Отже доцільно оцінити сумарні елементи зносу об'єкта у формулах (11) за поточними рядами траєкторії вимірювань [1, 2].

Перший підхід цих оцінок здійснюється за рахунок приростів числових координат за попередніми згладженими вимірами курсу та швидкості руху об'єкта та приростами безпосередньо виміряних (обсервованих) координат в наступному вигляді [1, 2]:

$$\operatorname{tg} \hat{K}_c = \frac{\sum_1^n [(\Delta \lambda_{oi} \cos \hat{\varphi}_i - \hat{V}_i t_i \sin \hat{K}_i)(\Delta \varphi_{oi} - \hat{V}_i t_i \cos \hat{K}_i)]}{\sum_1^n (\Delta \varphi_{oi} - \hat{V}_i t_i \cos \hat{K}_i)^2}; \quad (16)$$

$$\hat{V}_c = \frac{\sum_1^n (\Delta \lambda_{oi} \cos \hat{\varphi}_i - \hat{V}_i t_i \sin \hat{K}_i)^2 + [(\Delta \varphi_{oi} - \hat{V}_i t_i \cos \hat{K}_i)^2]^{0.5}}{\sum_1^n t_i^2}, \quad (17)$$

де \hat{K}_c, \hat{V}_c – оцінки значень курсу та швидкості сумарного зносу об'єкта при русі за локсодромією (при постійних курсах).

При розрахунках за формулами (16), (17) одночасно відбувається фільтрація випадкової похибки ряду траєкторних вимірювань на основі згладжування проміжних обчислень та кінцевих результатів.

Інший підхід оцінки елементів сумарного зносу впливає з рівності формул (6) та (11) й можливості визначення елементів вектора сумарного зносу через оцінки швидкості відносно ґрунту за обсерваціями, згладжених вимірювань або прогнозу курсу та швидкості об'єкта (5), (10):

$$\left. \begin{aligned} \hat{V}_{\varphi_i} - \hat{V}_i \cos \hat{K}_i &= \hat{V}_{ci} \cos \hat{K}_{ci}; \\ \hat{V}_{\lambda_i} \cos \hat{\varphi}_i - \hat{V}_i \sin \hat{K}_i &= \hat{V}_{ci} \sin \hat{K}_{ci}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Ділення другого виразу формули (18) на перший дає оцінку курсу, а квадрат обох

виразів (18) та їх додавання з урахуванням формули (8) дає оцінку швидкості поточних значень сумарного зносу об'єкта:

$$\operatorname{tg}\widehat{K}_{ci} = \frac{(\widehat{V}_{\lambda i} \cos \widehat{\varphi}_i - \widehat{V}_i \sin \widehat{K}_i)}{(\widehat{V}_{\varphi i} - \widehat{V}_i \cos \widehat{K}_i)}; \quad (19)$$

$$\widehat{V}_{ci} = [\widehat{V}_{gi}^2 + \widehat{V}_i^2 - 2\widehat{V}_i(\widehat{V}_{\varphi i} \cos \widehat{K}_i + \widehat{V}_{\lambda i} \cos \widehat{\varphi}_i \sin \widehat{K}_i)]^{0.5}. \quad (20)$$

Оцінку значень вектору зносу за формулами (16), (17), (19), (20) на основі попереднього аналізу, навіть при наявності гіпотези про постійну дію зовнішніх факторів (течія, вітер, хвилювання), необхідно виробляти у вигляді ковзаного вікна з інтервалами, при яких елементи руху об'єкта підтримуються постійними. Це пов'язано з тим, що дрейф об'єкта від впливу вітру – це вхідний компонент, який є частиною сумарного зносу об'єкта, буде різним при зміні курсу та швидкості руху об'єкта [7, 13].

З метою якісного функціонування кінематичних моделей руху об'єкта на морі (1) – (11) необхідно використовувати методи згладжування та фільтрації вимірювань для компенсації похибки в оцінках параметрів траєкторії та їх швидкості зміни [1, 3, 13].

В якості вихідних значень для прогнозування можуть використовуватися попередні виміряні або згладжені параметри для компенсації похибок. З аналізу дослідження [1, 3] виявлено, що найкраще згладжування параметрів ряду траєкторних даних досягається рекурентним експоненційним фільтром або модернізованим фільтром Хемінга з адаптацією їх коефіцієнтів вимірювання:

$$\widehat{x}_i = \widehat{x}_{i-1} + \alpha(x_i - \widehat{x}_{i-1}); \quad (21)$$

$$\widehat{x}_i = \frac{p_1}{t_{i-1}} \widehat{x}_{i-1} + x_i + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1}, \quad (22)$$

де α – коефіцієнт згладжування, адаптований за вимірюванням;

p_{-1}, p_{+1} – компоненти вагових коефіцієнтів вимірювань, які адаптуються до вимірювань методом найменших квадратів;

t_{i-1}, t_{i+1} – змінні інтервали вимірювання (час або відстань) відносно згладженого вимірювання в трьох точковому інтервалі згладжування.

Адаптовані коефіцієнти згладжування фільтрів (21), (22) постійно коригуються до поточних вимірювань параметрів на основі методу найменших квадратів, значення яких після перетворень представлені у такому кінцевому вигляді:

$$\alpha = \frac{(\sum_1^n (\widehat{x}_1 - \widehat{x}_{i-1})(x_1 - \widehat{x}_{i-1}))}{(\sum_1^n (x_1 - \widehat{x}_{i-1})^2)}; \quad (23)$$

$$p_{-1} = \frac{\left(\sum_1^n \frac{(x_i - \widehat{x}_i)x_{i-1}}{t_{i-1}} \sum_1^n \left(\frac{x_{i+1}}{t_{i+1}} \right)^2 - \sum_1^n \frac{(x_i - \widehat{x}_i)x_{i+1}}{t_{i+1}} \sum_1^n \frac{x_{i-1}x_{i+1}}{t_{i-1}t_{i+1}} \right)}{\Delta}; \quad (24)$$

$$p_{+1} = \frac{\left(\sum_1^n \frac{(x_i - \widehat{x}_i)x_{i+1}}{t_{i+1}} \sum_1^n \left(\frac{x_{i-1}}{t_{i-1}} \right)^2 - \sum_1^n \frac{(x_i - \widehat{x}_i)x_{i-1}}{t_{i-1}} \sum_1^n \frac{x_{i-1}x_{i+1}}{t_{i-1}t_{i+1}} \right)}{\Delta};$$

$$\Delta = \sum_1^n \left(\frac{x_{i-1}}{t_{i-1}} \right)^2 \sum_1^n \left(\frac{x_{i+1}}{t_{i+1}} \right)^2 - \left(\sum_1^n \frac{x_{i-1}x_{i+1}}{t_{i-1}t_{i+1}} \right)^2.$$

За формулою (1), (21)-(24) згладжується та прогнозується значення кожного траєкторного параметру незалежно від інших параметрів, з урахуванням оцінок значень їх швидкостей за попередніми вимірами.

Дослідженнями часових рядів траєкторних вимірювань руху судна встановлено, що найкращий прогноз забезпечується зі швидкостями параметрів, отриманий п'ятикрапковою процедурою, побудованою за трьома вимірами.

Мінімально можливий інтервал вимірювання дозволяє відслідковувати поточну швидкість зміни навігаційного параметра. У трьох вимірах пропонується обчислити проміжні швидкості параметра між сусідніми інтервалами вимірювання, розмістивши їх в порядку близькості до розрахункового параметра для створення п'ятикрапкової процедури.

$$\hat{V}_i = \frac{2(x_{i+1} - x_{i-1})}{3(T_{i+1} - T_{i-1})} \left(\frac{(x_i - x_{i-1})}{(T_i - T_{i-1})} + \frac{(x_{i+1} - x_i)}{(T_{i+1} - T_i)} \right) / 12. \quad (25)$$

Недолік методів фільтрації (3.1)-(3.5) для прогнозування полягає в тому, що оцінки параметрів отримуються не на поточному, а на попередньому моменті вимірювань.

Фільтрація та оцінювання елементів руху морського динамічного об'єкта необхідні для згладжування вимірювань траєкторних параметрів, супроводження та прогнозування їх подальшого положення об'єкта. Існують різні методи та підходи до фільтрації та оцінювання параметрів руху різної за природою та призначенням об'єктів, в залежності від характеру вихідних даних та інших умов для рішення задач супроводження.

При цьому зазначається, що найбільш зручними та простими для використання у кінематичних моделях алгоритмами лінійної фільтрації є так звані α , β -фільтри (при постійних коефіцієнтах) або фільтри Калмана другого порядку (при адаптації коефіцієнтів). Ці фільтри розв'язують задачу згладжування, прогнозування та оцінки швидкості зміни будь-якого супроводження параметра, які представлені у загальному рівнянні:

$$\begin{aligned} \hat{X}_i &= \tilde{X}_i + \alpha(X_i - \tilde{X}_i); \\ \hat{V}_i &= \hat{V}_{i+1} + \frac{\beta(X_i - \tilde{X}_i)}{t_i}; \\ \tilde{X}_i &= \hat{X}_{i-1} + \hat{V}_i t_i, \end{aligned} \quad (26)$$

де X_i – поточне виміряне значення параметра;

α та β – коефіцієнти згладжування, що відповідають коефіцієнтам підсилення нев'язки вимірювання та прогнозування.

Останнє рівняння у фільтрі (26) відповідає кінематичній моделі руху першого порядку (1).

У перших двох рівняннях (26) у явному вигляді присутнє відхилення прогнозованих виміряних значення параметра.

Методичною перевагою фільтра α та β -фільтра (26) над методами обробки часових рядів (21)-(25) є те, що фільтр α та β -фільтр одночасно згладжує вимірювання, оцінює параметр та швидкість його зміни. Коефіцієнти α та β -фільтра змінюються в процесі супроводження цілі в залежності від номера такту вимірювання та представлені залежностями:

$$\alpha = \frac{2(2i - 1)}{i(i + 1)}; \beta = \frac{6}{i(i + 1)}; \quad (27)$$

$$\alpha = \frac{2(2i + 1)}{i(i + 1)(i + 2)}; \beta = \frac{6}{(i + 1)(i + 2)}; \quad (28)$$

$$\alpha = \frac{6(i + 1)}{(i + 2)(i + 3)}; \beta = \frac{12}{(i + 2)(i + 3)}; \quad (29)$$

де i – номер такта вимірювання.

При цьому встановлено, що зі збільшенням кількості тактів вимірювань коефіцієнти α , β , зменшуються, забезпечуючи повне усереднення (згладжування) вимірних значень параметру.

Як правило, у процесі супроводження коефіцієнти α та β визначаються за 2-3 значеннями на початковій ділянці, від 3-6 – на середній ділянці та при встановленому стані – по 10-15 [14].

Для налагоджених процесів супроводження, орієнтованих на суднові системи автоматичної радіолокаційної прокладки (САПР), для визначення значень β коефіцієнтів рекомендується формула (3.9).

Коефіцієнти при згладжуванні супутньої дистанції до об'єкту значення коефіцієнтів приймаються з таких умов:

$$\begin{aligned} \alpha = 20/D; \beta = 4/D; \text{ при } D > 20 \text{ км, тобто } 0,2 \leq \alpha \leq 0,5; 0,01 \leq \beta \leq 0,2 \\ \alpha = 0,5; \beta = 0,2; \text{ при } D < 20 \text{ км,} \end{aligned} \quad (30)$$

де D – дистанція до цілі.

На основі попередніх досліджень [29, 30] пропонується новий метод адаптації значень коефіцієнтів α та β на основі поточних вимірювань та згладжування будь-якого параметра замість розрахунків за формулами (3.7)-(3.10). Для цього після підстановки прогнозованого значення від третього рівняння системи (26) в перше та друге рівняння отримують формули, що характеризують відхилення оцінених значень від вимірювань.

Після возведення цих виразів в квадрат додавання за всіма згладженими значеннями (n) отримують критерії мінімуму суми квадратів відхилень згладжених і вимірних значень параметрів для визначення α , β -коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} Q_x &= \sum [\hat{X}_{i-1} + \hat{V}_i t + \alpha(X_i - \hat{X}_{i-1} - \hat{V}_i t_i) - \hat{X}_i]^2 = \min; \\ Q_V &= \sum [\hat{V}_{i-1} + \beta(X_i - \hat{X}_{i-1} - \hat{V}_i t_i)/t_i - \hat{V}_i]^2 = \min, \end{aligned} \quad (31)$$

де Q_x , Q_V – критерії мінімуму суми квадратів відхилень згладжених та вимірних значень параметру та швидкості його зміни.

Для мінімізації відхилень за критерієм (31) для сукупності вимірювань достатньо обчислити перші похідні від виразів (31) α , β -коефіцієнти, які задовольняють вимогам мінімуму найменших квадратів відхилень:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial \alpha} = 0; \quad (32)$$

$$\frac{\partial Q_V}{\partial \beta} = 0.$$

Після обчислення похідних (32) за шуканими коефіцієнтами α та β від правих частин виразів (31) та подальших перетворень отримуються вирази для адаптації коефіцієнтів α та β за поточними результатами вимірювання з конкретними статистичними властивостями для згладжування кожного супутнього параметра:

$$\alpha = \frac{\sum[(\hat{X}_i - \hat{X}_{i-1} - \hat{V}_i t)(X_i - \hat{X}_{i-1} - \hat{V}_i t)]}{\sum(X_i - \hat{X}_{i-1} - \hat{V}_i t)^2};$$

$$\beta = \frac{\sum[(\hat{V}_i - \hat{V}_{i-1})(X_i - \hat{X}_{i-1} - \hat{V}_i t)/t]}{\sum[(X_i - \hat{X}_{i-1} - \hat{V}_i t)/t]^2}.$$
(33)

Розрахунки (33) пропонується проводити за значенням вимірювання та згладжування параметра ковзним вікном, в яких кількість тактів вимірювань узгоджується з рекомендаціями щодо використання виразів (27)-(30) або на основі конкретних статистичних даних вимірювань та режиму руху (маневрування) об'єкта.

Результати моделювання роздільного згладжування, оцінки та прогнозування траєкторних параметрів руху об'єкта наведені на рисунках 2-8.

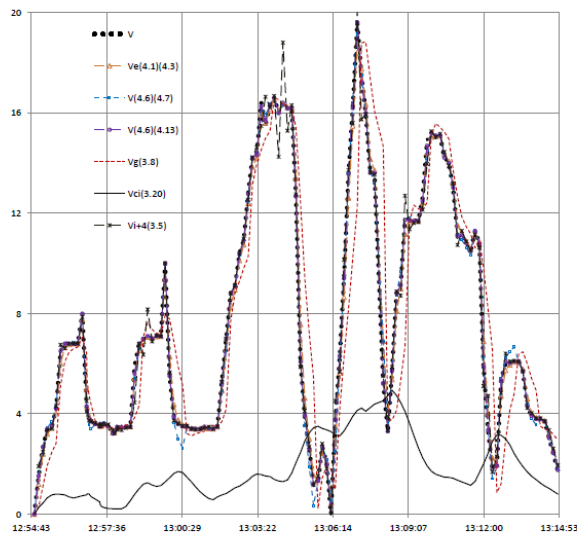


Рисунок 2 – Згладжування та прогнозування швидкості об'єкта

На рис. 2 наведено: V – вимірювання; V_e (21) (23) – експоненційне згладжування; V (26) (27) – згладжування α - β -фільтром (26), (27); V (26) (33) – згладжування α - β -фільтром (26), (33); V_g (28) – швидкість відносно ґрунту (8); V_{ci} (20) – швидкість сумарного зносу (20); V_{ci} (5) – прогнозування швидкості на 4 такти вперед (5).

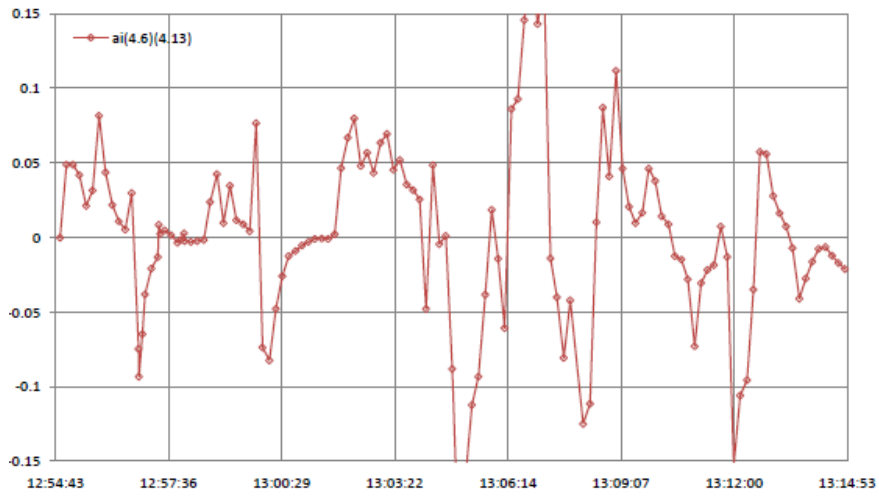


Рисунок 3 – Оцінки лінійного прискорення руху об'єкта α - β -фільтром

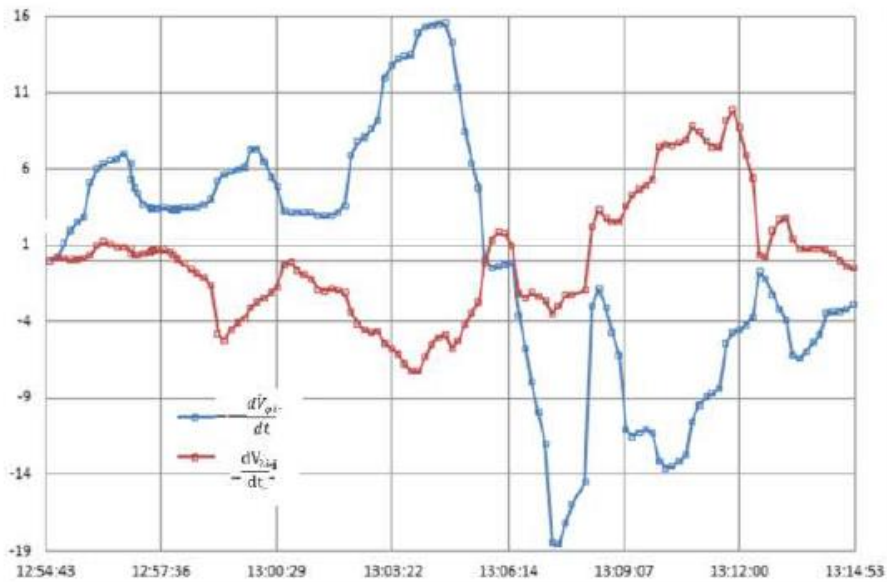


Рисунок 4 – Оцінки швидкостей широти та довготи при переміщеннях об'єкта α - β -фільтром;

$\frac{dV_{\varphi i}}{dt}, \frac{dV_{\lambda i}}{dt}$ – оцінки швидкості зміни широти та довготи відповідно

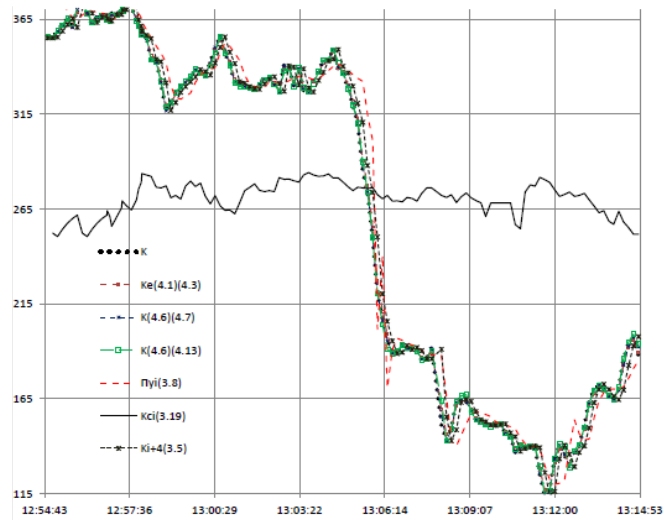


Рисунок 5 – Згладжування та прогнозування курсу об'єкта

На рис. 5 позначено: K – вимірювання; K_e (21) (23) – експоненційне згладжування; K (26) (27) згладжування α - β -фільтром (26), (27); K (26) (33) – згладжування α - β -фільтром (26), (33); PU_i (28) – шляховий кут (8); K_{ci} (19) – курс сумарного зносу; K_{i+4} (5) – прогнозування на 4 такту вперед (5).

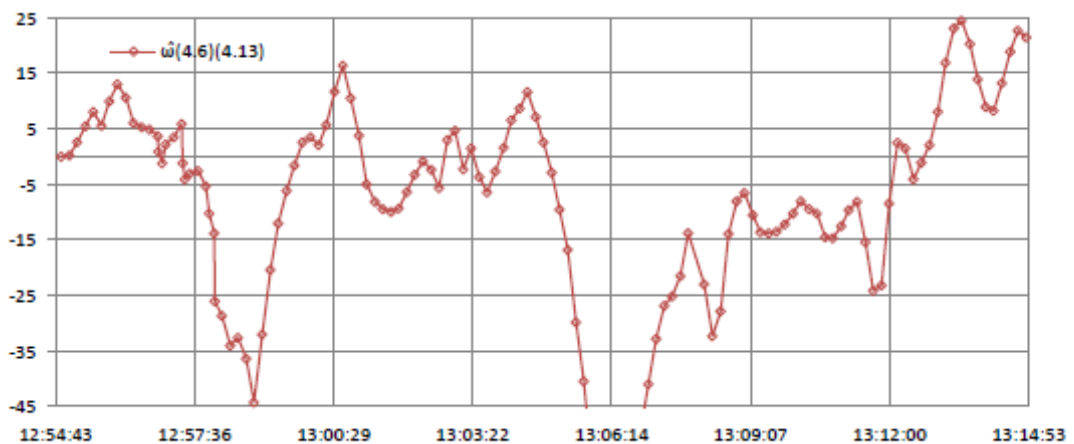


Рисунок 6 – Оцінки швидкості кутового повороту об'єкта α - β -фільтром

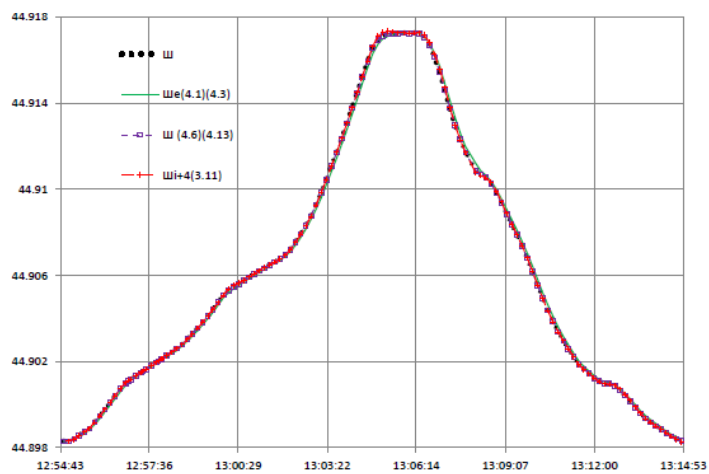


Рисунок 7 – Згладжування та прогнозування довготи при переміщеннях об'єкта

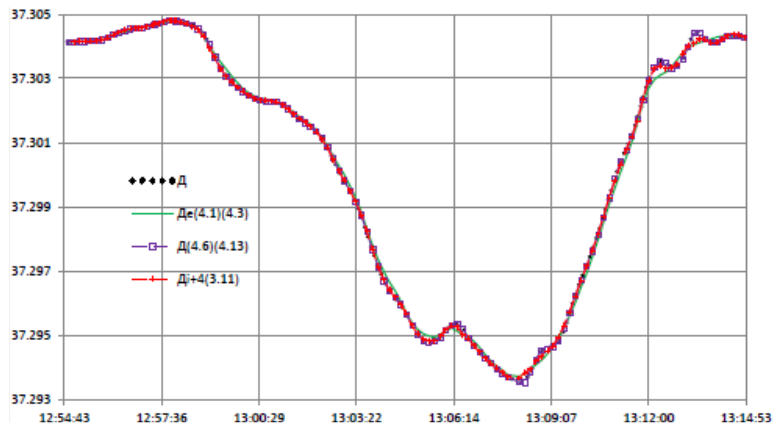


Рисунок 8 – Результати згладжування та прогнозування довготи при переміщенні об'єкта

Згідно з представленими графіками, за результатами моделювання та експериментів слідують важливі теоретичні та практичні висновки з урахуванням попереднього аналізу та досліджень [4, 5]:

1. Серед запропонованих методів згладжування та оцінювання всіх траєкторних параметрів (21)-(33) найкращі загладжувані властивості має α - β -фільтр (26) з переміщувальним вікном п'яти вимірів. Для деяких параметрів траєкторії (курсу та швидкості) еквівалентні властивостям згладжування мають експоненційний фільтр (21), (23). Але слід мати на увазі, що α - β -фільтр (26) забезпечує додаткову оцінку швидкості змін всіх параметрів траєкторії та елементів сумарного зносу об'єкта від зовнішніх впливів.

2. Моделюванням та експериментами встановлено, що фільтр α - β (26) показує найкращі якості з виразами рекомендованих α - β коефіцієнтів (27) (зі значеннями в межах $\alpha = 0,6 \div 1$; $\beta = 0,2 \div 0,9$) в порівнянні з іншими (28)-(30) на для усіх етапів та режимів супроводження розглянутих параметрів.

3. Найкраще згладжування α - β -фільтр (26) показує з адаптивними коефіцієнтами α та β (33), отриманими вперше, які пристосовуються до статистичних властивостей конкретних вимірювань конкретного параметра. У процесі адаптації коефіцієнти змінювалися в межах $\alpha = 0,7 \div 1$; $\beta = 0,3 \div 1,3$. При цьому прогнозовані значення параметрів на чотири такта вперед практично співпадають з їх вимірювальними або згладжувальними у всьому діапазоні значень (середні квадратичні відхилення (СКО) зі швидкістю 0,3 вузла, курсу - $1,0^2$, що значно краще обробки методами часових рядів [4]). Прогнозовані значення параметрів α - β -фільтром (26) (33) в межах такту співпадають з їх вимірюваннями.

4. Найбільші відхилення прогнозованих траєкторних параметрів (при чому всіх) при обробці методів часових рядів спостерігаються при значеннях швидкості руху об'єкта близьких до нуля при його маневруванні, що можна пояснити нестабільною зміною параметрів руху. Застосування α - β -фільтра (26), (34) усуває ці недоліки для всіх режимів руху об'єкту.

5. Оцінки швидкості зміни параметрів (лінійне прискорення, кутова швидкість) α - β -фільтра (26), (33) мають стабільні значення та забезпечують добрий прогноз. Інтервал прогнозування та оцінка швидкостей зміни параметрів руху слід узгоджувати з наявністю очікуваних маневрів об'єкта і враховувати його маневрені якості.

6. Зміна складових загального вектора сумарного зносу пов'язана з реальною зміною впливу вітру та течії по відношенню до маневрів об'єкта, в тому числі похибками їх оцінки (8), (19), (20). Ця зміна дає добрі результати прогнозування за усім діапазоні їх значень при маневрі об'єкта.

7. Прогнозування траєкторії руху об'єкта на основі комплексної моделі (5), (11), (19), (20), (26), (33) дає найкращі значення широти та довготи в будь-яких режимах маневрування (СКО за широтою та довготою - 0,03). Великі відхилення прогнозу за довготою в діапазоні часу 13:06:14 - 13:14:53, можливо, пов'язані з похибками вимірювання та, відповідно, оцінку всіх параметрів. Значення α - β -коефіцієнтів адаптації (33) змінюються від 0,2 до 1,5.

Висновки. У ході дослідження систематизовано проблеми, здійснено класифікацію методів пошуку та супроводження об'єктів на морі, які дозволяють виділити часткові та загальні підходи вирішення пошукових завдань у різних умовах з метою формалізації моделей пошукових процесів і процесів. Проведено дослідження методів пошуку, введено поняття пошукової одиниці, проведено теоретично-множинне обґрунтування районів та умов пошуку. Розроблено технологію фільтрації та оцінювання кінематичних елементів руху та супроводження об'єкта, на підставі α та β -фільтра. Сформовано алгоритми адаптації коефіцієнтів α та β -фільтра за поточними вимірюваннями параметрів.

Література

1. Васьков, А.С. Весовое сглаживание навигационных данных с переменными интервалами измерений [Текст]/ А.С.Васьков, В.Г.Мельник// Интернет- журнал «Науковедение». – 2014. - Вып.4(23). – Идентификационный №60TVN414
2. Васьков, А.С. Оценка сноса судна по траекторным измерениям [Текст]/ А.С.Васьков, В.Г.Мельник// Эксплуатация морского транспорта.– 2015.– №2(75).– С.34 – 38.
3. Васьков, А.С. Кусочно-линейное сглаживание траекторных данных движения судна [Текст]/ А.С.Васьков, В.Г.Мельник// Эксплуатация морского транспорта.– 2015.– № 1 (74).– С. 28 – 32.
4. Васьков, А.С. Прогнозирование и контроль движения судна [Текст]/ А.С.Васьков, А.А.Грищенко// Морские интеллектуальные технологии. – 2019. –№ 1 (43).- Т.2. –С.92 –97.
5. Васьков, А.С. Сопровождение параметров траектории движения судна [Текст]/ А.С.Васьков, А.А.Грищенко// Морские интеллектуальные технологии. – 2019. –№ 4 (46).- Т.3. – С.77 –82.
6. Артюшенко, В.М. Кинематические и вероятностные характеристики процесса поиска и обнаружения движущегося объекта [Текст]/ В.М.Артюшенко, В.И.Воловач// Журнал радиоэлектроники [электронный журнал].– 2017.– №3.– С.1–25.
7. Баранов, Ю.К. Навигация [Текст]/ Ю.К.Баранов, М.И.Гаврюк,В.А.Логиновский, Ю.А.Песков.- СПб.: Лань, 1997.- 449 с.
8. Абросимов, В.К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде [Текст]. – М.: Наука, 2013. – 168 с.
9. Абузьяров, З.К. Оперативное океанографическое обслуживание [Текст]/ З.К.Абузьяров, И.О.Думанская, Е.С.Нестеров.- Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009.-288 с.
10. Бовченко, П.Г. Краткий курс метеорологии и океанографии для судоводителей[Текст]/ П.Г.Бовченко, А.Е.Зубков.- М.: Морской транспорт, 1960.- С.326 – 331.
11. Биденко, С.И. Геопространственная формализация системы морской транспортной активности [Текст]/С.И.Биденко, Е.Л.Бородин, Н.Е.Сердитова, С.В.Травин// Межвуз. Сб. научн. Тр.: Информационные технологии и системы.- СПб., 2017.- Вып. 2(20).- С.84-94.
12. Биденко, С.И. Человеческий фактор в интеллектуальных системах [Текст]/ С.И.Биденко, А.И.Яшин// Биотехносфера.- 2010.- № 2(8).- С.45-48.
13. Васьков, А.С. Методологические основы управления движением судна и конфигурацией зоны навигационной безопасности [Текст]: Автореф. дисс. на соиск. уч.

ст. д.т.н. (05.22.16). – СПб.: ГМА им.адм. С.О.Макарова, 1998.– 48 с.

14. Верба, В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденции развития [Текст].– М.: Радиотехника.

Hannoshyna I., Kalinichenko T., Nikitin P.

RESEARCH OF METHODS OF FORECASTING THE MOVEMENT, SEARCH AND MONITORING OF SEA OBJECTS

In the course of the research, the problems were systematized, the classification of methods of search and tracking of objects at sea was carried out, which allow to distinguish partial and general approaches to solving search tasks in different conditions with the aim of formalizing models of search processes and processes. A study of search methods was carried out, the concept of a search unit was introduced, and a theoretical and multiple justification of areas and search conditions was carried out. The expediency is substantiated and the technology of multiple analysis of the formation of the navigation situation, areas and conditions of search operations as a universal mathematical apparatus for planning search actions and tracking search objects is substantiated. The principles of probabilistic assessment of search processes have been developed. Theoretical research and computer modeling of the methods of searching for and tracking marine dynamic objects have established the most suitable separate by parameters and combined models for tracking and forecasting the movement of the search object with an assessment of drift and current actions. The expediency has been substantiated and the algorithms for smoothing and evaluation of kinematic elements of the object's movement accompanied by time series of measurements using an exponential filter in three dimensions with adaptation according to current measurements have been tested. The technology of filtering and evaluation of kinematic elements of movement and tracking of the object has been developed, based on the α and β -filter, and the algorithms for adapting the coefficients of the α and β -filter based on current parameter measurements have been developed.

Keywords: methods, forecasting, search, monitoring, marine dynamic objects.

УДК 629.12.011

doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.12

Маслов І.З., Фуклев О.І.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ГІДРОДИНАМІКИ СУДНА НА ХВИЛЮВАННІ

У роботі розглянуто науково-практичне завдання, рішення якого представляє собою значний практичний інтерес. Існуючі методики обґрунтування параметрів хитавиці вимагають залучення результатів дорогих модельних експериментів, зокрема, для врахування в'язкісного демпфірування. Можливості існуючої комп'ютерної техніки, комп'ютерних технологій та відповідного програмного забезпечення дозволяють на початкових етапах проектування морських технічних об'єктів досить точно прогнозувати параметри їх хитавиці на хвилюванні з урахуванням сил в'язкісної природи.

Це дозволяє значно знизити вартість проектних робіт у частині визначення гідродинамічних характеристик морських об'єктів. На підставі виконаних досліджень отримані такі результати: виконаний аналіз існуючих підходів щодо розв'язання задач гідродинаміки та динаміки (хитавиці) морських суден й інших технічних споруд на хвилюванні, розроблено математичну модель комплексної задачі гідродинаміки та динаміки морського об'єкта для в'язкої рідини, розроблено методика проведення чисельного експерименту розрахунку хитавиці на регулярному хвилюванні, розроблено програмне забезпечення для підготовки вихідних даних та обробки результатів чисельного експерименту розроблені практичні рекомендації для чисельного моделювання хитавиці морського об'єкта на регулярному хвилюванні і визначення динамічних параметрів хитавиці, проведено чисельне моделювання динаміки руху морського судна на хвилюванні.

Ключові слова: математичні моделі, гідродинаміка, в'язкість, хвилювання, хитавиця, судно, морські об'єкти.

Метою дослідження є формування методики спільного розв'язання задач гідродинаміки та динаміки морських об'єктів для проектування оптимальних корпусів суден.

Виклад основного матеріалу. Для розробки практичних проектних рекомендацій щодо удосконалення конструкцій, підвищення живучості суден необхідно моделювати динамічну поведінку морських об'єктів. Тобто необхідно отримувати оцінки амплітудно-частотних та фазово-частотних характеристик (при розв'язанні задач у частотній області), отримувати характеристики динамічних процесів (при розв'язанні задач у часовій області). Існуючі методики розв'язання таких задач відносно морських об'єктів на даний час засновані на теорії ідеальної рідини, що значно звужує область можливих практичних досліджень.

Урахування в'язкісних характеристик рідини особливо важливе при розв'язанні завдань, в яких необхідно враховувати складності фізичного процесу хвилеутворення, плівкові ефекти, кавітацію, відносно малу товщину прикордонного шару. Такі ефекти виявляються при великих швидкостях руху суден. Задачі динамічного поведінки об'єктів на крутому хвилюванні також вимагають урахування в'язкості.

Розвиток запропонованої методики розв'язання задач гідродинаміки та динаміки морських об'єктів у рамках єдиного підходу дозволить спростити обґрунтування форми морських технічних споруд та засобів, розв'язання спеціальних нестандартних задач за рахунок часткової або повної відмови від дорогих модельних експериментів. До таких відносяться задачі, які вимагають урахування нелінійних ефектів при моделюванні хитавиці судна: вплив гідродинамічних ефектів коливного рідкого вантажу на динаміку судна; оголення корпусу судна, що приводить до слемінгу, що обумовлюють додаткові динамічні навантаження на конструкції корпусу в носовому районі – слопінг; взаємний вплив хитавиці двох судів, наприклад при обґрунтуванні можливості передачі вантажу у морі; вплив обмеженої ширини та глибини акваторії на динаміку судна.

Основними джерелами, які використовуються у ході дослідження, є роботи Ткаченка І.В., Нікущенко Д.В., Таранова А.Є., Ferziger J.H., Peric M., Paterson E., Wilson R., Coleman H., Simonsen C. [1-16]

Для чисельного моделювання потоків із гравітаційними хвилями звичайно використовуються два різні методи. Один з них заснований на гіпотезі безвихрового (потенційного) плину. Для моделювання потоку використовується спектральна теорія або застосовуються граничні інтегральні рівняння. Другий метод заснований на рівняннях Нав'є-Стокса або Ейлера, які розв'язуються без явних спрощень. Потенційним потоком можна точно описати нестационарні гравітаційні хвилі кінцевих амплітуд, які можуть моделюватися з усіма нелінійними ефектами й без будь-якого істотного хвильового загасання. Проте взаємодію хвиль із плином, зокрема, з полями кутових швидкостей, таким

методом описати складно через властиві спрощення. Вплив в'язкості або турбулентності на рух хвилі також не може бути врахований. При розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса такі обмеження, пов'язані з відсутністю кутових швидкостей, в'язкості й турбулентності, не накладаються.

У той же час розв'язання нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса для опису вільної поверхні звичайно приводять до порівняно більших числових помилок, які не дозволяють проводити точні довгочасні реалізації гравітаційних хвиль. Ці помилки проявляються головним чином у деяких з таких випадків. По-перше, дуже складно точно описати геометрію вільної поверхні та її еволюцію в часі, якщо тільки область рідини не дискретизована досить точно у межах її границь, наприклад, використовуючи метод спостереження за вільною поверхнею. У цьому випадку граничні умови повинні бути сформульовані у рухомій системі координат, що приводить до значного збільшення розрахункового часу. Такий підхід був введений у роботі Чана і часто називають методом рухомої сітки (Arbitrary Lagrangian-Eulerian – ALE). По-друге, для умов нестискаемого потоку граничні умови звичайно модифікують для забезпечення коректного зв'язку між полем швидкості і полем тиску. Це робиться або шляхом введення у граничні умови параметрів, що моделюються штучну стискальність, або з використанням методів, заснованих на SIMPLE/PISO алгоритмах, методах маркерів і гнізд (MAC) чи дробового кроку.

Реалізація граничних умов щодо тиску для твердих стінок у цих методах відносно проста. Однак, на вільній поверхні це не так, оскільки потрібне точне визначення абсолютного значення тиску для правильного опису переносу між потенційною й кінетичною енергією у хвильовому русі.

Для вирішень даних використовується модифікована версія методу Vof. Він зводиться до введення штучного члена для піджимання інтерфейсу поблизу вільної поверхні, а для виключення чисельних помилок, які накопичуються згодом при моделюванні гравітаційних хвиль, вводяться зони релаксації.

Зони релаксації реалізовані для того, щоб уникнути відбиття хвиль від вихідних границь та уникнути відбиття хвиль всередині обчислювальної області. Такі відбиті хвилі є чисельними помилками, які згубно впливають на границю, в якій генерується хвиля (можуть привести до чисельної нестійкості) та на вірогідність успішності чисельного експерименту в цілому. У цьому підході після кожного кроку часу при чисельному моделюванні частина обчислювального рішення поля модифікується відповідно до бажаного аналітичного рішення, яке представляє собою хвильову теорію.

Для верифікації результатів розрахунків судна на тихій воді використовувалися результати робіт, в яких досліджувалася серія корпусів тіла Виглей (Wigley). У дослідженні було досліджено тіло з коефіцієнтом повноти мідель шпангоута 0,909 та відношенням довжини й ширини 10.

Результати розрахунків зіставлялися з експериментальними даними. Головні розміри для тіла Виглей наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики тіла Виглей

Довжина, L (м)	3
Ширина, B (м)	0,3
Осад, d (м)	0,1875
Висота борту, H (м)	0,375
L/B (-)	10
β	0,6667
Водотоннажність V, (м ³)	0,078

У загальному випадку тіло Виглей представляє собою корпус із прямолінійним форштевнем та ахтерштевнем, ординати шпангоутів якого описуються рівнянням:

$$\eta = (1 - \zeta^2)(1 - \xi^2)(1 + a_2\xi^2 + a_4\xi^4) + a\zeta^2(1 - \zeta^8)(1 - \xi^2)^4, \quad (1)$$

де ξ – поздовжня координата, $-0.5 \leq \xi \leq +0.5$,
 η – поперечна координата, $-0.5 \leq \eta \leq +0.5$,
 ζ – вертикальна координата, $0 \leq \zeta \leq +1$.

Досліджуване тіло Виглей має такі характеристики: $a_2=0,2$, $a_4=0,0$, $\alpha=0,0$. Множення ξ, η та ζ на $L/2, B/2$ й d дає розмірний вид тіла Виглей, де L – довжина судна, B – ширина судна, а d – осадка судна. Теоретичне креслення тіла Виглей показане на рис. 1.

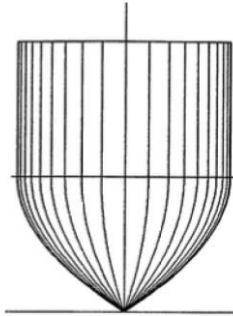


Рисунок 1 – Теоретичне креслення корпусу тіла Виглей

Розрахункові сітки. Для генерації розрахункової сітки використовувалася утиліта `createmesh`, що дозволяє в автоматичному режимі будувати структуровану сітку зі згущенням до досліджуваного об'єкта й утиліта `snappyhexmesh` з пакета `Openfoam`, що дозволяє вирізати й апроксимувати досліджуваний об'єкт із існуючої сітки.

При побудові розрахункової сітки слід врахувати, що y^+ не повинен бути менше 30.

$$y^+ \equiv \frac{U_{fric} \cdot ds}{\nu}; \quad (2)$$

$$U_{fric} = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}}; \quad (3)$$

$$\tau_{wall} = \frac{C_f \rho U_\infty^2}{2}; \quad (4)$$

$$C_f = \frac{0,026}{Re^{1/7}}; \quad (5)$$

$$Re = \frac{U_\infty L}{\nu}, \quad (6)$$

де y^+ – безрозмірна відстань першого гнізда від стінки тіла;

ds – характерний розмір першого гнізда у стінки тіла;

U_{fric} – швидкість тертя в пристіночній області;

τ_{wall} – тензор дотичних напружень;

C_f – опір тертя пластини;

Re – число Рейнольдса.

Структурована розрахункова сітка для тіла Виглей складається з 3 мільйонів гнізд, а її вигляд представлений на рис. 2.

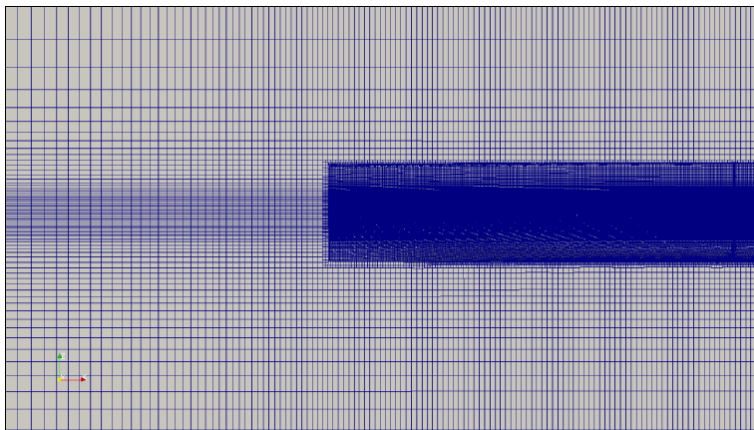


Рисунок 2 – Фрагмент розрахункової сітки для тіла Виглей

Моделювання руху тіла Виглей на тихій воді. Розрахунки руху судна на тихій воді були виконані з метою верифікації методики визначення інтегральних характеристик та оцінювання параметрів корабельних хвиль.

Умови чисельного експерименту були прийняті такі:

– число Фруда $Fr = u_0 \sqrt{gL}$, де u_0 – швидкість набігаючого потоку варіювалося від 0,2 до 0,4;

– щільність повітря покладалася рівною $\rho_{\text{повітря}} = 1,233 \text{ кг/м}^3$, кінематична в'язкість $\nu_{\text{повітря}} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$;

– щільність та кінематична в'язкість води – $\rho_{\text{води}} = 988,8 \text{ кг/м}^3$ та $\nu_{\text{води}} = 1.11 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ відповідно.

Для урахування впливу турбулентної інтенсивності Tu на величину інтегральних характеристик зроблена серія розрахунків, результати яких наведено в табл. 2 і у графічному виді на рисунках 3-4.

$$Tu = \frac{u'}{U}, \quad (7)$$

де $u' = \sqrt{u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2} = \sqrt{\frac{2}{3}k}$ – середньоквадратичне значення турбулентних пульсацій швидкості; $U = \sqrt{U_x + U_y + U_z}$ – середня швидкість.

Сила опору F дорівнює $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$, де F_x – поздовжня сила, що діє уздовж осі OX ; F_y – поперечна сила, що діє уздовж осі OY ; F_z – вертикальна сила, що діє уздовж осі OZ , що й визначаються за формулами:

$$F_x = F_{p_x} + F_{v_x} = - \oint p \cos(p, x) + \tau_0 \cos(\tau_0, x) dS; \quad (8)$$

$$F_y = F_{p_y} + F_{v_y} = - \oint p \cos(p, y) + \tau_0 \cos(\tau_0, y) dS; \quad (9)$$

$$F_z = F_{p_z} + F_{v_z} = - \oint p \cos(p, z) + \tau_0 \cos(\tau_0, z) dS. \quad (10)$$

Тут p та τ_0 напруги поверхневих сил, що виникають при обтіканні тіла, F_p – складова сила за тиском, F_v – в'язкісна складова сили.

У роботі показано, що турбулентні інтенсивності у діапазоні 1-5 % дають найменше відхилення $Error\%$ від експериментальних даних, яке становить від 3,4 % до 11,8 % для різних чисел Фруда, що узгоджується з експериментальними отриманими результатами. В'язкісна складова опору $v\%$ при цьому становить від 47,0 % до 79,3 %.

Таблиця 2 – Сила опору тіла Виглей залежно від числа Фруда й турбулентної інтенсивності

Fr	0.2	0.3	0.4
Експеримент [3], Н	3.42	9.97	19.86
Tu , %	0.1		
$F_x = F_{px} + F_{vx}$, Н	1.67	6.13	15.88
F_{px} , Н	0.76	4.61	9.19
F_{vx} , Н	0.90	1.51	6.69
$Error\%$	51.2	38.6	20.0
$u\%$	54.2	24.7	42.1
Tu , %	0.5		
$F_x = F_{px} + F_{vx}$, Н	1.67	9.52	17.73
F_{px} , Н	0.76	4.48	9.30
F_{vx} , Н	0.91	5.04	8.43
$Error\%$	51.2	4.5	10.7
$u\%$	54.3	52.9	47.6
Tu , %	1.0		
$F_x = F_{px} + F_{vx}$, Н	3.19	9.63	17.64
F_{px} , Н	0.66	4.48	9.28
F_{vx} , Н	2.53	5.15	8.37
$Error\%$	6.7	3.4	11.2
$u\%$	79.3	53.5	47.4
Tu , %	5.0		
$F_x = F_{px} + F_{vx}$, Н	3.20	9.61	17.52
F_{px} , Н	0.66	4.48	9.28
F_{vx} , Н	2.54	5.13	8.24
$Error\%$	6.4	3.6	11.8
$u\%$	79.3	53.4	47.0

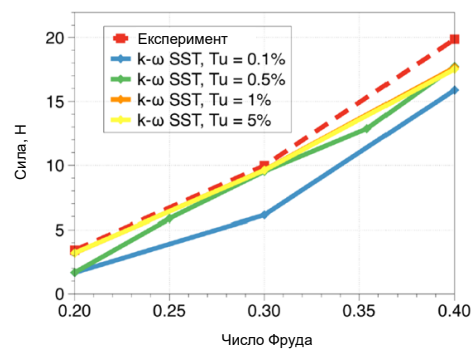


Рисунок 3 – Сила опору тіла Виглей залежно від числа Фруда та турбулентної інтенсивності

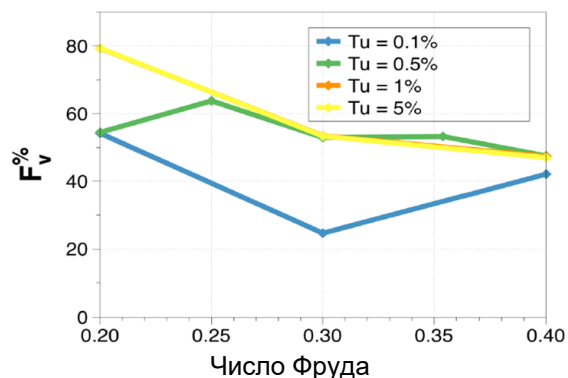


Рисунок 4 – В'язкісна складова опору у відсотках від повного опору тіла Виглей

Розподіл динамічного тиску й положення вільної поверхні по корпусу тіла Виглей для різних чисел Фруда представлені на рис. 5 (а-в).

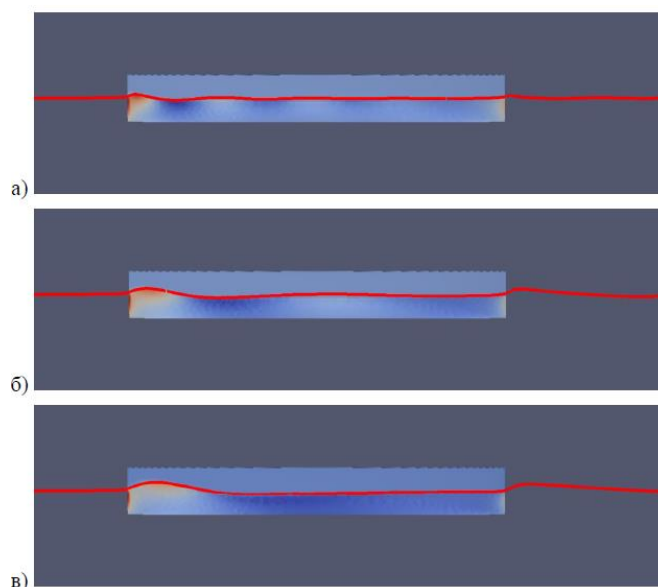


Рисунок 5 – Розподіл тиску та положення вільної поверхні на корпусі тіла Виглей при різних числах Фруда: а) 0.2, б) 0.3, в) 0.4.

При русі судна по вільній поверхні рідини виникають хвилі, які викликають хвильовий опір. Це обумовлено дією сили ваги і сил поверхневого натягу на границі розділу середовищ. Вільна поверхня не перешкоджає виникненню вертикальних переміщень рідини, тому у районі носа й корми, де відповідно до рівняння Бернуллі при обтіканні тіла тиск підвищений, рівень рідини підвищується, а в середній частині, де у потоці виникає розрядження, – знижується.

Частки рідини, розташовані близько до поверхні й виведені зі стану рівноваги, під дією сил ваги та поверхневого натягу починають робити коливання, фаза яких внаслідок сил інерції відстає від основних збурень. Ці коливання, джерелами яких є носовий та кормовий край судна, викликають вторинні викривлення вільної поверхні та додаткові

швидкості у потоці. Отже, картина хвильоутворення виникає у результаті складного процесу накладення цих видів деформацій вільної поверхні.

У носовому краї судна у місці контакту корпусу з вільною поверхнею утворюється бугор, зона підвищених тисків на корпусі.

Вниз за течією тиск падає. У районі міделевого перетину спостерігається його незначне підвищення. У кормовому краї тиск вищий, ніж у районі міделевого перетину, але нижчий ніж у носі.

Зміна поля швидкостей, викликана хвильоутворенням, призводить до появи хвильових тисків, у результат дій яких створює силу хвильового опору, а також інші складові сил та моментів хвильової природи.

Картина хвильоутворення залежить від швидкості руху судна. Зі збільшенням швидкості у кормовій частині виникають значні розрідження, які поряд з підвищенням тиску в носі викликають хвильовий опір.

Характерна картина хвильоутворення показана на рис. 6.

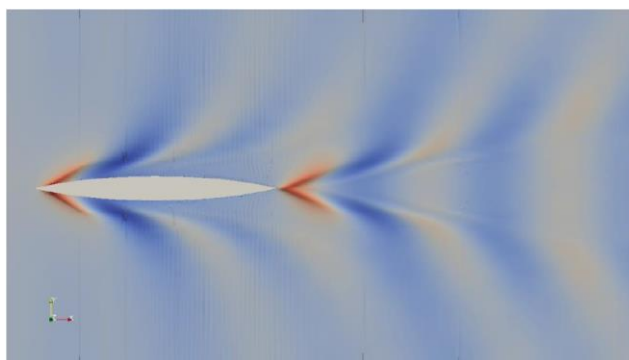


Рисунок 6 – Система хвиль біля тіла Виглей при $Fr=0.3$. Вид зверху.

Чітко спостерігається носова та кормова система хвиль. Кут нахилу гребенів хвиль до діаметральної площини становить близько 20 градусів, що добре узгоджується з теоретичним значенням (кут Кельвіна).

Для проведення моделювання хитавиці морських об'єктів на хвилюванні потрібно визначити показники чисельного басейну. Внаслідок того, що задача розв'язується у в'язкісній постановці, необхідно отримати достатній сітковий розподіл за всією висотою гравітаційної хвилі. Інакше, може відбутися в'язкісна дисипація хвилі із сильною зміною енергетичних і геометричних параметрів.

Умови чисельного експерименту. Для завдання хвильової поверхні використовувалася хвиля Стокса першого роду описується такими рівняннями:

$$\zeta = \zeta_a \cdot \cos(kx - \omega t + kU_0 t); \quad (11)$$

$$u_x = \zeta_a \cdot \omega \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cdot \cos(kx - \omega t + kU_0 t); \quad (12)$$

$$u_y = \zeta_a \cdot \omega \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cdot \sin(kx - \omega t + kU_0 t), \quad (13)$$

де ζ – положення вільної поверхні, u_x, u_y – проекції швидкостей, ζ_a – амплітуда хвилі, ω – кутова частота хвилі, k – хвильове число, ε – фаза хвилі, h – глибина басейну, z – координата по глибині, U_0 – швидкість течії. Хвильові постійні визначаються через співвідношення:

$$k\lambda = 2\pi; \quad (14)$$

$$\omega T = 2\pi; \quad (15)$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}; \quad (16)$$

$$H = 2 \cdot \zeta_a; \quad (17)$$

$$\omega^2 = kg \cdot \tanh kh, \quad (18)$$

де λ – довжина хвилі, T – період хвилі, c – фазова швидкість хвилі, H – висота хвилі, g – гравітаційна постійна.

Задача моделювання хвилі Стокса розв'язується у двовимірній постановці. На рис. 7 схематично представлені зони релаксації у чисельному басейні. В експерименті проводиться аналіз їх впливу на стійкість хвилі. Між зонами розташовується 20 реперних точок, в яких у кожний момент часу моделювання фіксується положення вільної поверхні для порівняння з вихідною хвилею.

На рис. 8 наведена розрахункова сітка. Зроблений аналіз сіткової збіжності, в якому варіювалася кількість гнізд на довжину й висоту хвилі.

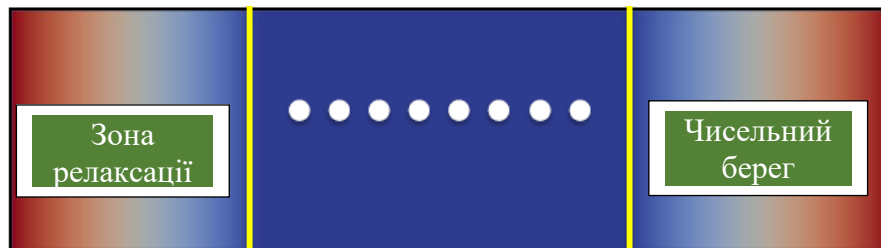


Рисунок 7 – Розташування зон релаксації в чисельному басейні

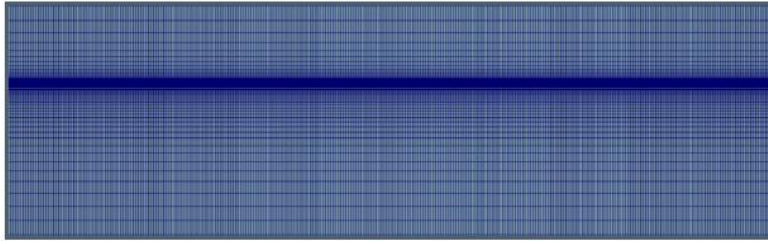


Рисунок 8 – Зразковий варіант розрахункової сітки

Результати розрахунків. У серії чисельних експериментів було розглянуто дві хвилі, одна мала крутість $H/\lambda=0,012$, а інша – у 10 разів меншу $H/\lambda=0,0012$, тобто при тій самій висоті мала довжину у 10 раз більшу.

Для проведення чисельного експерименту потрібно визначити розміри чисельного басейну, зону досліджуваного об'єкта з відповідним згущенням розрахункової сітки для точного визначення гідродинамічних сил, а також зону, в якій повинна добре моделюватися хвильова поверхня.

Для спрощення створення розрахункової сітки та збільшення швидкості підготовки завдання для чисельного моделювання мовою програмування Python написана утиліта `createmesh`, в основі якої лежать алгебраїчні рівняння. Програма підготує файл, структура якого використовується утилітою `blockmesh`, яка входить в `Openfoam`.

Вона дозволяє будувати структуровані сітки, що складаються з гексаєдрів. Основний принцип роботи утиліти `blockmesh` – розподіл розрахункової області на один або більш тривимірних гексаєдральних блоків. Ребрами цих блоків можуть бути відрізки прямих, дуги або сплайни. Розрахункова сітка виходить розбивкою кожного блоку на певне число гнізд у кожному напрямку. Кожний блок геометрії визначається 8 координатами, по одній на кожний кут гексаєдра. Кожний блок має локальну систему координат, яка повинна бути визначена за правилом правої руки. Вихідні параметри утиліти `createmesh` для створення розрахункової області наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Вихідні параметри утиліти `createmesh` для створення розрахункової сітки чисельного басейну

Змінна	Розшифрування	Опис
L	Length	Довжина досліджуваного об'єкта, м
B	Breadth	Ширина досліджуваного об'єкта, м
H	Height	Висота досліджуваного об'єкта, м
λ	λ/L	Відносна довжина хвилі λ/L , -
wH	wave Height	Висота зони хвилі, м
$wHnC$	wave Height number of Cells	Кількість гнізд на висоту хвилі, -
$wLnC$	wave Length number of Cells	Кількість гнізд на довжину хвилі, -
$sCtC$	side Cell to Cell	Коефіцієнт згущення сітки, -
iR	input Ratio	Відносна довжина вхідної області, -
hR	hull Ratio	Відносна довжина області досліджуваного об'єкта, -
oR	output Ratio	Відносна довжина вихідної області, -
sR	side Ratio	Відносна довжина бічної області, -
bR	bottom Ratio	Відносна глибина області води, -
tR	top Ratio	Відносна висота області повітря, -

Для обробки значного обсягу експериментальних даних потрібно спеціалізоване програмне забезпечення. При проведенні чисельного моделювання у кожний момент

розрахункового часу відбувається запис вихідних даних у спеціальний файл реєстрації – лог файл.

Чисельне моделювання нестационарних процесів повинно задовольняти критерію Куранта-Фридрихса-Леві (критерій КФЛ) – швидкість поширень збурювань у різницевому завданні не повинна бути меншою, ніж у диференційній формі. Якщо ця умова не виконана, то результат різницевої схеми може не відповідати рішенню диференціальних рівнянь.

Інакше кажучи, за один крок за часом частка не повинна проходити більш одного гнізда.

В одномірному випадку умова має вигляд:

$$C_0 = \frac{|U| \cdot \Delta t}{\Delta x} < C, \quad (19)$$

де U – швидкість переносу, Δt – часовий крок, Δx – просторовий крок, C – константа.

Якщо $CFL > 1$, то стійкість та збіжність рішення різницевої задачі до рішення диференціальної задачі відсутні. На практиці для стійкості процесу значення константи C приймається 0,5. Зменшення числа C_0 приводить до зменшення часового кроку, що, у свою чергу, збільшує час обчислень, а також обсяг отриманих вихідних даних.

Для визначення інтегральних характеристик у кожний момент часу відбувається реєстрація складових сил та моментів за тиском (20) та в'язкості (21), що діють із боку рідини на тверде тіло:

$$F_{pi} = - \oint p \cos(p, i) dS; \quad (20)$$

$$F_{vi} = - \oint \tau_0 \cos(\tau_0, i) dS, \quad (21)$$

де p і τ_0 – напруги поверхневих сил, що виникають при обтіканні тіла, $i=x,y,z$ – відповідні проекції.

Для визначення переміщення твердого тіла у просторі під дією збурюючих сил у кожний момент часу відбувається реєстрація положення центру мас, а також його лінійних та кутових швидкостей.

Для обробки чисельного експерименту розроблений програмний комплекс, структура якого зображена на рис. 9.

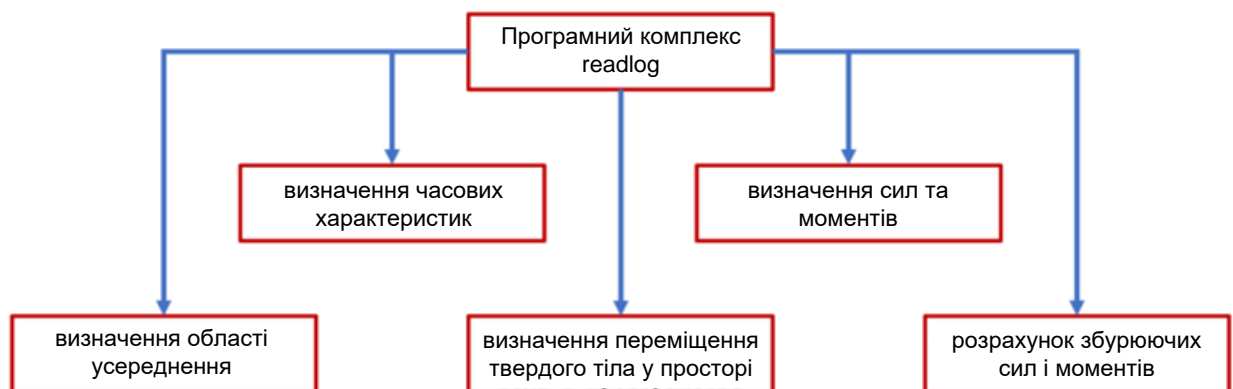


Рисунок 9 – Блок-схема структури програмного комплексу readlog

Розроблена програма розділена на 5 підпрограм:

Визначення часових характеристик, в якій відображається поточний час моделювання. Повний час розділяється на час, витрачений на ітераційні процеси

визначення поля тиску та швидкості, на визначення скалярів моделей турбулентності і фракції рідини, а також для динамічної системи, на зміну розрахункової сітки під нове положення досліджуваного об'єкта.

Визначення сил та моментів. Унаслідок того, що гідродинамічні характеристики у нестационарному процесі реєструються з непостійним часовим кроком, який варіюється залежно від критерію КФЛ, підпрограма для осереднення процесу виконує чисельне інтегрування за правилом трапеції.

Визначення переміщень твердого тіла. Як було сказано вище, у лог-файл Openfoam при переміщенні досліджуваного об'єкта реєструється положення його центру мас та лінійні й кутові швидкості. Для визначення амплітуд вертикальних й кутових переміщень підпрограма робить інтегрування лінійних та кутових швидкостей, а потім за допомогою спеціальної функції знаходить піки зареєстрованого сигналу й виконує їх осереднення.

Визначення зони чисельного басейну. Для визначення зони чисельного басейну необхідно провести аналітичне дослідження динаміки морського об'єкта на регулярному хвилюванні. Тим самим визначити основні параметри хвилювання, при якому можливий резонанс, такі як довжина хвилі, частота та її період. Таке аналітичне рішення є неточним, але достатнім для визначення області, в якій необхідно зосередити найбільшу кількість прогонів чисельного експерименту.

Визначивши довжину хвилі, можна визначити область, в якій буде виконуватися чисельне моделювання. Для формування стійкої хвилі потрібно, щоб перед досліджуваним тілом можна було розташувати три довжини хвилі. Причому дві довжини хвилі повинні бути розташовані в зоні релаксації – зоні «розгону» та «формуванні» чисельної хвилі. Ще одна довжина хвилі перед досліджуваним тілом необхідна для того, щоб відбиті хвилі від тіла дисипували й не деформували вже згенеровану хвилю.

Для відпрацювання чисельного кордону – зворотної зони релаксації, необхідне розміщення більш чотирьох довжин хвиль за досліджуваним тілом. Одна довжина хвилі поблизу тіла для якісної картини обтікання і, як наслідок, фізично вірної взаємодії об'єкта та обтічного середовища. І три довжини хвилі на зону чисельного кордону для того, щоб використовувана функція могла без чисельних помилок «дисипувати» наявні коливання вільної поверхні.

При побудові розрахункової сітки, слід врахувати такі моменти:

1. Безрозмірна відстань першого гнізда від стінки тіла y^+ не повинна бути більше 30, або менше 1. $y^+ < 1$ на сьогоднішній день є наймовірно складною умовою тому, що результуюча розрахункова сітка буде мати дуже велику кількість гнізд (більш 20 мільйонів), що приведе до зростання часу самих розрахунків.

2. Для інженерних розрахунків слід прийняти 120 гнізд мінімальним значенням для довжини хвилі, а 20 гнізд для висоти хвилі.

Визначення початкових параметрів моделі турбулентності. Проведене дослідження впливу моделі турбулентності на збіжність і вірогідність рішення. Так, при RANS постановці задачі й високих числах Рейнольдса потрібно використання моделей турбулентностей. На сьогоднішній день $k-\omega$ SST модель турбулентності, запропонована Ментером, добре зарекомендувала себе у завданнях корабельної гідродинаміки. При цьому питання визначення початкових параметрів турбулентної кінетичної енергії k та її дисипації ω залишається відкритим. Однією зі сполучних ланок між ними є турбулентна інтенсивність.

Ступінь турбулентності або турбулентна інтенсивність – це захід інтенсивності турбулентних пульсацій. За допомогою її може бути визначене значення турбулентної кінетичної енергії за наближеною формулою. При постановці граничних умов для чисельного моделювання задач гідромеханіки часто необхідно оцінити інтенсивність

турбулентності на вхідних границях. Її визначення ґрунтується на попередніх дослідженнях проведення моделювання й експериментів.

Висновки. Проведено дослідження впливу чисельного кордону на генеруємі хвилі. При наявності зони розгону хвилі швидкість збіжності рішення значно збільшується. Розміри такої зони повинні бути не менш двох довжин хвиль, оскільки інакше результуюча зона може мати змінений профіль і, отже, відмінні від вихідних хвильові параметри. Таким чином, використання чисельного кордону є обов'язковою умовою. При його відсутності відбувається чисельне відбиття хвилі від вихідної границі. Формується система хвиль різної амплітуди й частоти, що не може задовольняти умові поставленого завдання про регулярне хвилювання.

Література

1. Ткаченко И.В. Моделирование взаимодействия тел и гидрофизических полей морской среды методом крупных вихрей: дис. на соискание уч. ст. д-ра. тех. наук. - СПб., СПбГМТУ, 2005. - 316 с.
2. Никущенко Д.В., Зубова А.А. Моделирование гидродинамического взаимодействия при проходе стоящего судна в условиях встречного течения и с учётом волнообразования // Морские интеллектуальные технологии. 2015. Т. 2. № 3. С. 68-74.
3. Зверков В.Н., Никущенко Д.В. Численное моделирование качки движущегося судна на встречном регулярном волнении. // Морские интеллектуальные технологии. 2014. № 26. С. 116-121.
4. Овчинников К.Д., Ткаченко И.В., Тряскин Н.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении // Морские интеллектуальные технологии. 2015. Т. 1. № 2 (28). С. 14-18.
5. Ткаченко И.В., Тряскин Н.В. Численное моделирование качки судна на регулярном волнении // Морские интеллектуальные технологии. 2013. № 3 (21). С. 24-28.
6. Bagaev D.V., Lobachev M.P., Ovchinnikov N.A., Taranov A.E. Prediction of the scale effect for the hull-propeller interaction factors // Computational Methods in Marine Engineering V - Proceedings of the 5th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2013 2013. С. 699-710.
7. Таранов А.Е. Моделирование заливаемости и брызгообразования в носовой оконечности турельного судна // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. № 78 (362). С. 75-78.
8. Ferziger, J.H., Peric, M., 2002. Computational Methods for Fluid Dynamics, (Third Edit.) Springer, Berlin, Germany.
9. Boger, David & W Noack, Ralph & Paterson, Eric. (2010). Dynamic Overset Grid Implementation in OpenFOAM. 5th OpenFOAM Workshop, At Chalmers, Gothenburg, Sweden, 2010.
10. Goong Chen, Qingang Xiong, Phillip J. Morris, Eric G. Paterson, Alexey Sergeev, Yi-Ching Wang (2015): OpenFOAM for computational fluid dynamics. Notices Amer. Math. Soc. 61, 354.
11. Nobuaki Sakamoto, Wilson R.V., Stern F., Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations for High-Speed Wigley Hull in Deep and Shallow Water // Journal of Ship Research, Vol.51, No 3, 2007, pp. 187-203.

12. Stern, F., Wilson, R.V., Coleman, H.W., Paterson, E.G., 2001. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations-Part 1: methodology and procedures. *J. Fluids Eng.* 123 (4), 793–802.
13. Wilson, R., Paterson, E., Stern, F. 1998. Unsteady RANS CFD method for naval combatants in waves. In: *Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, U.S.*, pp. 532–549.
14. Simonsen C.D., Stern, F. 2010. CFD simulation of KCS sailing in regular head waves. In: *Proceedings from Gothenburg 2010 - A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Gothenburg.*
15. Simonsen, C.D., Otzen, J.F., Joncquez, S., Stern, F., 2013. EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves. *J. Mar. Sci. Technol.* 18 (4), 435–459.
16. Otzen, J.F., Simonsen, C.D. 2010. Uncertainty Assessment for KCS Resistance and Propulsion Tests in Waves. FORCE Technology Report no. ONRIII187 01, Lyngby.

Maslov I.Z.

RESEARCH OF THE MODEL AND CALCULATION METHODS OF VESSEL HYDRODYNAMICS ON WAVES

The work deals with a scientific and practical task, the solution of which is of significant practical interest. The existing methods of justifying the sway parameters require the involvement of the results of expensive model experiments, in particular, to take into account viscous damping. The capabilities of existing computer equipment, computer technologies and appropriate software allow, at the initial stages of designing marine technical objects, to fairly accurately predict the parameters of their wobble due to turbulence, taking into account the forces of viscous nature. This makes it possible to significantly reduce the cost of design work in terms of determining the hydrodynamic characteristics of marine objects. On the basis of the conducted research, the following results were obtained: an analysis of existing approaches to solving the problems of hydrodynamics and dynamics (rocking) of sea vessels and other technical structures on waves was carried out, a mathematical model of the complex problem of hydrodynamics and dynamics of a marine object for a viscous liquid was developed, a methodology for conducting a numerical experiment for calculating rocking motion on a regular wave was developed, software was developed for preparing output data and processing the results of a numerical experiment, practical recommendations were developed for numerically modeling the rocking of a marine object on regular waves and determining the dynamic parameters of the rocking motion, a numerical simulation of the dynamics of the movement of a sea vessel was carried out on excitement

Key words: *mathematical models, hydrodynamics, viscosity, waves, rocking, ship, marine objects.*

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

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРУ МАС РЯТУВАЛЬНОЇ ШЛЮПКИ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ВІДНОСНО ОПОРНОЇ ПОВЕРХНІ НА ЇЇ РУХ ПРИ СКИДАННІ З СУДНА

Розглянуто задачу про рух рятувальних шлюпок вільного падіння (РШВП) при скиданні з судна з урахуванням зміщення центру мас відносно опорних поверхонь протягом фази обертання – з моменту, коли центр мас шлюпки опиняється над краєм опори (крайнім роликом рампи) до моменту сходу з рампи кінця опорних поверхонь шлюпки. Для складання диференціальних рівнянь руху РШВП впродовж фази обертання застосовано рівняння Лагранжа другого роду в полярній системі координат (диференціальні рівняння плоско-паралельного руху шлюпки в узагальнених координатах, де r – відстань від краю опори до проекції центру мас на опорну поверхню і φ – кут нахилу опорної поверхні шлюпки до горизонту).

Отримано розв'язувальну систему двох звичайних нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку і сформульовано відповідну задачу Коші, яка розв'язується чисельно за допомогою методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності.

Апробація розробленого підходу здійснена для випадку моделювання шлюпки однорідним стрижнем у формі прямокутного паралелепіпеда довжиною L і товщиною h . Отримано відповідну розв'язувальну систему чотирьох звичайних нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку у формі Коші в узагальнених координатах r і φ , для якої сформульовано задачу Коші, що розв'язувалась чисельно методом Рунге-Кутта четвертого порядку точності при значенні кута нахилу рампи $\alpha = 35^\circ$ для стрижнів товщиною 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 м і довжиною 5, 10 і 15 м при початкових швидкостях відповідно 6, 8 і 10 м/с.

Результати розрахунків тривалості фази обертання, кута нахилу та кута тангажу, радіальної і кутової швидкості, швидкості центру мас та її вертикальної і горизонтальної складових, кута нахилу вектора швидкості центру мас до опорних поверхонь шлюпки свідчать, що при розташуванні центру мас над опорною поверхнею напрямного бруса збільшення його відстані до опорної поверхні призводить до зростання усіх параметрів руху РШВП в кінці фази обертання. При цьому вплив зміщення зростає зі зменшенням довжини шлюпки (моменту інерції відносно центру мас).

За результатами роботи зроблено висновок про можливість використання запропонованого підходу і проведення чисельних експериментів для раціонального вибору параметрів руху РШВП та визначені напрями подальших досліджень.

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

Постановка проблеми. Перші системи рятувальних шлюпок вільного падіння (РШВП) були розроблені в 1970-х роках як рятувальні системи, які забезпечували безпечну і швидко евакуацію людей з аварійного судна навіть при несприятливих погодних умовах. Подальші розробки РШВП супроводжуються як експериментальними, так і теоретичними

дослідженнями з метою оптимізації конструкції шлюпки та спускного пристрою для забезпечення вимог Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі SOLAS – 74 щодо відсутності будь-якого шкідливого для пасажирів прискорення при запуску рятувальної шлюпки у воду. Величина небезпечних прискорень, яких зазнає РШВП разом з евакуйованими людьми при входженні в воду, визначається попередніми взаємно пов'язаними етапами її руху при скиданні з судна: ковзанням по похилій рампи до досягнення її центром мас краю рампи (фаза ковзання), обмеженим падінням до відриву від рампи (фаза обертання) і вільним падінням до контакту носової частини шлюпки з водою (фаза вільного падіння) [1, 2, 3]. Найбільш складним з етапів для теоретичного дослідження є фаза обертання, рух РШВП протягом якої описується диференціальними рівняннями, розв'язування яких через відсутність відомих аналітичних розв'язків потребує застосування чисельних методів.

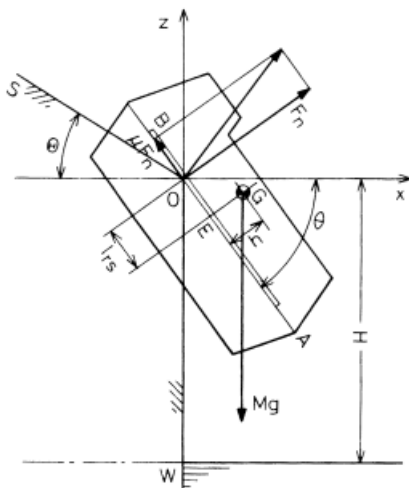


Рисунок. 1. Рух РШВП протягом фази обертання

Рух рятувальної шлюпки (рис.1), в декартовій системі координат протягом фази обертання зазвичай [2, 4, 5, 6] описується трьома диференціальними рівняннями, два з яких описують рух центру мас човна, а третє – обертальний рух човна. Зокрема, в роботах [5, 6] ці рівняння мають вигляд (1):

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} &= F_n \sin(\theta - \varphi) / \cos \varphi, \\
 M\ddot{z} &= F_n \cos(\theta - \varphi) / \cos \varphi - Mg, \\
 I\ddot{\theta} &= F_n \{x \cos(\theta - \varphi) - z \sin(\theta - \varphi)\} / \cos \varphi,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де M – маса рятувальної шлюпки, I – момент інерції шлюпки відносно горизонтальної осі, що проходить через центр мас перпендикулярно до площини рисунка, θ – кут нахилу осі шлюпки до горизонталі, x і z – координати центру мас шлюпки, \dot{x} , \dot{z} , $\dot{\theta}$ – другі похідні за часом координат центру мас шлюпки та кута нахилу шлюпки до горизонталі, φ – кут тертя ковзання ($\mu = \tan \varphi$ – коефіцієнт тертя ковзання), Mg – сила тяжіння, F_n – нормальна реакція рампи, μF_n – сила тертя паралельна опорній поверхні напрямного бруса.

Окрім цих трьох рівнянь, записується також рівняння сумісності переміщень.

$$x \sin \theta + z \cos \theta = h,$$

де h – відстань центру мас шлюпки від опорної поверхні напрямного бруса.

Розв'язування цих рівнянь вочевидь є досить складним завданням, оскільки присутня в них динамічна реакція F_n є наперед невідомою змінною величиною, а інформація щодо методики їх розв'язування у відомих відкритих джерелах на жаль відсутня.

В роботі [3] наведено розв'язок задачі про рух РШВП при скочуванні з похилої рампи впродовж фази обертання. При цьому шлюпка моделюється однорідним стрижнем (рис. 2) і використовується більш проста система двох диференціальних рівнянь в полярній системі координат (2), отримана за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду.

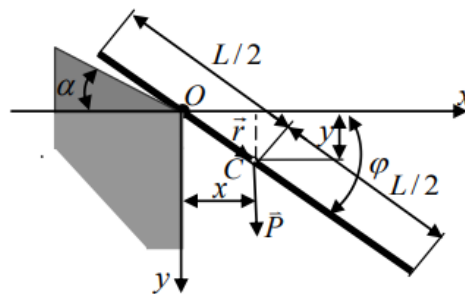


Рисунок 2. Сходження шлюпки, що моделюється однорідним стрижнем, з похилої рампи

$$\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 = g \sin \varphi;$$

$$2r\dot{r}\dot{\varphi} + \left(\frac{L^2}{12} + r^2 \right) \ddot{\varphi} = gr \cos \varphi, \quad (2)$$

де $r = OC$ – відстань від початку координат (полюса), розташованого на краю рампи, до центру мас стрижня, φ – полярний кут між горизонтальною віссю x і напрямком OC – віссю стрижня, $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ і $\ddot{r} = \frac{d^2r}{dt^2}$ – радіальні швидкість і прискорення центру мас, $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ і $\ddot{\varphi} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ – кутова швидкість і кутове прискорення стрижня в обертальному русі.

Для отриманої розв'язувальної системи звичайних диференціальних рівнянь сформульовано відповідну задачу Коші, яка розв'язується чисельно за допомогою методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності. За результатами роботи зроблено висновок про можливість використання запропонованого підходу і чисельних експериментів для раціонального вибору параметрів руху РШВП, що сходять з похилої рампи. Як правило, центр мас шлюпки зміщений по відношенню до опорної поверхні, тому пошук способів врахування цієї обставини в диференціальних рівняннях руху шлюпки в полярній системі координат є безумовно актуальним.

Мета дослідження полягає в розробці та використанні адекватної математичної моделі та методики для дослідження впливу зміщення центру мас рятувальної шлюпки вільного падіння по відношенню до опорної поверхні на параметри її руху впродовж фази обертання та на початку вільного падіння.

Основні матеріали дослідження. Для складання диференціальних рівнянь руху РШВП впродовж фази обертання (рис. 3) застосуємо рівняння Лагранжа другого роду [8, 9]. Враховуючи те, що для відомих спускних пристроїв значення приведених коефіцієнтів тертя малі ($\mu = 0,02 \dots 0,05$), силами тертя, як і в роботі [7] знехтуємо.

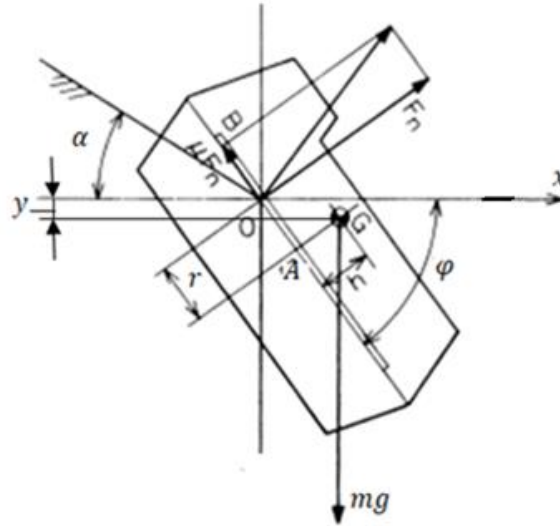


Рисунок 3 – Сходження РШВП з похилої рампі:

В якості узагальнених координат приймемо радіус $r = OA$ – відстань від проекції центру мас стрижня на його опорну поверхню до краю опори і полярний кут φ між горизонтальною віссю x і напрямком OA – опорною поверхнею напрямного бруса.

В даному випадку рівняння Лагранжа другого роду мають вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} \right) - \frac{\delta T}{\delta r} = Q_1,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} \right) - \frac{\delta T}{\delta \varphi} = Q_2,$$

де T – кінетична енергія рятувальної шлюпки, $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ – модуль швидкості проекції центру мас шлюпки на опорну поверхню напрямного бруса, $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ – модуль кутової швидкості шлюпки, Q_1 і Q_2 – узагальнені сили.

Кінетична енергія шлюпки при її русі визначається з виразу:

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

де I_{zc} – момент інерції шлюпки відносно центру мас, V_c – модуль вектора швидкості центру мас.

Швидкість точки G – центру мас шлюпки, яка здійснює плоско-паралельний рух, дорівнює сумі швидкості точки A та швидкості точки G при обертанні шлюпки навколо точки A :

$$\vec{V}_G = \vec{V}_A + \vec{V}_{GA},$$

де швидкості \vec{V}_A і \vec{V}_{GA} визначаються формулами $\vec{V}_A = \dot{r} + \dot{\varphi} \times \vec{r}$ і $\vec{V}_{GA} = \dot{\varphi} \times \vec{AG}$.

Враховуючи, що колінеарні вектори \vec{r} та \vec{V}_{GA} мають модулі $|\vec{r}| = r$ та $|\vec{V}_{GA}| = h\dot{\varphi}$, а перпендикулярний до них вектор - вектор векторного добутку $\vec{\varphi} \times \vec{r}$ має модуль $|\vec{\varphi} \times \vec{r}| = \dot{\varphi}r$, а також те, що у випадку розташування центру мас шлюпки над опорною поверхнею вектори \vec{r} та \vec{V}_{GA} співнаправлені, модуль вектора швидкості центру мас РШВП визначиться з виразу:

$$V_c = \sqrt{(\dot{r} + h\dot{\varphi})^2 + (r\dot{\varphi})^2} = \sqrt{\dot{r}^2 + 2h\dot{r}\dot{\varphi} + (r^2 + h^2)\dot{\varphi}^2} \quad (3)$$

Отримаємо наступний вираз для кінетичної енергії шлюпки:

$$T = \frac{I_{zc}\dot{\varphi}^2}{2} + \frac{m}{2}(\dot{r}^2 + 2h\dot{r}\dot{\varphi} + (r^2 + h^2)\dot{\varphi}^2). \quad (4)$$

Знайдемо похідні, що входять в ліву частину першого рівняння Лагранжа.

$$\begin{aligned} \frac{\delta T}{\delta \dot{r}} &= m(\dot{r} + h\dot{\varphi}); \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} \right) &= \frac{d}{dt} (m(\dot{r} + h\dot{\varphi})) = m(\ddot{r} + h\ddot{\varphi}), \\ \frac{\delta T}{\delta r} &= \frac{m}{2} \cdot \frac{\delta}{\delta r} (\dot{r}^2 + 2h\dot{r}\dot{\varphi} + (r^2 + h^2)\dot{\varphi}^2) = \frac{m}{2} (2r\dot{\varphi}^2) = mr\dot{\varphi}^2. \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} \right) - \frac{\delta T}{\delta r} &= m(\ddot{r} + h\ddot{\varphi}) - mr\dot{\varphi}^2 = m(\ddot{r} + h\ddot{\varphi} - r\dot{\varphi}^2) = Q_1. \end{aligned}$$

Визначимо узагальнену силу Q_1 по координаті $q_1 = r$.

Розглянемо можливе вертикальне переміщення центру мас шлюпки δy , зумовлене можливим приростом узагальненої координати δr :

$$\delta y = (r + \delta r)\sin\varphi - \frac{h}{2}\cos\varphi - r\sin\varphi + \frac{h}{2}\cos\varphi = \delta r\sin\varphi.$$

Можлива робота δA сили тяжіння mg шлюпки на цьому можливому переміщенні дорівнює:

$$\delta A = mg\delta r\sin\varphi;$$

З іншого боку $\delta A = Q_1\delta q_1 = Q_1\delta r$. Отже, $Q_1 = mg\sin\varphi$.

Підставляючи отриманий вираз в перше рівняння Лагранжа, отримаємо наступне диференціальне рівняння руху центру мас шлюпки:

$$\ddot{r} = g\sin\varphi + r\dot{\varphi}^2 - h\ddot{\varphi} \quad (5)$$

Знайдемо похідні, що входять в ліву частину другого рівняння Лагранжа для шлюпки

$$\begin{aligned} \frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} &= I_{zG}\dot{\varphi} + m(h\dot{r} + (r^2 + h^2)\dot{\varphi}); \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} \right) &= I_{zG}\ddot{\varphi} + m(h\ddot{r} + 2r\dot{\varphi}\dot{r} + (r^2 + h^2)\ddot{\varphi}); \\ \frac{\delta T}{\delta \varphi} &= 0; \end{aligned}$$

Визначимо узагальнену силу Q_2 по координаті $q_2 = \varphi$.

Розглянемо можливе вертикальне переміщення центру мас шлюпки δy , зумовлене можливим приростом узагальненої координати $\delta\varphi$.

$$\begin{aligned}\delta y &= r\sin(\varphi + \delta\varphi) - h\cos(\varphi + \delta\varphi) - r\sin\varphi + h\cos\varphi = \\ &= r\sin\varphi\cos\delta\varphi + r\cos\varphi\sin\delta\varphi - h\cos\varphi\cos\delta\varphi + h\sin\varphi\sin\delta\varphi - r\sin\varphi + h\cos\varphi.\end{aligned}$$

Оскільки $\cos\delta\varphi \approx 1$, $\sin\delta\varphi \approx \delta\varphi$, то можна вважати, що

$$\delta y = \delta\varphi(rcos\varphi + h\sin\varphi).$$

Тоді можлива робота δA сили тяжіння mg шлюпки на цьому можливому переміщенні $\delta A = mg\delta\varphi(rcos\varphi + h\sin\varphi)$. З іншого боку $\delta A = Q_2\delta q_2 = Q_2\delta\varphi$.

Отже, $Q_2 = mg(rcos\varphi + h\sin\varphi)$.

Підставивши отриманий вираз в друге рівняння Лагранжа, отримаємо наступне диференціальне рівняння для обертального руху шлюпки:

$$I_{zG}\ddot{\varphi} + m(r^2 + h^2)\ddot{\varphi} + mh\dot{r} = mg(rcos\varphi + h\sin\varphi) - m2r\dot{\varphi}\dot{r}; \quad (6)$$

Після необхідних алгебраїчних перетворень отримаємо остаточну систему диференціальних рівнянь руху РШВП протягом фази обертання (7)

$$\begin{aligned}\dot{r} &= g\sin\varphi + r\dot{\varphi}^2 - h\frac{m(grcos\varphi - 2r\dot{\varphi}\dot{r} - hr\dot{\varphi}^2)}{I_{zG} + mr^2}, \\ \ddot{\varphi} &= \frac{m(grcos\varphi - 2r\dot{\varphi}\dot{r} - hr\dot{\varphi}^2)}{I_{zG} + mr^2}.\end{aligned} \quad (7)$$

Приведемо отриману систему диференціальних рівнянь для шлюпки до нормальної форми Коші:

$$\begin{aligned}\frac{dy_1}{dt} &= y_2, \\ \frac{dy_2}{dt} &= g\sin(y_3) + y_1y_4^2 - h\left(\frac{m(gy_1\cos(y_3) - 2y_1y_2y_4 - hy_1y_4^2)}{I_{zG} + my_1^2}\right); \\ \frac{dy_3}{dt} &= y_4, \\ \frac{dy_4}{dt} &= \frac{m(gy_1\cos(y_3) - 2y_1y_2y_4 - hy_1y_4^2)}{I_{zG} + my_1^2}.\end{aligned} \quad (8)$$

Тут $y_1 = r$, $y_2 = \dot{r}$, $y_3 = \varphi$, $y_4 = \dot{\varphi}$.

Початкові умови мають вигляд $y_1(0) = 0$, $y_2(0) = V_0$, $y_3(0) = \alpha$, $y_4(0) = 0$.

Для апробації запропонованої математичної моделі та методики розрахунку параметрів руху рятувальної шлюпки вільного падіння впродовж фази обертання з урахуванням зміщення її центру мас по відношенню до опорної поверхні та отримання відповідних чисельних оцінок в даній роботі визначаються параметри руху РШВП, яка моделюється однорідним стрижнем у вигляді прямокутного паралелепіпеда довжиною L і товщиною h (рис. 4), в кінці фази обертання при його сходженні з нахиленої під кутом $\alpha = 35^\circ$ до горизонту рампи.

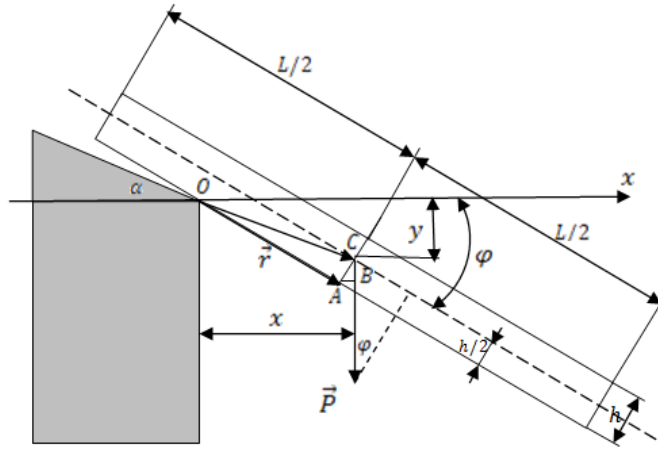


Рисунок 4. Модель рятувальної шлюпки вільного падіння.

З урахуванням виразу для швидкості V_c центру мас прямокутного паралелепіпеда при його скочуванні з рампи (9) та відомої формули (10) для моменту інерції I_{zc}^{np} прямокутного паралелепіпеда відносно горизонтальної осі z що проходить через центр мас [10]

$$V_c = \sqrt{(\dot{r} + 0,5h\dot{\varphi})^2 + (r\dot{\varphi})^2} = \sqrt{\dot{r}^2 + h\dot{r}\dot{\varphi} + (r^2 + 0,25h^2)\dot{\varphi}^2}. \quad (9)$$

$$I_{zc}^{np} = \frac{m}{12}(L^2 + h^2) \quad (10)$$

отримаємо вираз (11) для його кінетичної енергії:

$$T^{np} = \frac{m}{24}(L^2 + h^2)\dot{\varphi}^2 + \frac{m}{2}(\dot{r}^2 + h\dot{r}\dot{\varphi} + (r^2 + 0,25h^2)\dot{\varphi}^2) \quad (11)$$

Диференціальні рівняння руху прямокутного паралелепіпеда при скочуванні з похилої рампи впродовж фази обертання (12) отримані з використанням рівнянь Лагранжа другого роду та вище наведеної методики мають вигляд:

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

Приведемо отриману систему диференціальних рівнянь для призми до нормальної форми Коші:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= y_2, \\ \frac{dy_2}{dt} &= g\sin(y_3) + y_1y_4^2 - \\ &0,5h \left(\frac{g(y_1\cos(y_3) + 0,5\sin(y_3)) - 2y_1y_2y_4 - 0,5h(g\sin(y_3) + y_1y_4^2)}{\frac{L^2}{12} + \frac{h^2}{12} + r^2} \right); \\ \frac{dy_3}{dt} &= y_4, \\ \frac{dy_4}{dt} &= \frac{g(y_1\cos(y_3) + 0,5\sin(y_3)) - 2y_1y_2y_4 - 0,5h(g\sin(y_3) + y_1y_4^2)}{\frac{L^2}{12} + \frac{h^2}{12} + y_1^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Тут $y_1 = r$, $y_2 = \dot{r}$, $y_3 = \varphi$, $y_4 = \dot{\varphi}$.

Початкові умови мають вигляд $y_1(0) = 0$, $y_2(0) = V_0$, $y_3(0) = \alpha$, $y_4(0) = 0$.

Запишемо задачу Коші (13) у векторній формі

$$\frac{d\vec{Y}}{dt} = \vec{F}(t, \vec{Y}), \quad \vec{Y}(0) = \vec{Y}_0, \quad (14)$$

де $\vec{Y} = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}^T$. Будемо розв'язувати задачу (14) за допомогою чисельного методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності за схемою [11]:

$$\vec{Y}_{n+1} = \vec{Y}_n + \vec{\lambda}_n, \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad \vec{K}_4 = h\vec{F}\left(t_n + \frac{h}{2}, \vec{Y}_n + \vec{K}_3\right)$$

де $\vec{\lambda}_n = \frac{1}{6}(\vec{K}_1 + 2\vec{K}_2 + 2\vec{K}_3 + \vec{K}_4)$, $\vec{K}_1 = h\vec{F}(t_n, \vec{Y}_n)$, $\vec{K}_2 = h\vec{F}\left(t_n + \frac{h}{2}, \vec{Y}_n + \frac{\vec{K}_1}{2}\right)$,

$\vec{K}_3 = h\vec{F}\left(t_n + \frac{h}{2}, \vec{Y}_n + \frac{\vec{K}_2}{2}\right)$, $\vec{K}_4 = h\vec{F}\left(t_n + \frac{h}{2}, \vec{Y}_n + \vec{K}_3\right)$, $t_n = nh$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), $h > 0$ – крок в часі $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n = h$.

На основі запропонованого підходу проведено серію чисельних експериментів для визначення часу скочування t , радіальної складової \dot{r} швидкості точки A (проекції центру мас на опорну поверхню стрижня), кутів нахилу до горизонту φ та φ° , кутів тангажу $(\varphi - 35)^\circ$ та кутової швидкості $\dot{\varphi}$ стрижнів товщиною до 1,0 м, довжиною 5, 10 і 15 м в момент відриву від рампи при значеннях початкової швидкості центру мас 6, 8 і 10 м/с відповідно та значенні кута нахилу рампи $\alpha = 35^\circ$. Прийняті значення початкової швидкості відповідають швидкості, яка досягається стрижнем при проходженні його центру мас над краєм рампи за умови, що на початку руху відстань від центру мас стрижня до краю рампи складає $0,65 L$, а коефіцієнт тертя між стрижнем і рампою дорівнює 0,1.

На основі результатів чисельних експериментів проведені розрахунки швидкості центру мас стрижня V_C , кута β між вектором швидкості \vec{V}_C і віссю стрижня та значень горизонтальної V_{Cx} та вертикальної V_{Cy} складових цієї швидкості за формулами (15):

$$\begin{aligned} V_C &= \sqrt{(\dot{r} + 0,5h\dot{\varphi})^2 + (r\dot{\varphi})^2}; \\ \beta &= \arcsin\left(\frac{r \cdot \dot{\varphi}}{V_C}\right); \\ V_{Cx} &= V_C \cdot \cos(\varphi + \beta); \\ V_{Cy} &= V_C \cdot \sin(\varphi + \beta). \end{aligned} \quad (15)$$

Результати проведених розрахунків представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати розрахунків параметрів руху при скочуванні з похилої рампи стрижнів у формі прямокутного паралелепіпеда довжиною 5, 10 і 15 м при початкових швидкостях відповідно 6, 8 і 10 м/с.

L=5 м, V ₀ =6 м/с						
h, м	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
t, с	0,356	0,365	0,375	0,385	0,394	0,404
φ°	39,38	39,59	39,81	40,02	40,22	40,42

$(\varphi - 35)^\circ$	4,38	4,59	4,81	5,02	5,22	5,42
$\dot{\varphi}, c^{-1}$	0,396	0,340	0,403	0,405	0,407	0,408
r, m	2,5	2,571	2,641	2,710	2,780	2,851
$\dot{r}, m/c$	8,112	8,135	8,159	8,182	8,204	8,228
$V_c, m/c$	8,172	8,239	8,308	8,376	8,443	8,512
β°	6,97	7,17	7,36	7,53	7,71	7,87
$V_{cx}, m/c$	5,644	5,646	5,650	5,655	5,660	5,667
$V_{cy}, m/c$	5,910	6,001	6,091	6,178	6,264	6,352
$L=10\text{ м}, V_0=8\text{ м/с}$						
h, m	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
t, c	0,525	0,532	0,539	0,547	0,554	0,561
φ°	39,74	39,86	39,98	40,09	40,21	40,32
$(\varphi - 35)^\circ$	4,74	4,86	4,98	5,09	5,21	5,32
$\dot{\varphi}, c^{-1}$	0,290	0,292	0,293	0,294	0,295	0,296
r, m	5,0	5,071	5,140	5,211	5,280	5,351
$\dot{r}, m/c$	11,13	11,15	11,17	11,18	11,20	11,22
$V_c, m/c$	11,224	11,277	11,329	11,372	11,425	11,474
β°	7,44	7,54	7,64	7,74	7,84	7,93
$V_{cx}, m/c$	7,633	7,636	7,640	7,637	7,642	7,646
$V_{cy}, m/c$	8,230	8,298	8,365	8,426	8,493	8,560
$L=15\text{ м}, V_0=10\text{ м/с}$						
h, m	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
t, c	0,634	0,640	0,645	0,651	0,657	0,662
φ°	39,62	39,69	39,77	39,85	39,92	39,40
$(\varphi - 35)^\circ$	4,62	4,69	4,77	4,85	4,92	4,40
$\dot{\varphi}, c^{-1}$	0,234	0,235	0,236	0,236	0,237	0,237
r, m	7,501	7,570	7,641	7,711	7,781	7,851
$\dot{r}, m/c$	13,77	13,79	13,80	13,82	13,83	13,84
$V_c, m/c$	13,882	13,928	13,964	14,010	14,046	14,083
β°	7,277	7,342	7,411	7,477	7,545	7,609
$V_{cx}, m/c$	9,490	9,497	9,496	9,501	9,500	9,499
$V_{cy}, m/c$	10,131	10,188	10,238	10,296	10,346	10,396

Аналіз представлених в табл. 1 даних свідчить, що збільшення товщини стрижня h до 1 м (зміщення центру мас від 0 до 0,5 м) для стрижнів довжиною 5, 10 і 15 метрів призводить до зростання значень усіх параметрів руху. Однак зі збільшенням довжини стрижня, вплив зміщення центру мас відносно опорної поверхні на параметри його руху в кінці фази обертання зменшується. Так, величина зміщення 0,5 м при довжині стрижня 5, 10 і 15 м призвела відповідно до зростання: тривалості фази обертання на 0,048, 0,035 і 0,028 с; кута нахилу до горизонту та кута тангажу – на 1,044, 0,579 і 0,379 градусів; кутової швидкості – на 0,688, 0,304 і 0,18 град/с; абсолютної швидкості центру мас – на 0,34, 0,25 і 0,201 м/с; горизонтальної складової швидкості центру мас – на 0,023, 0,013 і 0,009 м/с; вертикальної складової швидкості центру мас – на 0,441, 0,33 і 0,265 м/с. Найбільше відносне зростання параметрів руху в % для найбільш короткого стрижня склало: тривалості фази обертання – 13,51; кута тангажу – 23,86; кутової швидкості – 3,03; швидкості центру мас – 4,16; горизонтальної і вертикальної складової швидкості центру мас відповідно 0,41 і 7,47.

Висновки. Запропонований підхід дозволяє з метою оптимізації за допомогою чисельних експериментів проводити розрахунок параметрів руху РШВП при скиданні з судна з урахуванням зміщення її центру мас відносно опорної поверхні напрямного бруса.

Отримані результати розрахунків свідчать, що при розташуванні центру мас над опорною поверхнею напрямного бруса збільшення його відстані до опорної поверхні призводить до зростання усіх параметрів руху РШВП в кінці фази обертання. При цьому вплив зміщення зростає зі зменшенням довжини шлюпки (моменту інерції відносно центру мас). В подальших дослідженнях слід з'ясувати вплив зміщення центру мас на параметри руху РШВП у випадку його розташування під опорною поверхнею напрямних брусів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бугаенко, Б. А. Принципы проектирования и особенности конструирования судовых устройств и судовой техники морских технологий [Текст] / Б. А. Бугаенко, А. Ф. Галь. Николаев : УГМТУ, 1995. – Ч. 2. – С. 86–101.
2. Netherlands Regulatory Framework (NE RF) – Maritime. 616 Evaluation of Free-fall Lifeboats launch performance. Geldigheid: 22-06-1993 t/m. Status: Geldig vandaag. Retrieved from https://ruc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_1746_14/1/
3. Є.Т. Горалік, М.М. Крюков, Т.О. Лупіна. Рух рятувальної шлюпки вільного падіння при сходженні з похилої рампи. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2021. – Випуск 2(33). – С.23-35.
4. Tasaki, R., Ogawa Atsushi, Tsukino, Y. Numerical Simulation and its Application on the Falling Motion of Freefall Lifeboats. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 167, pp. 1147-158, 1990.
5. Arai, M., Khondoker, M. R. H., Inoue, Y. Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat First Report : Analysis of Motion and Acceleration. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 178, pp. 193-201, 1995.
6. Karim, M. M., Iqbal, K. S., Khondoker, M. R. H., Rahman, S. M. H. (2011) Influence of Falling Height on the Behavior of Skid-Launching Free-Fall Lifeboat in Regular Waves. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 4, No. 1, pp. 77-88, 2011.
7. В.Е.Микитюк, Д.А.Миронов. Параметри движения шлюпки свободного падения перед приводнением / Матеріали I Міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» Миколаїв: - НУК, 2010. – С. 84-89.
8. Теоретична механіка: підручник для студентів ВНТЗ/ кол. авторів за заг. ред. І.В.Кузьо. – Харків: Фоліо, 2017. – 780 с.
9. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов и др. М.: Машиностроение, 1999. Т. 1-2. Теоретическая механика. Термодинамика. Теплообмен. / Под общ.ред. К.С. Колесникова, А.И. Леонтьева. 600 с.
10. Булгаков В.М., Бурлака В.В., Лукач В.С., Дроннік Ю.М., Кучеренко С.І., Мазоренко Д.І., Тищенко Л.М. Теоретична механіка. Посібник для практичних занять. / За ред. С.І.Кучеренка. – Ніжин: В-во «Міланік», 2009. – 639 с.
11. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. – М.: Физматгиз, 1962. – Т.2. - 639 с.

REFERENCES

1. Bugayenko, B. A. (1995) “Printsipy proyektirovaniya i osobennosti konstruirovaniya sudovykh ustroystv i sudovoy tekhniki morskikh tekhnologiy” [Design principles and design features of ship devices and marine equipment of marine technology] [Tekst] / B. A. Bugayenko, A. F. Gal. Nikolayev : UGMTU, CH. 2, 86–101. [in Russian].
2. Netherlands Regulatory Framework (NE RF) – Maritime. 616 Evaluation of Free-fall Lifeboats launch performance. Geldigheid: 22-06-1993 t/m. Status: Geldig vandaag. Retrieved from https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_1746_14/1/
3. Horalik Ye.T., Kriukov M.M., Lupina T.O. (2021). Rukh riatsuvalnoi shliupky vilnoho padinnia pry skhodzhenni z pokhyloi rampy [The movement of the freefall lifeboat when descending from the inclined ramp]. Vodnyi transport [Water transport], no.2, 23-35. [in Ukrainian].
4. Tasaki, R., Ogawa Atsushi, Tsukino, Y.(1990) Numerical Simulation and its Application on the Falling Motion of Freefall Lifeboats. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 167, 1147-158. [in Japanese].
5. Arai,M., Khondoker, M. R. H., Inoue, Y. (1995). Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat First Report : Analysis of Motion and Acceleration. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 178, 193-201. [in English].
6. Karim, M. M., Iqbal, K. S., Khondoker, M. R. H., Rahman, S. M. H.(2011) Influence of Falling Height on the Behavior of Skid-Launching Free-Fall Lifeboat in Regular Waves. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 4, No. 1, 77-88. [in English].
7. V.E.Mykytyuk, D.A.Myronov. (2010) “Parametry dvyzhenyya shlyupky svobodnoho padenyia pered pryvodnenyem” [Parameters of free fall boat motion before flooding] / Materialy I Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. «Innovatsiyi v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi» Mykolayiv: - NUK, 84-89. [in Russian].
8. Teoretychna mekhanika. Pidruchnyk [Theoretical mechanics: textbook] (2017) / Count. authors per zag. Ed. I.V.Kuzio. – Kharkiv: Folio, 780 s.
9. Mashinostroenie. Entsiklopediya / Red. sovet: K. V. Frolov i dr. – M.: Mashinostroenie. Teoreticheskaya mehanika. Termodinamika. Teploobmen. T. 1-2 / Pod obsch. red. K. S. Kolesnikova, A. I. Leonteva. 1999. 600 s.
10. Bulhakov V.M., Burlaka V.V., Lukach V.S., Dronnik Yu.M., Kucherenko S.I., Mazorenko D.I., Tishchenko L.M. Teoretychna mekhanika. Posibnyk dlia praktychnykh zaniat. [Theoretical mechanics. Guide for practical classes] (2009) / Za red. S.I.Kucherenka. – Nizhn: V-vo «Milanik». – 639 s.
11. Berezin I.S., Zhidkov N.P. Metody vychisleniy (Calculation Methods). – M.: Fizmatgiz, 1962. – T.2. - 639 s.

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

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE DISPLACEMENT OF THE CENTER OF MASS OF THE FREE-FALL LIFEBOAT RELATIVE TO THE SUPPORT SURFACE ON ITS MOTION WHEN DROPPING FROM THE SHIP

The problem of the motion of free-fall lifeboats (FFLB) when dropping from the ship, taking into account the displacement of the center of mass relative to the supporting surfaces during the rotation phase – from the moment when the center of mass of the boat is above the edge of the support (extreme roller of the ramp) until the end of the supporting surfaces of the boat leaves the ramp. To compile the differential equations of motion of the FFLB during the phase of rotation, the Lagrange equation of the second kind in the polar coordinate system (differential equations of

flat-parallel motion of the boat in generalized coordinates, where r is the distance from the edge of the support to the projection of the center of mass on the support surface and φ - the angle of inclination of the supporting surface of the boat to the horizon) is applied.

The solving system of two ordinary nonlinear differential equations of the second order is obtained and the corresponding Cauchy problem is formulated, which is solved numerically using the Runge-Kutta method of the fourth order of accuracy.

The approbation of the developed approach was carried out for the case of modeling the boat with a homogeneous rod in the form of a rectangular parallelepiped with length L and thickness h . The corresponding solving system of four ordinary nonlinear differential equations of the first order in the Cauchy form in generalized coordinates r i φ was obtained, for which the Cauchy problem was formulated, which was solved numerically by the Runge-Kutta method of the fourth order of accuracy at the angle of inclination of the ramp $\alpha=35^\circ$ for rods with a thickness of 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1.0 m and a length of 5, 10 and 15 m at initial speeds of 6, 8 and 10 m/s, respectively. The results of calculations of the duration of the phase of rotation, the angle of inclination and pitch angle, radial and angular velocity, the speed of the center of mass and its vertical and horizontal components, the angle of inclination of the vector of the speed of the center of mass to the supporting surfaces of the boat indicate that when the center of mass is located above the supporting surface of the guide beam, an increase in its distance to the supporting surface leads to an increase in all parameters of the RSVP motion at the end of the rotation phase. At the same time, the effect of displacement increases with a decrease in the length of the boat (the moment of inertia relative to the center of mass). Based on the results of the work, it was concluded that it was possible to use the proposed approach and conduct numerical experiments for the rational choice of the parameters of the RSHVP motion and the directions for further research were determined.

Keywords: free-fall lifeboat, inclined ramp, displacement of the center of mass, flat-parallel motion, rod, rectangular parallelogram, Lagrange equation of the second kind, ordinary differential equations, Cauchy problem, numerical modeling, Runge-Kutta method.

УДК 629.5

doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.14

Бажак О.В., Іваненко В.М., Рященко О.І., Лізагенко В.В.

ОХОРОННІ ЗАХОДИ НА СУДНАХ І В ПОРТАХ У ПРИЗМІ ПРОТИДІЇ ТЕРОРИЗМУ І ПІРАТСТВУ НА МОРІ

Метою статті є формування комплексу охоронних заходів на судах і в портах для протидії тероризму і піратству на морі. Поставлена мета досягається шляхом аналізу джерел інформації щодо визначення та однозначного тлумачення термінів морський тероризм та піратство, виявлення та аналізу причин виникнення цих небезпечних явищ. Визначено, чому завдання боротьби з міжнародним тероризмом, зокрема на морі, висунулося в низку найважливіших. Продемонстровано роль Дипломатичної конференції з морського захисту у вирішенні питань морської безпеки введенням особливих заходів, що стосується підвищення безпеки пасажирських суден, вантажних суден валовою

місткістю від 500 т, зокрема швидкісних суден, самохідних плавучих бурових установок і портових засобів. Наголошено про встановлення послідовного стандартизованого підходу до оцінки небезпеки, що дозволило врівноважити можливі ризики за рахунок посилення безпеки суден і портових об'єктів. Вказані основні національні нормативні документи України, якими доповнено законодавство для імплементації Кодексу з охорони суден і портових засобів. Систематизовані основні причини, що зумовлюють зростання терористичної загрози на водних просторах України. Найбільш суттєвим результатом є введення чотирьох груп охоронних заходів щодо протидії тероризму на морському транспорті за певними ознаками та виділення у цих групах окремих елементів, що дозволяють добитися ефективної протидії тероризму і піратству на морі. Подальшим напрямом роботи є детальний розбір та аналіз окремих складових у комплексі заходів Кодексу ОСПЗ для ефективної протидії морському тероризму.

Ключові слова: піратство, морський тероризм, безпека суден, безпека портових об'єктів, заходи протидії

Постановка проблеми. Проблема безпеки мореплавства вже усталилася і доволі успішно вирішується завдяки виконанню низки спеціальних вимог. На цьому тлі безпека морського судноплавства є порівняно новою й умовно складається з двох частин:

1) акти насильства проти осіб на борту судна і незаконні акти проти самого судна під час його перебування, як правило, поза територіальним морем будь-якої держави;

2) акти збройних нападів і пограбувань суден, що перебувають переважно у внутрішніх морських водах або територіальному морі держави.

Тероризм на морі і піратство, схожі за методами і способами здійснення, становлять серйозну загрозу безпеці судноплавства і є злочином міжнародного характеру. Однак ці явища є різними за своєю природою, історією зародження і становлення, а виконавці переслідують різні цілі: для піратів – збагачення, для терористів – залякування населення і влади для виконання своїх, зазвичай, політичних та інших протиправних вимог.

Однак на практиці межі між піратством і тероризмом на морі стають дедалі хиткішими, що вкрай ускладнило диференціацію цих злочинів.

Морське піратство і тероризм створюють загрозу безпеці людського життя на морі, перешкоджають здійсненню нормальної господарської діяльності, є причиною політичної та соціальної нестабільності. Тому розробка на міжнародному та національному рівні системи ефективних заходів боротьби зі злочинами на морі – превентивних, оперативного реагування та захисних, – які реально здатні якщо не викоринити, то істотно послабити піратство і тероризм на морі, є одним із першочергових завдань світової громадськості. Ці заходи мають бути конкретизовані й деталізовані у вигляді охоронних заходів у рамках окремих компаній, суден і портів.

Таким чином, очевидною є необхідність вжиття додаткових заходів щодо забезпечення безпеки акваторій та об'єктів водного транспортного комплексу. Серед іншого це досягається шляхом створення комплексу охоронних заходів, удосконалення системи підготовки спеціальних сил і засобів, а також подальшого поліпшення організаційно-управлінської структури державних органів щодо припинення терористичних та інших злочинних акцій на водних акваторіях, що й підкреслює актуальність досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання боротьби з міжнародним тероризмом, зокрема на морі, висунулося в низку найважливіших для всіх держав Землі. У грудні 2002 р. у лондонській штаб-квартирі ІМО відбулася Дипломатична конференція з морського захисту, яка, серед багатьох, розглянула питання морської безпеки. Так, Міжнародну конвенцію СОЛАС-74 було доповнено новою гл. XI-2 (Особливі заходи щодо підвищення рівня морської безпеки). Йшлося про підвищення безпеки пасажирських суден,

вантажних суден валовою місткістю від 500 т, зокрема швидкісних суден, самохідних плавучих бурових установок і портових засобів. Ухвалений документ встановив послідовний стандартизований підхід до оцінки небезпеки, що дало змогу врівноважити можливі ризики за рахунок посилення безпеки суден і портових об'єктів.

Після ухвалення Кодексу з охорони суден і портових засобів (ОСПЗ) [9] Україна доповнила своє законодавство відповідно до вимог цієї Конвенції. Такими національними нормативними документами стали:

1) Постанова Кабінету Міністрів України від 12 травня 2007 р. №722 "Про заходи щодо підвищення рівня безпеки на морському та річковому транспорті", у якій розподілено обов'язки та відповідальність за виконання вимог Кодексу ОСПС.

2) Постанова Кабінету Міністрів України від 14 травня 2008 р. №459 "Деякі питання подальшої ідентифікації та контролю за місцеперебуванням суден", що визначає комплекс заходів щодо створення відповідного Національного центру.

3) Постанова Кабміну України від 5 березня 2009 р. №227 "Питання Державної адміністрації морського та річкового транспорту", згідно з якою визначено порядок здійснення контролю, крім іншого, з питань охорони суден і портових засобів.

4) Наказ ДДМРТУ від 26.11.2003 №302 "Про затвердження Програми курсу підготовки "Офіцер охорони судна" та зразка свідоцтва про його закінчення".

5) Наказ ДДМРТУ від 12.01.2004 №2 "Про затвердження Програми підготовки фахівців служб морської безпеки".

6) Наказ ДДМРТУ від 25.02.2004 №48 "Про затвердження Типового плану охорони судна".

7) Наказ ДДМРТУ від 12.03.2004 №68 "Про затвердження тимчасових документів, що стосуються впровадження Кодексу ОСПС у морську галузь України".

8) Наказ ДДМРТУ від 22.03.2004 №77-КТС "Про затвердження тимчасових документів щодо організації впровадження вимог Кодексу ОСПС у морську галузь України".

9) Наказ ДДМРТУ від 11.05.2004 №123 "Про затвердження переліку портових споруд (засобів), які підлягають охороні".

10) Наказ ДДМРТУ від 18.05.2004 №129 "Про затвердження Положення про синопсис судна".

11) Наказ ДДМРТУ від 11.06.2004 №159 "Про затвердження Інструкції про постійне нанесення маркування розпізнавального номера на судна, які мають право плавання під Державним Прапором України".

12) Наказ ДДМРТУ від 17.06.2004 №162-КТС "Про затвердження Тимчасового типового Положення про службу морської безпеки морського торговельного порту (портового засобу)".

13) Наказ ДДМРТУ від 24.06.2004 №171 "Про встановлення оперативного чергування по стеженню за станом морської безпеки на морському та річковому транспорті".

14) Наказ ДДМРТУ від 09.07.2004 №200 "Про організацію взаємодії між Службами морської безпеки МТП та офіцерами охорони портових засобів недержавної форми власності".

15) Наказ Мінтрансв'язку від 18.01.2006 №47 "Про затвердження Посібника із застосування заходів контролю до іноземних суден, що відвідують порти України, у разі порушення ними вимог Глави XI-2 Конвенції СОЛАС-74 та Кодексу ОСПС".

16) Наказ ДДМРТУ від 26.05.2006 №87-КТС "Про створення антитерористичної групи Укрморрічфлоту".

17) Наказ ДДМРТУ від 15.06.2007 №115 "Про затвердження Тимчасової Інструкції про порядок проведення розслідування актів незаконного втручання в діяльність морського

та річкового транспорту".

18) Наказ Міністерства транспорту від 03.12.2007 №1095 "Про затвердження Положення про схвалення оцінок і планів охорони портових засобів та видачу Актів про відповідність портових засобів".

Перелік названих документів засвідчує, що в Україні створено правову основу для успішного виконання вимог Глави XI-2 Конвенції СОЛАС-74 та Кодексу ОСПЗ.

У роботі [1] аналізується сучасне морське піратство як різновид тероризму, особливо не розділяючи ці поняття.

У роботі [2] зроблено наголос судовобудівному аспекті запобігання морському тероризму.

У роботі [3] увага звертається на правове регулювання протидії тероризму. Але у роботі не розкриті особливості протидії морському тероризму.

Робота [4] присвячена висвітленню правових аспектів піратства, тероризму та шахрайства на морі. Але в ній не розглянуті сучасні тенденції посилення боротьби з цими злочинами.

Автори роботи [5] розглядають особливості прояву сучасного тероризму на морському транспорті. У роботі відсутні пропозиції щодо охоронних заходів.

У роботі [6] мова йде про загальні питання проведення терористичних операцій та протидії ним у сучасному світі. Але особливості ведення боротьби з тероризмом на морі не розкриті.

Робота [7] дозволяє виділити загальні категорії, стандарти і практики у сфері міжнародного досвіду боротьби з тероризмом.

Тому проведення дослідження щодо систематизації охоронних заходів на суднах і в портах та їх постійне корегування та вдосконалення з метою адаптації у відповідь на зміну тактики ведення морських терористичних атак та виконання піратських дій злочинцями є актуальним завданням.

Метою статті є формування комплексу охоронних заходів на суднах і в портах для протидії тероризму і піратству на морі.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Відповідно до ст. 258 Кримінального кодексу України, терористичним актом називається застосування зброї, вчинення вибуху, підпалу або інших дій, що створювали небезпеку для життя чи здоров'я людини або заподіяння значної майнової шкоди чи настання інших тяжких наслідків, якщо такі дії було вчинено з метою порушення громадської безпеки, залякування населення, провокації воєнного конфлікту, міжнародного ускладнення або з метою впливу на ухвалення рішень чи вчинення чи невчинення дій органами влади та місцевого самоврядування, посадовими особами цих органів, об'єднаннями громадян, юридичними особами, міжнародними організаціями, або привернення уваги громадськості до певних політичних, релігійних чи інших поглядів винного (терориста), а також погроза вчинення зазначених дій з тією самою метою [8].

Тероризм на морі з юридичної точки зору має специфічні особливості, що відрізняють його від тероризму взагалі. З одного боку, його відрізняє сфера, в якій відбувається дія (море); але, з іншого боку, тероризм на морі часто має ширший розмах – міжнародний, на відміну від внутрішньодержавного тероризму.

До актів міжнародного тероризму належать випадки, коли їх готують або вчиняють за межами держави, громадянами якої є терористи або їхні жертви, або коли терористичний акт спрямований проти осіб, які користуються міжнародним захистом, а також проти іноземних засобів пересування, зокрема суден. Міжнародний тероризм на морі, загрожуючи безпеці мореплавства і зневажаючи принцип свободи морів, спрямований проти іноземних об'єктів, фізичних осіб, які є громадянами іноземної держави, та їхньої

власності [8-11].

Морські об'єкти часто ставали метою нападу міжнародних терористів: захоплення італійського лайнера "Акілле Лауро" (1985 р.), захоплення турецького судна "Аврасія" (1996 р.), вибух на британському танкері BW Rhine неподалік від порту міста Джидда в Саудівській Аравії (2020 р.)

Аналіз тенденцій розвитку сучасної обстановки, як вважають багато фахівців, показує, що в найближчій і середньостроковій перспективі спостерігатиметься зростання кількості терористичних актів і збитків від них. Причому йдеться не тільки про теракти на водних просторах Світового океану, а й у водах, які перебувають під юрисдикцією України. Ймовірно зростання терористичної загрози на водних просторах України зумовлене такими основними причинами [12-20]:

1) Посиленням впливу сепаратизму і тероризму як важеля впливу з боку недружніх держав з метою зміни конституційного ладу, втручання в політичне та економічне життя країни, порушення територіальної цілісності, дестабілізації економіки та міжнародних відносин.

2) Веденням бойових дій на території країни, що повністю змінило економічне життя. Навіть "зернова угода" була реалізована під гарантії самої ООН.

3) Посиленням боротьби за право володіння ресурсами в Причорномор'ї.

4) Спробами втручання у внутрішні справи України для здійснення впливу на українську зовнішню політику, реалізації своїх військово-політичних, економічних і стратегічних цілей на шкоду національним інтересам України.

5) Фактичною ліквідацією кордонів між внутрішнім і міжнародним тероризмом.

6) Динамічною трансформацією цілей і механізмів їх досягнення терористами залежно від обстановки, що складається, постійною адаптивною зміною форм, методів, засобів досягнення цілей.

7) Регулярним якісним поліпшенням структури, рівня організації, оснащеності та конспірації в діяльності терористичних організацій.

8) Перетворенням тероризму на суперприбутковий бізнес унаслідок злиття організованої злочинності та тероризму.

9) Зрощуванням організованої злочинності, деяких державних структур і дій терористів.

Залишаючи за рамками цього дослідження кваліфікацію піратства в межах територіальних вод України, слід пам'ятати, що піратські дії полягають у захопленні або викраденні судна, що може супроводжуватися захопленням або утриманням осіб як заручників. А далі злочинці можуть примушувати державу, організацію або громадянина вчинити будь-яку дію або утриматися від неї, як умову звільнення заручника(-ів).

На думку багатьох фахівців, з урахуванням зростання масштабів піратства у випадках, якщо піратські дії із захоплення суден та інших об'єктів на акваторії вчиняються із застосуванням зброї, демонстративно створюють серйозну загрозу інтересам громадської та державної безпеки, то їх доцільно розглядати як терористичні. Такий підхід до кваліфікації злочинів цього виду безумовно позначиться на характері, способах і методах проведення заходів із припинення піратських акцій.

Дуже важливо знайти глибинні причини появи та базові й специфічні умови існування піратства і тероризму. Дві ці категорії є підґрунтям для визначення мотивів і цілей піратської або терористичної діяльності. Зрештою, вище згадані знання дають змогу проводити своєчасну, планомірну та ефективну роботу з виявлення, запобігання та припинення актів тероризму та піратства.

Боротьба з тероризмом буде результативною за виконання багатьох умов. На наш погляд, одними з основних на цьому терені є організованість, внутрішня націленість на

викорінення цієї проблеми, рішучість, непримиренність і жорсткість дій у відповідь, наявність грамотних керівників, технічно оснащених, підготовлених і добре екіпірованих державних і приватних спеціальних підрозділів.

В існуючих умовах, коли дії терористів, зокрема морських, зачіпають інтереси переважної більшості світової спільноти, міжнародне право зобов'язане гнучко й адекватно реагувати на виклики, що виникають. Проблема морського тероризму, як новий виклик і загроза безпеці держав та їхніх громадян, має знайти адекватне вирішення в реалізації різноманітних заходів щодо протидії тероризму на морському транспорті.

Однак у світі посилюється не тільки тероризм, а й конкурентна боротьба. Найчастіше методи ведення конкурентної боротьби стають зовсім не джентльменськими, неадекватними, іноді переходячи в терористичні. І це не поодинокі випадки, що вимагає проведення відповідних аналітичних, профілактичних і протидійних заходів для парирования таких загроз.

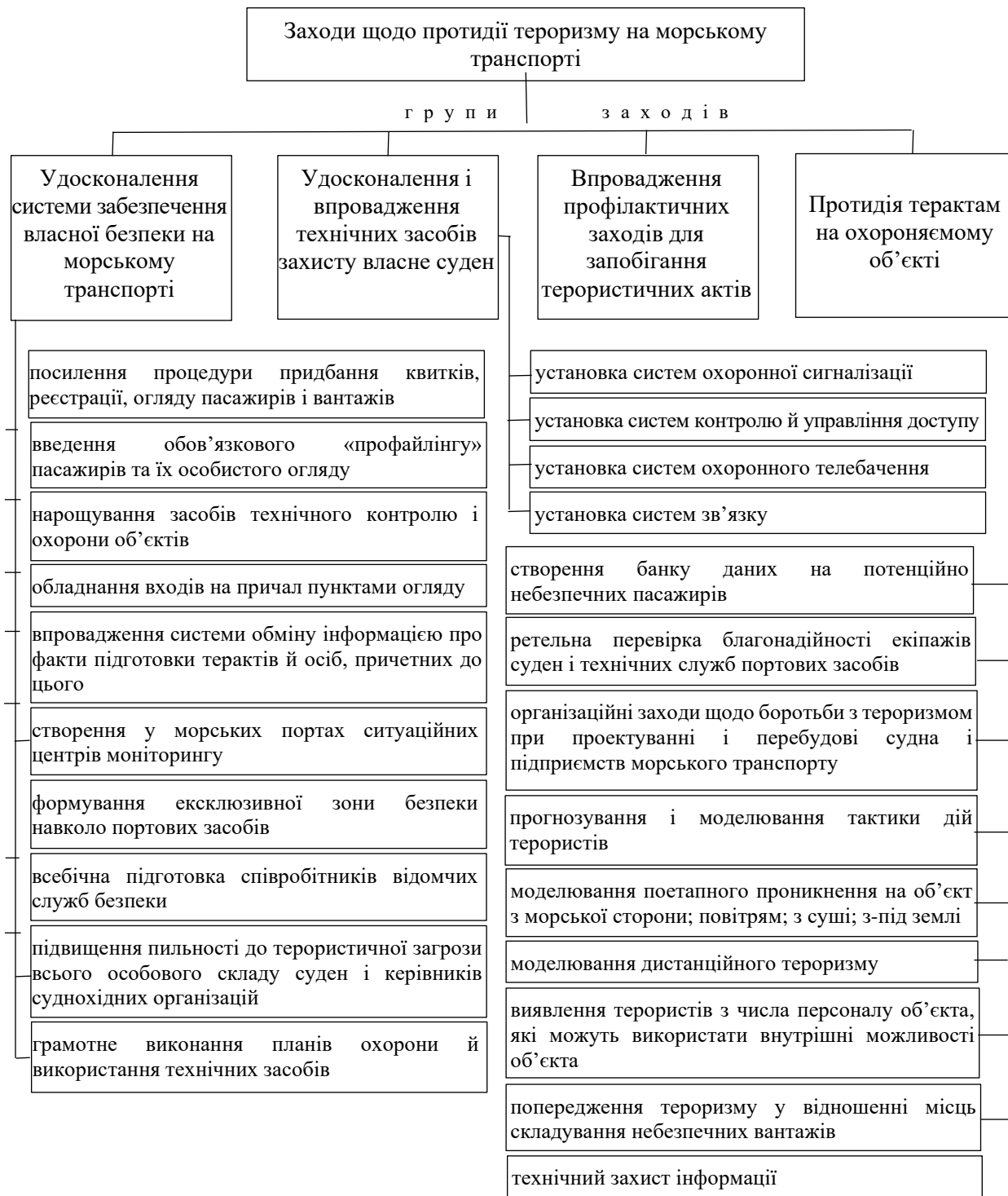
Під час захоплення судна терористами, коли вони висувають політичні вимоги або проводять акції залякування, коли під загрозою опиняються життя десятків і сотень пасажирів та екіпажу, коли великий ризик екологічної катастрофи, термінові заходи зі звільнення судна можуть дати, на жаль, зворотний ефект.

Тому все частіше йдеться про розміщення на судах команд або загонів самооборони, що мають спеціальну антитерористичну підготовку. Слово, як то кажуть, уже сказано. Так, потрібно визначити міжнародний статус такої команди, вирішити цілу низку організаційних і технічних питань її розміщення, утримання, фінансування тощо. не визначено. Але процес, очевидно, вже пішов. Іншим серйозним напрямом захисту від тероризму є його організація в морських портах.

Протидію тероризму на морському транспорті згрупуємо за такими функціональними блоками (рис. 1) [12-20].

Висновки. У ХХІ столітті всьому прогресивному людству доводиться стикатися з новими викликами і загрозами безпеці держав та їхніх громадян, гострота яких постійно зростає. До таких викликів належить тероризм і одна з його складових – піратство. Дії терористів, як правило, б'ють по інтересах не окремої держави, вони стосуються всієї світової спільноти. Тому міжнародне право має відповідати інтересам вирішення глобальних проблем людства. Злочини терористичного характеру в широкому розумінні та піратство, зокрема, на водних просторах України характеризуються надзвичайно високою суспільною небезпекою. Внаслідок їх здійснення можливі великі людські жертви, значні матеріальні втрати, тяжкі екологічні наслідки, репутаційна шкода в політичній сфері.

У зв'язку з цим необхідно вжити додаткових заходів щодо забезпечення безпеки акваторій та об'єктів водного транспортного комплексу. До них мають належати заходи, що забезпечують правове регулювання питань припинення піратства, терористичних та інших злочинних акцій на водних акваторіях, поліпшення організаційно-управлінської структури державних органів по боротьбі з цим явищем, посилення безпеки суден і портових об'єктів, зокрема й за рахунок удосконалення охоронних заходів і системи підготовки спеціальних сил і засобів.



ЛІТЕРАТУРА

1. Бондаренко В.Ф., Григорьев Н.Ю., Родюков Э.Б. Современный морской терроризм (пиратство) и его социальные последствия / В.Ф. Бондаренко, Н.Ю. Григорьев, Э.Б. Родюков. Вестник университета. – №12. – 2015. – С. 245-252.

2. Стефанчишен Р.В. Тероризм на морі (концептуально-правовий аналіз) / Р.В. Стефанчишен. Науковий вісник публічного та приватного права. – Випуск 3-2, 2020. – С. 208-213. – DOI <https://doi.org/10.32844/2618-1258.2020.3-2.36>.
3. Балобанов А.О. Тероризм и безопасность морского судоходства. / А.О. Балобанов. Актуальні проблеми держави і права. 2000. Вип. 8: Соціальні та правові проблеми боротьби з тероризмом. С. 83–86.
4. Демиденко, В. В. Пиратство, тероризм, мошенничество на море : правовые аспекты / В. В. Демиденко, В. М. Прусс, А. Н. Шемякин. Одесса, 1997. – 144 с.
5. Брайн А. Г. Насилие на море. Нью-Йорк : Парит, 1993. С. 304.
6. Мошкова Л. І. Феномен виникнення та проявів тероризму в сучасних умовах : автореф. дис. ... канд. політ. наук. Одеса, 2001.
7. Стиб Дж. Обеспечение законности на море и на побережье : матер. Междунар. конф. по морскому праву / Ин-т междунар.-правовых исследований; МО США. Нью-Порт, 1998. Ч. VII. С. 143.
8. Кримінальний кодекс України: станом на 12 січня 2021 р. Харків : Право, 2021. 268 с.
9. Конвенція Ради Європи про запобігання тероризму // Відомості Верховної Ради України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_712#Text.
10. Хавронюк М. І. Тероризм // Велика українська енциклопедія. URL: <https://vue.gov.ua/Тероризм> (дата звернення: 9.01.2023)].
11. Про боротьбу з тероризмом: Закон України № 638-IV від 20 березня 2003 р. // Відомості Верховної Ради України. 2003. № 25. Ст. 180. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/638-15#Text>.
12. Смелянов В. П. Злочини терористичної спрямованості. Харків : Рубікон, 1997. 160 с.
13. Семикін М. В. Створення терористичної групи чи терористичної організації: кримінально-правове дослідження / За ред. В. П. Смелянова. Харків : Національний університет внутрішніх справ, 2003. 188 с.
14. Guillaume G. Terrorism and International Law // The International and Comparative Law Quarterly. 2004. Vol. 53. № 3. P. 537–548.
15. Канцір В. С. Тероризм у сучасному глобалізаційному просторі : філософсько-правовий вимір. Львів : Край, 2011. 560 с.
16. Журавльов А. Ю. Поняття та сутність злочинів, пов'язаних із терористичною діяльністю // Митна справа. 2014. № 3 (2). С. 65–74.
17. Terrorism and International Law / Ed. by M. Flory, R. Higgins. London : Routledge, 2014. 396 p.
18. Серкевич І. Р., Серета В. В. Тероризм: кримінологічна детермінація і кримінально-правова протидія: монографія / За заг. ред. В. С. Канціра. Львів : Львівський державний університет внутрішніх справ, 2016. 188 с.
19. Попович О. Терористичний акт у законодавстві України та зарубіжних країн (порівняльно-правовий підхід) // Підприємництво, господарство і право. 2018. № 8. С. 181–185.
20. Яремко Г. З. Асоціація норм про злочини терористичного характеру у Кримінальному кодексі України // Право і суспільство. 2020. № 1. Ч. 2. С. 148–155.

Bazhak O.V., Ivanenko V.M., Riashchenko O.I., Liganenko V.V.

SECURITY MEASURES ON SHIPS AND IN PORTS IN THE PRISM OF COUNTERING TERRORISM AND PIRACY AT SEA

The purpose of the article is to form a set of security measures on ships and in ports to counter terrorism and piracy at sea. This goal is achieved by analysing the sources of information on the definition and unambiguous interpretation of the terms maritime terrorism and piracy, identifying and analysing the causes of these dangerous phenomena. It is determined why the task of combating international terrorism, at sea, has become one of the most important. The role of the Diplomatic Conference on Maritime Security in addressing maritime security issues by introducing special measures to improve the security of passenger ships, cargo ships with a gross tonnage of 500 tons or more, including high-speed vessels, self-propelled floating drilling rigs and port facilities was demonstrated. The establishment of a consistent standardized approach to hazard assessment was emphasized, which allowed to balance possible risks by enhancing the safety of ships and port facilities. The main national regulatory documents of Ukraine, which supplemented the legislation for the implementation of the Ship and Port Facility Security Code, are indicated. The main reasons for the growth of the terrorist threat in the waters of Ukraine are systematized. The most significant result is the introduction of four groups of security measures to counter terrorism on maritime transport on certain grounds and the allocation of individual elements in these groups that allow to achieve effective counteraction to terrorism and piracy at sea. The further direction of work is a detailed analysis and analysis of individual components in the complex of measures of the ISPS Code for effective counteraction to maritime terrorism.

Keywords: *piracy, maritime terrorism, ship security, port facility security, countermeasures*

УДК 626.1

doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15

Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М.

ОСОБЛИВОСТІ ТА ВИМОГИ ЩОДО НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ НА ВНУТРІШНІХ СУДНОПЛАВНИХ ШЛЯХАХ

Метою статті є розробка вимог та визначення особливостей побудови підсистеми навігаційного забезпечення безпеки судноплавства на внутрішніх судноплавних шляхах. Поставлена мета досягається шляхом аналізу наявних та перспективних систем навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх водних шляхах та формулювання відповідних вимог, що забезпечать задані показники. Причому розробка вимог та визначення особливостей побудови підсистеми навігаційного забезпечення безпеки судноплавства враховують забезпечення єдності управління та контролю за функціонуванням ланцюга контрольно-коригувальних станцій на внутрішніх водних шляхах України. Доведено порядок вибору необхідних кутів нахилу супутників, що впливають на якість і дальність зв'язку. Найбільш суттєвим результатом є розробка вимог щодо точності і дискретності позиціонування диференціальних систем, що дозволяє виділити особливості розміщення контрольно-корегувальних станцій підсистеми навігаційного

забезпечення безпеки судноплавства, характерні для внутрішніх судноплавних шляхів, що суттєво відрізняються від вимог для морських акваторій. Визначені основні фактори, що впливають на точність системи. Основний вплив на похибку здійснює зміна кута піднесення супутника. Доведено, що для дотримання порядку точності системи при видаленні понад 500-700 км від контрольної точки варто обмежити використання супутників з кутами піднесення більше за 10°. Необхідно враховувати час доби, географічну широту, час року та фази циклу сонячної активності. Деградація похибки при віддаленні від контрольної точки з 100 км до 500 км збільшується в 5 разів при кутах підвищення супутників. Значимість одержаних результатів полягає у формулюванні вимог та визначенні особливостей побудови підсистеми навігаційного забезпечення безпеки судноплавства на внутрішніх судноплавних шляхах з урахуванням їх специфіки, що дозволить знизити витрати на розгортання елементів системи, одночасно підвищивши його точність. Таким чином, проведені дослідження показали ефективність запропонованого підходу для подальшого розвитку підсистеми навігаційного забезпечення безпеки судноводіння.

Ключові слова: навігаційне забезпечення, безпека судноводіння, внутрішні судноплавні шляхи, точність, супутник, контрольно-коригувальна станція, диференціальна система.

Постановка проблеми. Забезпечення необхідного рівня безпеки плавання залишається однією з найважливіших проблем експлуатації сучасного внутрішнього водного транспорту [1]. Ця проблема стосується навігації не тільки у морських районах, але й на внутрішніх судноплавних шляхах (ВСШ). Окреслене питання характерне не тільки для України, але й для низки держав, що мають потужні водні внутрішні шляхи. Це пов'язано зі збільшенням інтенсивності судноплавства на ВСШ, збільшенням швидкості й вантажопідйомності річкових суден та суден класу "ріка-море" [2].

Є декілька шляхів вирішення цієї проблеми. Жоден з них не гарантує досягнення абсолютної якості вирішення завдань навігації. Кращих результатів вдається досягти при застосуванні комплексного підходу до вирішення завдань навігації. Сьогодні серйозні позитивні результати дає конструктивне рішення завдань навігації. Воно полягає у переході від лоцманського до інструментального методу судноплавства на ВСШ. Основу управління та моніторингу при інструментальному методі судноплавства складають інфокомунікаційні системи, які забезпечують функціонування електронно-картографічних систем і систем високоточного позиціонування на основі супутникових радіонавігаційних систем.

Дані системи забезпечують ефективність виконання завдань лише в умовах дії суцільного поля диференціальної поправки. Для ВСШ України, враховуючи її географію і рельєф, таке поле може формуватися у середньому діапазоні хвиль (СХ) контрольно-коригувальними станціями (ККС) локальної диференціальної підсистеми (ЛДПС) GPS. Раціональне розміщення контрольно-коригувальних станцій ЛДПС для створення необхідної топології зон дії ККС ЛДПС забезпечує передачу коригувальної інформації у СХ діапазоні, чим досягається вищий рівень безпеки судноплавства та високоякісний моніторинг й управління транспортним процесом на ВСШ [3].

При передачі коригувальної інформації поверхневою хвилею СХ діапазону необхідно врахувати вплив підстилаючих поверхонь, загоризонтної рефракції та параметрів інфокомунікаційного обладнання. Отже, при побудові інфокомунікаційних систем та їх функціональних доповнень необхідно врахувати часткові варіації зон дії всіх ККС ЛДПС для визначення топології комплексного радіонавігаційного поля високоточного позиціонування, визначити дальність передачі диференціальних виправлень у СХ діапазоні та ін. Таким чином, для досягнення кращих результатів у безпеці судноплавства на ВСШ

необхідно сформулювати вимоги й особливості побудови підсистеми навігаційного забезпечення безпеки судноводіння, в чому й полягає зміст роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Систему безпеки судноводіння (СБС) складають три основних елементи [4]: навігаційна безпека плавання (НБП), попередження зіткнень суден (ПЗС), внутрішня та зовнішня цілісність судна (рис. 1).

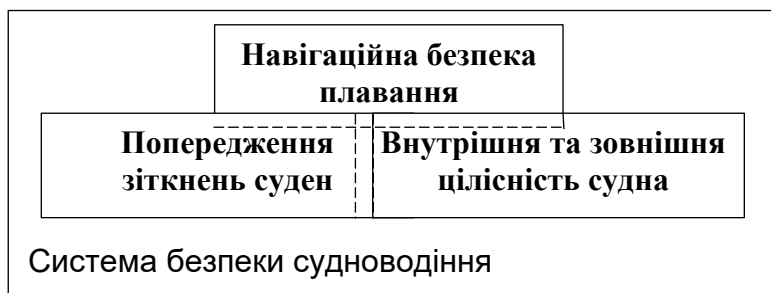


Рисунок 1 – Елементи системи безпеки судноводіння

Системою безпеки судноводіння називається взаємозв'язок елементів: судно, судноводій і навколишнє середовище, що представляють певну структуру (рис. 2), призначену для прогнозування виникнення небезпечних ситуацій, що мають наслідком руйнування судна, і здатну вживати заходів щодо їх запобігання.

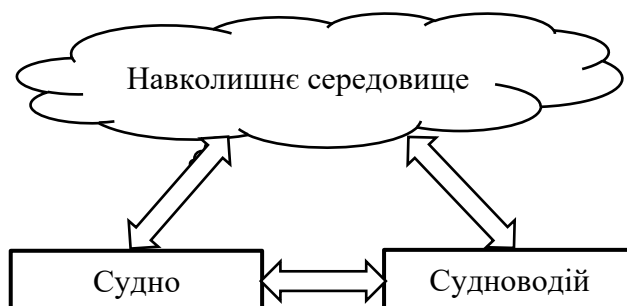


Рисунок 2 – Структура системи безпеки судноводіння

Фактично поняття СБС та її структури ототожені. У структурі СБС вказані елементи, відносини яких між собою породжують системну властивість інтегрованості, які в сукупності мають властивості, які не зводяться до властивостей окремих елементів.

Дане визначення дозволяє віднести систему безпеки судноводіння до класичної людино-машинної системи. В ній кінцевий результат досягається взаємодією трьох принципово різних середовищ: внутрішнього суднового, зовнішнього і макросередовища. В останньому формуються загальні вимоги до безпеки плавання суден: МППЗС-72 [5], рекомендації, настанови та інші обов'язкові закони, конвенції тощо, що впливають на забезпечення безпеки суден у морі.

Стандарти вимог до судноводіїв базуються на інтегрованому представленні судноводія про судно і зовнішнє середовище, яке необхідне для вироблення рішень.

До міжнародних вимог з організації та забезпечення безпеки мореплавання відносяться обов'язкові мінімальні вимоги, висунуті до капітанів, вахтових помічників та осіб рядового складу, що несуть вахту на містку (STSW-78/95), МППЗС-72 та ін.

Питання охорони людського життя на морі регламентуються єдиними технічними вимогами, що висуваються до суден для забезпечення безпечного плавання (SOLAS-74/94, chapter V), стандартами маневрених якостей суден [6], вимогами до заглибленості вантажної марки 66/69.

Управління безпечною експлуатацією суден регламентується (ISM Code) (SOLAS-74/94 chapter IX); заходами безпеки високошвидкісних суден (SOLAS-74/94 chapter X) та іншими міжнародними і національними вимогами.

У роботі Каретникова В.В. [7] вирішена проблема побудови топології диференціальних полів і визначення дальності дії контрольно-коригувальних станцій (ККС) високоточного місцевизначення на внутрішніх водних шляхах. Але при цьому не загострена увага на особливостях побудови подібних систем.

Робота [8] присвячена дослідженню питань електромагнітної захищеності систем моніторингу засобів навігаційного обладнання в автоматичних інформаційних системах. Але вимоги щодо побудови систем даного класу в явному вигляді у роботі не розглянуто.

Як відомо, основною причиною аварійності флоту є людський фактор. Виходячи з цього, ІМО розробила Систему управління безпекою (СУБ) як комплексний "гуманітарний" спосіб підтримки безпеки судноплавства шляхом створення "захисних бар'єрів" при роботі судноводіїв. Ідеологією такого підходу є теза: чим більше бар'єрів на шляху помилок судноводія, тим менше імовірність виникнення аварії або інциденту. Отже, методологія побудови СУБ, що базується на кодексах, конвенціях, постановах та ін., забезпечує механізм підтримки безпеки мореплавства шляхом вироблення адекватних вимог.

Тому актуальним залишається питання формування переліку основних вимог та особливостей при побудові підсистеми навігаційного забезпечення безпеки судноплавства на ВСШ

Метою статті є розробка вимог та визначення особливостей побудови підсистеми навігаційного забезпечення безпеки судноплавства на ВСШ.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Забезпечення безпеки, економічності, регулярності й екологічності судноводіння (БС) вимагає чіткого моніторингу руху суден і управління швидкостями потоків суден або окремих суден. Наріжним каменем для досягнення цієї мети вважається комплексне впровадження сучасних радіотехнічних засобів на базі високоточних супутникових навігаційних технологій.

Тому у регіонах розгортають елементи системи управління судноплавством, що мають у своєму складі навігаційне забезпечення для максимального зниження ризику аварій суден у районах з обмеженою свободою маневрування. Так, необхідно побудувати ланцюг контрольно-коригувальних станцій (ККС) глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) і ланцюг базових станцій автоматизованих ідентифікаційних систем (АІС). Перші забезпечують безперервне високоточне визначення координат у межах заявленої робочої зони, високоточне навігаційне перекриття судноплавних шляхів, ланцюгів системи управління рухом суден (СУРС) для контролю руху суден у всіх проблемних, з погляду навігації, акваторіях. Другі забезпечують моніторинг морського району уздовж всього узбережжя, що гарантує своєчасне отримання сигналів небезпеки [9].

Вимоги до точності місцевизначення судна визначені Резолюцією ІМО А.953 (23), згідно з якими на внутрішніх водних шляхах похибка місця розташування судна складає не більше 10 м для $P=95\%$. Такі цифри до навігаційного забезпечення морських і річкових й споживачів можуть забезпечити ГНСС при роботі в диференційному режимі.

Для досягнення заданих показників ККС має певну структуру (рис. 3): основний і резервний комплекти опорної станції (ОС) ГНСС; основний комплект станції інтегрального контролю (СІК) з антенами ГНСС; контрольну станцію (КС) ГНСС на базі обчислювача з програмним забезпеченням [10].

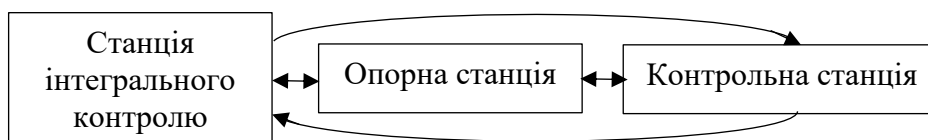


Рисунок 3 – Склад основного обладнання контрольно-коригувальної станції

Опорна станція здійснює прийом й обробку сигналів ГНСС і формування диференціальних поправок по всіх супутниках, які знаходяться в зоні радіовидимості ОС. Передача коригувальної інформації (КІ) у зовнішні пристрої здійснюється у відповідності зі стандартом RTCM SC 104 версія 2.3 (повідомлення 1, 31) [11].

Типовий ККС забезпечує такі основні технічні характеристики.

Опорна станція.

Кількість каналів приймача – 24.

Тип прийнятого сигналу – СТ, З/А, L1.

Точність виміру псевдодальності: 0,3 м (1 СКП).

Точність виміру псевдошвидкості, м/с: 0,04 (1 СКП).

Інтервал відновлення і видачі даних – < 1 с.

Час першого визначення при включенні – 2 хв.

Передача диференціальних виправлень на БС АІС здійснюється послідовним з'єднанням портів RS-232 (або RS-422, RS-485).

Живлення: від мережі змінного струму 220В, 50Гц.

Діапазон робочих температур:

- для апаратури всередині приміщень - $+5^{\circ}\text{C} - + 50^{\circ}\text{C}$;
- для антени, поза приміщенням - $50^{\circ}\text{C} - + 55^{\circ}\text{C}$.

Станція інтегрального контролю.

Кількість каналів приймача – 24.

Тип прийнятого сигналу – СТ, З/А, L1.

Інтервал відновлення і видачі даних – < 1 с.

Час першого визначення при включенні – 2 хв.

Прийом диференціальних поправок від апаратури мобільної АІС здійснюється за послідовним портом RS-232 (або RS-422, RS-485).

Діапазон робочих температур:

- для апаратури всередині приміщень: $+5^{\circ}\text{C} - + 50^{\circ}\text{C}$
- для антени, поза приміщенням: $- 50^{\circ}\text{C} - + 55^{\circ}\text{C}$

Контрольна станція забезпечує контроль параметрів та управляє роботою ОС і СІК.

Розглянуті вимоги відносяться до обладнання ККС, які працюють у СХ-діапазоні.

Також є технічна можливість передавати диференціальні поправки по каналах системи АІС.

При установці супутникових антен необхідно враховувати існуючу інфраструктуру для того, щоби не допустити затінення антен у горизонтальній площині, що може призвести до переривання прийому сигналів від супутників. Крім того, на вибір місця для розміщення супутникових антен впливає розподіл супутників на орбітах і структура їх сигналів. Опорна станція здійснює формування диференціальних поправок для супутників, кути узвишшя яких над обрієм складають від $7,5^{\circ}$. Ефект багатопроменевості прийнятих сигналів, що виникає за рахунок відбиття супутникових сигналів від близько розташованих до антени металевих об'єктів, будівель тощо, що мають добру відбиваючу здатність, вимагає вилучення таких предметів від супутникових прийомних антен. Спосіб установки антен ГНСС повинні виключати рухливість антен від впливу зовнішніх факторів.

Прокладка антенних кабелів здійснюється по кабельних трасах, а антенна щогла матиме надійне заземлення для захисту від грозових розрядів. Опорна станція використовує власне відоме місце розташування для розрахунку диференціальних поправок. Приймач ГНСС працює в опорних системах координат WGS-84.

Крім вказаних вимог й обмежень, серйозна увага приділяється розробці вимог щодо точності і дискретності позиціонування диференціальних систем. Причому їх розміщення відрізняється для морських акваторій і ВСШ.

При дискретних обсерваціях у морі, коли судно рухається за обчисленням, маємо:

$$M_{\text{обч}}(t) = \sqrt{M_0^2 + M_c^2(t)}, \quad (1)$$

де $M_{\text{обч}}$ – радіальна середньоквадратична похибка (СКП) обчисленого місця судна на даний момент; M_0 – радіальна СКП обчислення.

Для розрахунків в умовах морського плавання використовується вираз:

$$\begin{aligned} M_c(t) &= 0,7K_c t, & \text{при } t < 2 \text{ год}; \\ M_c(t) &= K_c \sqrt{t} & \text{при } t \geq 2 \text{ год}. \end{aligned} \quad (2)$$

Більшість річкових суден не мають курсовказівників, достовірних даних про величину коефіцієнта точності обчислення K_c , стабільності на маршруті і не ведуть прокладку на карті. Тому формула (2) є неактуальною для використання при плаванні на ВСШ. Річкові судна на ВСШ рухаються в умовах обмеженої видимості, а разом з системами автоматичного управління курсом (річковими авторулевими) застосовують покажчики швидкості повороту (ПШП). Іншими словами, при плаванні по обчисленню на ВСШ необхідна інформація про кутову та лінійну швидкості судна.

ПШП має зони нечутливості (ω_{min}). Тому навіть на прямолінійній ділянці судно буде зміщатися з осі суднового ходу. Визначимо час, за який судно зміститься на допустиму за умовами плавання величину $Y_{\text{доп}}$ при лінійній швидкості судна V :

$$t_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{2}{V \times \omega_{\text{min}}}} \times Y_{\text{доп}}. \quad (3)$$

У таблиці 1 наведені значення $t_{\text{доп}}$ для $\omega_{\text{min}} = 5^{\circ}/\text{хв}$ [12].

Таблиця 1 – Час зміщення судна на величину $Y_{\text{доп}}$, с для $\omega_{\text{min}} = 5^{\circ}/\text{хв}$

V , км/ч \ \ $Y_{\text{доп}}$, м	1	2	3	5	10
10	22	31	38	49	70
15	18	25	31	41	57
20	16	22	24	35	50
25	14	20	24	31	44

Похибка по пройденій відстані вздовж вісі суднового ходу ΔX дорівнює:

$$\Delta X = \frac{V \times \omega_{\text{min}}^2}{6} \times t_{\text{доп}}^2 \quad (4)$$

і для наведених у таблиці 1 значень $Y_{\text{доп}}$ практично може не враховуватися.

Таблиця 1 допомагає однозначно встановити час корекції руху судна для ідеальних умов. Але сильна звальна течія або інші впливи потребують більш часті корекції руху.

На криволінійних ділянках суднового ходу з заданим радіусом повороту $R_{\text{Зад}}$, який визначається по карті при проробленні маршруту, величина похибки зсуву з осі суднового ходу Y дорівнює похибці ΔR , що є різницею між заданим та дійсним радіусом повороту:

$$Y = R_{\text{Зад}} \sqrt{\left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2}, \quad (5)$$

де $\Delta\omega$ та ΔV – похибка кутової швидкості ω та лінійної швидкості V судна відповідно.

Зазвичай відносна похибка виміру кутової швидкості складає приблизно 10%. Якщо відносна похибка виміру швидкості судна дорівнює 10%, то з (5) отримаємо $Y \leq 0,14 R_{\text{Зад}}$.

Отже, на відміну від морських умов, при русі на криволінійних ділянках ВСШ інформація тільки від засобів числення не забезпечує безпеки плавання. Крім того, на ВСШ недостатньо апроксимації маршруту відрізками прямих ліній. Тому до формату шляхових точок має закладатися радіус повороту, кут повороту та маршрутні координати X початку повороту. Якщо судно робить поворот з похибкою за часом Δt , то є зсув точки повороту уздовж осі суднового ходу на величину

$$\Delta x = V \cdot \Delta t. \quad (6)$$

Зміщення з траєкторії руху (первісна похибка при повороті судна) визначається як

$$Y \geq R_{\text{сх}} \left(\frac{\Delta X^2}{2R_{\text{сх}}^2 - \Delta x^2} \right) = R_{\text{сх}} \left(\frac{V^2 \times \Delta t^2}{2R_{\text{сх}}^2 - V^2 \Delta t^2} \right). \quad (7)$$

Максимальне значення похибки досягається при повороті на кут у 90° :

$$Y_{\text{max}} = \Delta x. \quad (8)$$

Окремі результати розрахунку радіальної похибки позиціонування наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати досліджень, виконані з використанням логіко-інформаційної моделі

Завдання, які вирішуються	Райони плавання	Радіальна похибка позиціонування, м (P=0,95)
Рух судна по внутрішніх водних шляхах	1. Озера та водоймища	25,0-45,0
	2. Річки	5,0-10,0
	3. Канали	2,0-5,0
Розміщення знаків судноплавної обстановки і визначення габаритів ВВШ	1. Озера и водоймища	2,5-4,5
	2. Річки	0,5-1,0
	3. Канали	0,3-0,5

Згідно з даними табл. 2, для забезпечення безпеки плавання на ВСШ, крім особливо скрутних для судноплавства ділянок, радіальна похибка позиціонування не повинна перевищувати 10 м (з $\Delta P = 0,95$) при дискретності обсервації 5-10 с з використанням засобів числення і 1-2 с при безпосередньому керуванні судном по сигналах ГНСС.

У диференціальному методі позиціонування виключаються систематичні похибки. Тому точність виправлень у робочій зоні залежить від випадкових похибок у контрольній точці та у місці прийому на судні; росту похибки залежно від дистанції до контрольної точки, в якій вона була визначена; змін похибок у часовій області.

На значення випадкової похибки впливають нестабільність еталону часу та навігаційної підсистеми (2,7 м); тропосферна похибка (2,0 м); шуми приймача і похибки обробки (1,5 м); багатопроменевість (1,2 м); інші причини (0,87 м). Ці складові випадкової похибки визначають еквівалентну похибку виміру псевдодальності 3,97 м (1σ) і результуючу похибку визначення координат (у горизонтальній площині) у 4 м.

При оцінці зростання похибки залежно від дистанції до контрольної точки враховується, що при поширенні у тропосфері швидкість і траєкторія сигналу визначаються показниками переломлення (індексом рефракції). Групова затримка радіосигналу $\tau_{гр}$ має характер квазідетермінованої функціональної залежності вигляду:

$$C \times \tau_{гр} = C_{тр} \times N(h) \times cosec(E), \quad (9)$$

де C – швидкість світла; $C_{тр}$ – постійна, яка залежить від стану тропосфери; $N(h)$ – лінійний інтеграл функції рефракції від споживача до супутника; E – кут піднесення супутника відносно споживача у градусах.

Використання даних про стандартну атмосферу дозволяє усунути значну частину похибки. Тоді залишкова похибка (приблизно 4-8%) залежить від $\Delta C_{тр}$ – залишкової тропосферної затримки і T_0 – абсолютної температури в точці прийому:

$$\Delta(C \times \tau_{гр}) = \Delta C_{тр} \times \exp\left(\frac{-0,034}{T_0}\right) \times cosec(E). \quad (10)$$

Зрозуміло, що залишкова похибка (10) компенсується в контрольній точці визначення диференціальних поправок. Ця похибка, залежно від віддалення від контрольної точки, визначається різницею кутів піднесення супутника щодо споживача та контрольної точки, а також різницею висот й температур у цих точках. Отже, на похибку найбільше впливає зміна кута піднесення супутника ΔE . Максимального значення ця зміна досягає при розташуванні судна, контрольної точки та супутника в одній площині.

Розрахунки показують, що дотримання порядку точності системи при видаленні понад 500-700 км від контрольної точки, варто обмежити використанням супутників з кутами піднесення більше за 10° , враховуючи при цьому час доби, географічну широту, час року та фази циклу сонячної активності.

Швидкості зміни тропосферної та іоносферної затримок зазвичай складають кілька метрів за годину. При малих кутах нахилу сигнали до споживачів надходять через значні товщі іоносфери та тропосфери. Тоді швидкість зміни зростає у декілька разів.

Але при часі диференційної похибки до 10...15 с зміна швидкості іоносферної та тропосферної затримок істотного значення на точність позиціонування не має. Деградація похибки при віддаленні від контрольної точки з 100 км до 500 км збільшується в 5 разів при кутах підвищення супутників.

Висновки. У статті вирішено актуальне завдання з розробки вимог та визначення особливостей побудови підсистеми навігаційного забезпечення безпеки судноплавства на ВСШ, яке має важливе значення для удосконалення функціонування водного транспорту.

Доведено, що формування єдиного диференціального поля, що є локальним функціональним доповненням ГНСС, залежить від забезпечення єдності управління та контролю за функціонуванням ланцюга контрольно-коригувальних станцій на внутрішніх водних шляхах України.

Визначено вимоги до точності і дискретності навігаційного місцезнаходження за сигналами річкової диференціальної підсистеми ГНСС на внутрішніх судноплавних шляхах. Доведено порядок вибору необхідних кутів нахилу супутників, що впливають на якість і дальність зв'язку.

Подальшими напрямками роботи є визначення особливостей впливу підстилаючої поверхні, пори року та діапазонів радіохвиль на дальність передачі коригувальної інформації у річковій диференційній підсистемі ГНСС.

ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України «Про внутрішній водний транспорт» № 1054-IX, 2020.
2. Калініченко А. П. Проблеми безпеки на внутрішніх водних шляхах України / А. П. Калініченко // Наука і правоохорона. – 2010. – No 1. – С. 206-212.
3. Parkinson B.W., Fitzgibbon K.T. Optimal Locations of Pseudolites for Differential GPS // Navigation (USA). Winter 1986-1987. Vol. 33. No 4. Pp. 2569-283.
4. Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському і річковому транспорті: затверджене наказом Міністерства транспорту України від 20 листопада 2003 р. No 904 // Офіційний вісник України. – 2003. – No 52 (Частина 2). – Ст. 2844.
5. International Regulations for Preventing Collisions at Sea (1972) Parliament of the United Kingdom [режим доступу https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi5hvL1os_8AhX8S_EDHX7ZBAUQFnoECDEQAQ&url=https%3A%ghdYFmszamq4IptdD22qA], дата звернення: 12.11.2022].
6. SOLAS - International Convention for the Safety of Life at Sea. [режим доступу http://library.arcticportal.org/1696/1/SOLAS_consolidated_edition2004.pdf], дата звернення: 12.11.2022].
7. Rizos C. Trends in GPS Technology & Applications. Electronic Resource available at: <https://www.researchgate.net/publication/267254924>, дата звернення: 12.11.2022.
8. Hakansson M., Jensen ABO, Horemuz M., and Hedling G (2017) Review of code and phase biases in multi GNSS-positioning. GPS Solutions 21:849-860. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0572-7>, дата звернення: 12.11.2022.
9. Hilla S., and Cline M (2004) Evaluation pseudorange effects at stations in the National CORS Network. GPS Solutions 7:253-267. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0073-7>, дата звернення: 12.11.2022.
10. Guide For Ground Based Augmentation System Implementation // International Civil Aviation Organization [режим доступу to icaosam@icao.int], дата звернення: 12.11.2022].
11. Ассоциация Электронной Промышленности. Интерфейс между терминальным оборудованием данных и оборудованием передачи данных, применяющий

последовательный двоичный обмен данными (EIA RS-232-C), 2001, Ай Стрит, Нью-Йорк, штат Вашингтон, Д. С. 2006. 125 с.

12. URL: <http://forinsurer.com/public/14/07/07/3824> (дата звернення 12.11. 2022).

REFERENCES

1. Law of Ukraine (2020), "On Inland Water Transport" ["Pro vnutrishniy vodnyy transport"] No. 1054-IX.
2. Kalinichenko A.P. (2010), "Safety problems on the internal waterways of Ukraine" ["Problemy bezpeky na vnutrishnikh vodnykh shlyakhakh Ukrayiny"] / A.P. Kalinichenko // Science and law enforcement. – No. 1. – P. 206-212.
3. Parkinson B.W., Fitzgibbon K.T. *Optimal Locations of Pseudolites for Differential GPS* // Navigation (USA). Winter 1986-1987. Vol. 33. No 4. Pp. 2569-283.
4. (2003), "Regulations on the safety management system of maritime and river transport: approved by the order of the Ministry of Transport of Ukraine" ["Obzor vozmozhnykh metodov rascheta radiusa deystviya kontrol'no-korrekiruyushchikh stantsiy (KKS)"] dated November 20, 2003 No. 904 // Official Gazette of Ukraine. – No. 52 (Part 2). - Art. 2844.
5. *International Regulations for Preventing Collisions at Sea* (1972) Parliament of the United Kingdom [режим доступу https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewi5hvL1os_8AhX8S_EDHX7ZBAUQFnoECDEQAQ&url=https%3A%ghdYFmszamq4IptdD22qA, , дата звернення: 12.11.2022].
6. SOLAS - *International Convention for the Safety of Life at Sea*. [режим доступу http://library.arcticportal.org/1696/1/SOLAS_consolidated_edition2004.pdf, дата звернення: 12.11.2022].
7. Rizos C. *Trends in GPS Technology & Applications*. Elctronic Resource available at: <https://www.researchgate.net/publication/267254924>, дата звернення: 12.11.2022.
8. Hakansson M., Jensen ABO, Horemuz M., and Hedling G (2017) *Review of code and phase biases in multi GNSS-positioning*. *GPS Solutions* 21:849-860. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0572-7>, дата звернення: 12.11.2022.
9. Hilla S., and Cline M (2004) *Evaluation pseudorange effects at stations in the National CORS Network*. *GPS Solutions* 7:253-267. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0073-7>, дата звернення: 12.11.2022.
10. "Guide For Ground Based Augmentation System Implementation" // International Civil Aviation Organization [режим доступу to <https://www.icao.int/SAM/eDocuments/GBASGuide.pdf>, дата звернення: 12.11.2022].
11. (2001), Electronic Industry Association. "Interface between Data Terminal Equipment and Data Communication Equipment Employing Serial Binary Data" Exchange (EIA RS-232-C), I Street, New York, WA, D.C. 2006. 125 p.
12. URL: <http://forinsurer.com/public/14/07/07/3824> (дата звернення 12.11. 2022).

Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M.

FEATURES AND REQUIREMENTS FOR NAVIGATIONAL SAFETY OF NAVIGATION ON INLAND WATERWAYS

The purpose of the article is to develop requirements and to determine the features of building a subsystem of navigational safety of navigation on inland waterways. This goal is achieved by analyzing existing and prospective systems of navigation safety support for navigation on inland waterways and formulating appropriate requirements that will ensure the specified indicators. Moreover, the development of requirements and determination of the features of building a subsystem of navigational safety of navigation consider the unity of management and control over the functioning of the chain of control and correction stations on inland waterways of Ukraine. The procedure for selecting the necessary angles of inclination of satellites that affect the quality and range of communication is proved. The most significant result is the development of requirements for the accuracy and discreteness of positioning of differential systems, which allows us to highlight the features of the placement of control and correction stations of the subsystem of navigation safety of navigation, characteristic of inland waterways, which differ significantly from the requirements for marine areas. The main factors affecting the accuracy of the system are determined. The main influence on the error is made by the change of the satellite elevation angle. It is proved that to maintain the accuracy of the system at more than 500-700 km from the control point, it is necessary to limit the use of satellites with elevation angles greater than 10°. It is necessary to consider the time of day, geographical latitude, time of year and phases of the solar activity cycle. The degradation of the error at a distance from the control point from 100 km to 500 km increases by 5 times at the angles of satellite elevation. The significance of the obtained results lies in the formulation of requirements and determination of the peculiarities of building a subsystem of navigation safety of navigation on inland waterways, considering their specifics, which will reduce the cost of deploying system elements, while increasing its accuracy. Thus, the studies have shown the effectiveness of the proposed approach for the further development of the subsystem of navigation safety of navigation.

Keywords: *navigation support, navigation safety, inland waterways, accuracy, satellite, control and correction station, differential system.*

УДК 621.1

doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.16

Дубинець О.І., Гімпель Р.М., Бойко С.О., Маннапова О.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ТЕПЛОТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРОВОГО КОТЛА У СКЛАДІ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У статті розглядаються підходи щодо використання даних, отриманих від контрольних-вимірних приладів, для моніторингу продуктивності, виявлення несправностей тощо, що дає змогу скоротити час простою, скоротити технічне обслуговування і знизити витрати на вироблення енергії. Однак не всі контрольні-вимірні прилади чутливі до виявлення несправності. У роботі запропоновано

*методику вибору оптимального за кількістю і складом набору контрольно-вимірювальними приладів, необхідних для ефективного автоматизованого виявлення відмов котлів на основі машинного навчання для аналізу несправностей парового котла у складі суднової енергетичної установки. У роботі використовується метод зниження розмірності *mRMR* і контрольований класифікатор машинного навчання *SVM* для класифікації нормальних і помилкових станів котла. Результати розрахунків показують, що без реалізації вибору оптимального набору даних класифікатор на основі *SVM* забезпечує точність машинного навчання 94,1%. Після усунення нерелевантних контрольно-вимірювальних приладів продуктивність класифікатора машинного навчання збільшилася в експерименті з оптимальними даними приладів. Алгоритм *mRMR* на основі *SVM* забезпечує точність машинного навчання 97,4%, що ефективніше порівняно з підходом без реалізації вибору оптимального набору даних.*

Ключові слова: паровий котел, система теплотехнічного контролю, контрольно-вимірювальний прилад, несправність, машинне навчання, класифікатор, дані, зниження розмірності.

Постановка проблеми. Сучасні суднові парові котельні установки оснащені системою теплотехнічного контролю. Система теплотехнічного контролю призначена для постійного або періодичного контролю основних параметрів працюючого парового котла у складі суднової енергетичної установки. З цією метою парову котельну установку обладнують різними контрольно-вимірювальними приладами [1].

У рамках автоматизації процесів керування паровими котельними установками дані, отримані від контрольно-вимірювальних приладів, протягом певного часу можуть зберігатися у відповідній базі даних автоматизованої системи керування котельною установкою. Ці дані являють собою інформацію про стан працездатності парової котельної установки, який можна використовувати для моніторингу продуктивності, виявлення несправностей тощо. Раннє виявлення і діагностика несправностей на парових котельних установках може допомогти скоротити час простою, скоротити витрати на технічне обслуговування і вироблення енергії.

Однак не всі контрольно-вимірювальні прилади чутливі до виявлення несправності. При цьому, наприклад, під час автоматизації процесів контролю та управління паровими котельними установками надмірна кількість контрольно-вимірювальних приладів може впливати на якість роботи різних багатовимірних алгоритмів (наприклад, алгоритмів машинного навчання), які сильно залежать від кількості вхідних даних. Таким чином, необхідно розробити методику вибору оптимального за кількістю і складом набору контрольно-вимірювальних приладів, необхідних для ефективного автоматизованого виявлення відмов котлів.

Останнім часом алгоритми машинного навчання набули важливого значення для інтелектуального виявлення та діагностики несправностей у різних предметних областях [2-4]. Однак у галузі теплотехнічного контролю суднових котельних установок використання методів машинного навчання є недостатньо розвиненим.

У даній статті пропонується заснований на машинному навчанні підхід до вибору оптимального за кількістю і складом набору контрольно-вимірювальних приладів для виявлення несправностей котлів на судні. У дослідженні для вибору оптимального за кількістю та складом набору контрольно-вимірювальних приладів пропонується використовувати метод вибору ознак *mRMR* (мінімальна надмірність за максимальної релевантності), а для подальшої класифікації несправностей використовувати контрольований класифікатор машинного навчання машину опорних векторів (*SVM*).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На теперішній час існує достатня кількість досліджень і нормативних документів, присвячених контролю надійності та безпеки функціонування суднових парових котельних установок, зокрема у роботах [5-11].

Водночас слід зауважити, що розв'язання проблеми теплотехнічного контролю парового котла у складі суднової енергетичної установки на основі машинного навчання знайдено у літературних джерелах і періодичних виданнях не було, що й зумовило дані дослідження.

Метою статті є розробка методики вибору оптимального за кількістю і складом набору контрольно-вимірювальних приладів на основі машинного навчання для аналізу несправностей парового котлу у складі суднової енергетичної установки.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Паровий котел служить для виробництва вологої або перегрітої водяної пари при тиску, що перевищує атмосферний. Температура вологої пари, що виходить із котла, дорівнює температурі насичення, а температура перегрітої пари може бути значно вищою за температуру насичення.

Водяна пара на судні призначена для різних цілей. Наприклад, у головних паросилових установках вона необхідна для роботи головних теплових двигунів – парових турбін, а також для нагрівання води, палива та інших середовищ у різних теплообмінних апаратах. На судах з дизельними і газотурбінними установками пар потрібен турбогенераторам, що виробляють електроенергію, а також для обігрівання житлових приміщень. Крім того, пара необхідна для господарських потреб (камбуза та ін.), для технологічних установок з переробки риби та інших продуктів моря. Водяна пара в паровому котлі утворюється в результаті підведення теплоти до води. Джерелом теплоти служать продукти згоряння органічного палива (димові гази).

Під час оцінки технічного стану елементів котельних установок проводиться велика кількість вимірювань параметрів. Отримана інформація повинна використовуватися не тільки для оцінки миттєвого технічного стану, а й для прогнозування його зміни з метою своєчасного ухвалення рішень щодо запобігання виникненню аварійних ситуацій.

Під час експлуатації котлів можливі такі види несправностей:

- 1) пожежі в газоходах;
- 2) протікання води з котла;
- 3) руйнування (вибухи) корпусів;
- 4) вибух газів у топці та газоходах;
- 5) просідання жарових труб;
- 6) корозійні пошкодження;
- 7) втомні руйнування;
- 8) руйнування циркуляції води.

Відсотковий розподіл аварій для всіх видів котлів наведено на рис. 1 а); на рис. 1 б) – процентне співвідношення розподілу аварій водотрубних котлів, на рис. 1 в) – вогнетрубних [12].

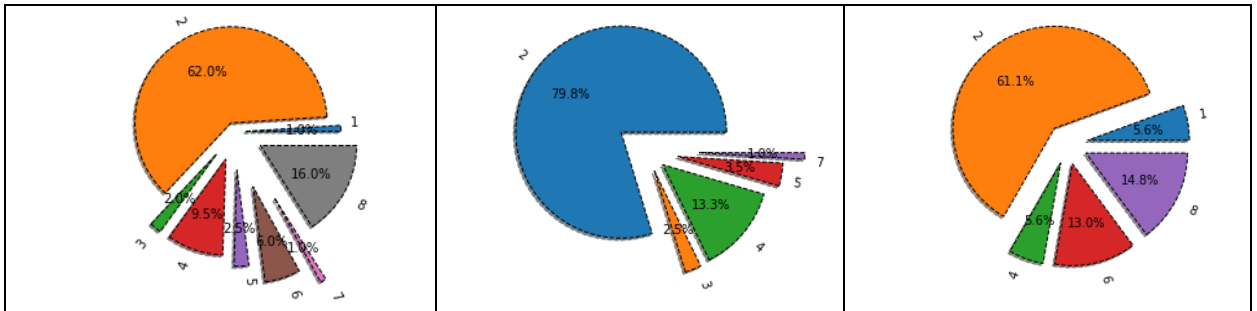


Рисунок 1 – Види аварій котлів: а) всіх типів; б) водотрубних; в) вогнетрубних

Пропонована методика вибору оптимальних контрольно-вимірювальних приладів на основі машинного навчання для аналізу несправностей парового котла у складі суднової енергетичної установки містить три етапи. На першому етапі здійснюється вибір оптимального за кількістю і складом набору контрольно-вимірювальних приладів, необхідних для виявлення несправностей. На другому етапі використовуються методи безпосередньо вибору оптимального за кількістю і складом набору контрольно-вимірювальних приладів. На третьому етапі використовуються алгоритми машинного навчання для виявлення несправностей суднового котла та оцінки роботи алгоритмів вибору контрольно-вимірювальних приладів.

Як уже зазначалося, з метою контролю основних параметрів парового котла, що працює, парову котельну установку обладнують різними контрольно-вимірювальними приладами, наприклад, водопоказувачами, манометрами, термометрами, витратомірами, солемірами, рівнемірами, киснемірами, газоаналізаторами та іншими контрольно-вимірювальними приладами [1]. Ці прилади можуть містити надлишкову інформацію, що впливає на продуктивність багатовимірних алгоритмів її обробки. Тому необхідно визначити оптимальний за кількістю та складом набір контрольно-вимірювальних приладів, а також визначити відповідне їхнє розташування для виявлення несправностей у котлі.

Розглянемо більш детально використання методу mRMR до розв'язання задачі вибору оптимального за кількістю та складом набору контрольно-вимірювальних приладів. Під час цієї роботи було досліджено ефективність застосування різних методів зменшення розмірності простору. Ефективне застосування подібних методів дає змогу значно збільшити кількість ознак і надалі якість самого класифікатора без втрати у швидкості навчання та класифікації. Спочатку було проведено низку експериментів із методами PCA (Principal Component Analysis) і RP (Random Projection). Однак ці методи показали свою неспроможність стосовно завдань подібного класу, через відносно малу розмірність простору ознак. Проведені експерименти призвели до необхідності детального аналізу самих ознак, що беруть участь у навчанні. Інструментом такого аналізу було обрано критерій mRMR (Minimum Redundancy Maximum Relevance).

Застосування цього критерію дає змогу виявити непотрібні ознаки в контексті машинного навчання, а також оцінити ефективність кожної ознаки, що бере участь у навчанні. mRMR – це підхід, запропонований у роботі [13], показав високу ефективність у діагностиці механічних несправностей і моніторингу стану конструкції. Зокрема метод mRMR дав змогу обирати найкращі функції в робочій області, зводячи до мінімуму надмірність і максимізуючи релевантність, при цьому демонструючи швидкі обчислення та високі якості стійкості [14].

Безпосередньо спочатку метод обчислює взаємну інформацію між атрибутами X і Y для кількісної оцінки релевантності та надмірності. Взаємна інформація визначається таким чином:

$$I(X, Y) = \iint p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)}, \tag{1}$$

де $p(x, y)$ – спільна ймовірнісна щільність, а $p(x)$ і $p(y)$ – часткові ймовірнісні щільності.

Нехай S позначає набір даних від усіх контрольно-вимірювальних приладів, тоді як S_s являє собою вже обраний набір даних, що містить m контрольно-вимірювальних приладів, а S_t позначає дані, які необхідно вибрати, причому набір даних надходить від n контрольно-вимірювальних приладів. Релевантність D контрольно-вимірювального приладу f в S_t з метою c може бути розрахована як:

$$D = I(f, c). \tag{2}$$

Надмірність R контрольно-вимірювального приладу f в S_t з усіма приладами в S_s можна розрахувати як:

$$R = \frac{1}{m} \sum_{f_i \in S_s} I(f, c). \tag{3}$$

Щоб отримати контрольно-вимірювальний прилад f в S_t з максимальною релевантністю і мінімальною надмірністю, рівняння (3) і (4) об'єднуються з функцією mRMR:

$$\max_{f_j \in S_s} [I(f_j, c) - \frac{1}{m} \sum_{f_i \in S_s} I(f_j, f_i)] \quad (j = 1, 2 \dots n). \tag{4}$$

Для набору даних від контрольно-вимірювальних приладів у кількості $N = m + n$ оцінка триватиме N етапів. Після цих оцінок формується оптимальний набір даних від контрольно-вимірювальних приладів O з використанням методу mRMR:

$$O = \{f'_1, f'_2 \dots, f'_h \dots, f'_n\}. \tag{5}$$

Індекс датчика h представляє важливість контрольно-вимірювального приладу. Чим важливіший контрольно-вимірювальний прилад, тим меншим є його індекс h .

Загальні кроки, пов'язані з обчисленням оптимального вибору контрольно-вимірювального приладу з використанням алгоритму mRMR, містить такі етапи:

1-й крок: обчислюється взаємна інформація між контрольно-вимірювальними приладами з використанням рівняння (1).

2-й крок: релевантність і надмірність контрольно-вимірювального приладу обчислюються за рівняннями (2) і (3).

3-й крок: рівняння (4) використовується для отримання контрольно-вимірювального приладу з максимальною релевантністю і мінімальною надмірністю.

4-й крок: оцінка обчислюється для кожного оцінюваного контрольно-вимірювального приладу, і контрольно-вимірювальні прилади з високою оцінкою обирають як оптимальні прилади.

Пряма оцінка даних у часовій області у класифікаторах машинного навчання, як правило, є неефективною. Тому стандартним підходом є оцінювання статистичних характеристик у часовій області та використання цих функцій у класифікаторах машинного навчання. У даній роботі використовуються чотири статистичні характеристики в часовій області (середньоквадратичне значення, дисперсія, коефіцієнт асиметрії та коефіцієнт ексцесу), які обчислюються для необроблених і оптимальних даних контрольно-вимірвальних приладів.

Середньоквадратичне відхилення. Вказує частку дисперсії даних. Значення цього показника визначає кількість даних, що відхиляються від середнього показника.

Дисперсія. Показує, наскільки значення параметрів досліджуваного об'єкта відхиляється від середнього у цій групі. Високі показники позначають те, що дані варіюються значною мірою. Низька дисперсія вказує на низьку варіативність інформації. Цей метод активно застосовується в описовій статистиці.

Коефіцієнт асиметрії. У статистичному аналізі структури даних цей показник визначає, наскільки асиметрично розподіляються дані. Вони можуть відхилятися в бік у двох напрямках, які являють собою два типи асиметричності:

- позитивний коефіцієнт асиметрії. У цьому разі дані перебувають по правий бік розподілу. Права сторона довша, середнє значення і медіана більші за моду;

- негативний коефіцієнт асиметрії. У такому разі дані знаходяться по лівий бік розподілу. Ліва сторона довша, середнє значення і медіана менші за моду.

Коефіцієнт ексцесу. Цей показник дає інформацію про низку властивостей розподілу даних. Зазвичай мають місце три можливі варіанти:

- ексцес менший за норму. Розподіл виражений у вигляді плоских кінців, що відповідає малим відхиленням у розподілі.

- нормальний ексцес. У цьому випадку дані розподілені нормально і вкладаються в поняття нормального розподілу.

- ексцес більше норми. Висота піку кривої перевищує її ширину, а дані зосереджуються в одному місці.

Виконується п'ятикратна перехресна перевірка, щоб уникнути перенавчання. У машинному навчанні перехресна перевірка – це статистичний метод оцінювання продуктивності узагальнення, який є стабільнішим і ретельнішим за використання поділу набору даних на набір для навчання і набір для тестування. Під час перехресної перевірки дані розділяють кілька разів і навчають кілька моделей. Найчастіше використовується версія перехресної перевірки – це k -кратна перехресна перевірка, де k – це задане користувачем число, зазвичай 5 або 10. Під час п'ятиетапної перехресної перевірки дані спочатку розділяють на п'ять частин (приблизно) рівного розміру, які називаються згортками (рис. 2).

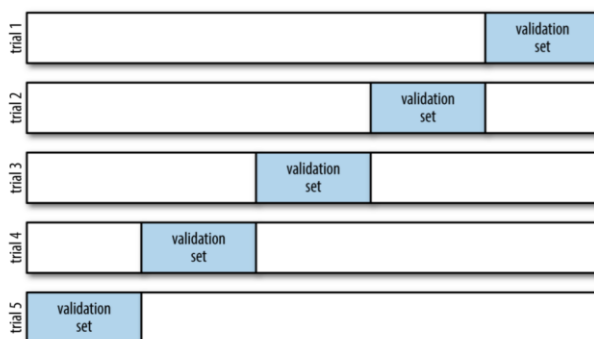


Рисунок 2 – Візуальне представлення п'ятикратної перехресної перевірки

Потім формується послідовність моделей. Першу модель навчають із використанням першої згортки як тестового набору (validation), а інші згортки (2-5) використовують як навчальну вибірку (trial). Модель будується з використанням даних зі згорток 2-5, потім точність оцінюється для згортки 1. Потім будується інша модель, цього разу з використанням згортки 2 як тестового набору і даних зі згорток 1, 3, 4 і 5 як навчального набору. Цей процес повторюється з використанням згорток 3, 4 і 5 як тестових наборів. Для кожного з цих п'яти розділів даних на набори для навчання і тестування обчислюється точність. У підсумку збираються п'ять значень точності.

Машини опорних векторів (Support vector machines) – сімейство алгоритмів бінарної класифікації, що ґрунтуються на навчанні з учителем і використовують лінійний поділ простору ознак за допомогою гіперплощини.

Основна ідея методу полягає у відображенні векторів простору ознак, що представляють об'єкти, які класифікуються, у простір більш високої розмірності. Це пов'язано з тим, що у просторі більшої розмірності лінійна роздільність множини виявляється вищою, ніж у просторі меншої розмірності. Причини цього інтуїтивно зрозумілі: чим більше ознак використовується для розпізнавання об'єктів, тим вищою є очікувана якість розпізнавання.

Після переведення в простір більшої розмірності, у ньому будується розділювальна гіперплощина. При цьому всі вектори, розташовані з одного "боку" гіперплощини, належать до одного класу, а розташовані з іншого – до другого. Також, по обидва боки основної розділювальної гіперплощини, паралельно до неї та на рівній відстані від неї будуються дві допоміжні гіперплощини, відстань між якими називають зазором (рис. 3).

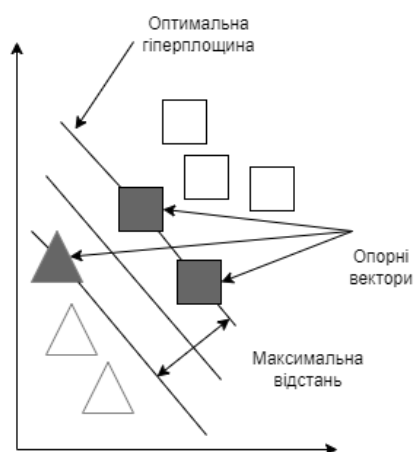


Рисунок 3 – Гіперплощини, що формуються у результаті використання SVM

Завдання полягає у побудові розділювальної гіперплощини таким чином, щоб максимізувати зазор – ділянку простору ознак між допоміжними гіперплощинами, в якій не повинно бути векторів. Передбачається, що розділювальна гіперплощина, побудована за цим правилом, забезпечить найвпевненіший поділ класів і мінімізує середню помилку розпізнавання. Вектори, які потрапляють на межі зазору (тобто лежатимуть на допоміжних гіперплощинах), називають опорними векторами.

Без реалізації вибору оптимального набору даних класифікатор на основі SVM забезпечує точність машинного навчання 94,1%. Після усунення нерелевантних контрольних-вимірних приладів продуктивність класифікатора машинного навчання збільшилася в експерименті з оптимальними даними приладів. Алгоритм mRMR на основі

SVM забезпечує точність машинного навчання 97,4%, що ефективніше порівняно з підходом без реалізації вибору оптимального набору даних.

Висновки. Велика кількість даних від різних контрольно-вимірювальних приладів дозволяє сформувати базу даних для автоматизованого контролю функціонування парових котельних установок. При цьому важливо визначити найбільш інформативні контрольно-вимірювальні прилади, необхідні для виявлення несправності за наявності неактуальних і надлишкових приладів. Багатовимірні алгоритми машинного навчання (у цьому дослідженні класифікатори) сильно залежать від кількості вхідних даних. Надлишкові дані, що надходять від контрольно-вимірювальних приладів, можуть знизити продуктивність цих класифікаторів. Тому в статті було досліджено заснований на машинному навчанні підхід до вибору оптимальних контрольно-вимірювальних приладів для виявлення несправностей парових котельних установок.

Безпосередньо в роботі використано метод зниження розмірності mRMR і контрольований класифікатор машинного навчання SVM для класифікації нормальних і помилкових станів котла. Результати розрахунків показують, що без реалізації вибору оптимального набору даних класифікатор на основі SVM забезпечує точність машинного навчання 94,1%. Після усунення нерелевантних контрольно-вимірювальних приладів продуктивність класифікатора машинного навчання збільшилася в експерименті з оптимальними даними приладів. Алгоритм mRMR на основі SVM забезпечує точність машинного навчання 97,4%, що є більш ефективним порівняно з підходом без реалізації вибору оптимального набору даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zhang T., Okada H., Tsukamoto T., Ohe K. Experimental study on water particles action in the combustion of marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels. Paper № 193, CIMAC 2007, Vienna.
2. Lin, T.-H.; Wu, S.-C. Sensor fault detection, isolation and reconstruction in nuclear power plants. *Ann. Nucl. Energy* 2018, 126, 398–409.
3. Han Kim, K.; Seok Lee, H.; Hwan Kim, J.; Park, J.H. Detection of Boiler Tube Leakage Fault in a Thermal Power Plant Using Machine Learning Based Data Mining Technique. In *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Melbourne, Australia, 13–15 February 2019; pp. 1006–1010.
4. Jing, C.; Hou, J. SVM and PCA based fault classification approaches for complicated industrial process. *Neurocomputing* 2015, 167, 636–642.
5. Лихогляд К.А., Кар'янський С. А., Чимшир В. І., Мусоріна М.О. Суднові турбінні установки: навчальний посібник. Одеса : НУ«ОМА», 2020. 241 с.
6. Корнилов Э.В., Бойко П.В. Паровые газотурбинные установки морских судов (в вопросах и ответах) / Одесса: Феликс, 2004. 240 с.
7. Гречко Н.Ф. Судовые турбинные установки: справочное пособие. Одесса: Феникс, 2005. 317 с.
8. Лихогляд К.А., Маслов І.З., Разінкін Р.О., Найдьонов А. І. Устрій судових котельних установок та їхня безпечна експлуатація : навчальний посібник. Одеса, 2018. 158 с.
9. Корнилов Э.В. Вспомогательные и утилизационные котлы морских судов : учебное пособие. Одесса : Феникс, 2004. 176 с.

10. Правила технічної експлуатації морських та річкових суден. Котли парові та водогрійні. КНД 31.2.002.06.96. Одеса : ЦПАП, 1997. – 112 с.
11. Заблоцкий Ю.В. Судовые паровые котлы. Тепловой баланс и расчет теплообмена в поверхностях нагрева : учебное пособие. Одесса : НУ«ОМА», 2017. 208 с.
12. Heinrich G., Prescher Karlheinz, Finsterwalder, G. Wasser und Methhanol Zusatze bei dieselmotorischer Verbrennung // MTZ. 1984. – 45. – №5. – P. 183-188.
13. Peng, H.; Long, F.; Ding, C. Feature selection based on mutual information criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2005, 27, 1226–1238.
14. Yan, X.; Jia, M. Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using improved multiscale dispersion entropy and mRMR feature selection. Knowl.-Based Syst. 2018, 163, 450–471.

REFERENCES

1. Zhang T., Okada H., Tsukamoto T., Ohe K. *Experimental study on water particles action in the combustion of marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels*. Paper № 193, CIMAC 2007, Vienna.
2. Lin, T.-H.; Wu, S.-C. (2018), *Sensor fault detection, isolation and reconstruction in nuclear power plants*. Ann. Nucl. Energy 2018, 126, pp/ 398–409.
3. Han Kim, K.; Seok Lee, H.; Hwan Kim, J.; Park, J.H. (2019), *Detection of Boiler Tube Leakage Fault in a Thermal Power Plant Using Machine Learning Based Data Mining Technique*. In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Melbourne, Australia, 13–15 February 2019; pp. 1006–1010.
4. Jing, C.; Hou, J. (2015), *SVM and PCA based fault classification approaches for complicated industrial process*. Neurocomputing 2015, 167, pp/ 636–642.
5. Lykhohlyad K.A., Kar"yans'ky S. A., Chymshyr V. I., Musorina M.O. (2020), *"Sudnovi turbinni ustanovky" [Marine turbine installations]*, navchal'nyy posibnyk. Odessa : NU«ОМА», 241 p.
6. Kornilov E.V., Boyko P.V. (2004), *"Parovyye gazoturbinnyye ustanovki morskikh sudov (v voprosakh i otvetakh)" [Steam gas turbine installations of sea vessels (in questions and answers)]*, Odessa: Feliks, 240 p.
7. Grechko N.F. (2005), *"Sudovyye turbinnyye ustanovki" [Ship turbine installations: a reference guide]* : spravochnoye posobiye, Odessa: Feniks, 317 p.
8. Lykhohlyad K.A., Maslov I.Z., Razinkin R.O., Nayd'onov A. I. (2018), *"Ustriy sudnovykh kotel'nykh ustanovok ta yikhnya bezpechna ekspluatatsiya" [The structure of ship boiler plants and their safe operation]* : navchal'nyy posibnyk. Odessa, 158 p.
9. Kornilov E.V. (2004), *"Vspomogatel'nyye i utilizatsionnyye kotly morskikh sudov" [Auxiliary and utilization boilers of sea vessels]* : uchebnoye posobiye. Odessa : Feniks, 176 p.
10. *"Pravyla tekhnichnoyi ekspluatatsiyi mors'kykh ta richkovykh suden. Kotly parovi ta vodohriyni" [Rules for the technical operation of sea and river vessels. Steam and water boilers]*. КНД 31.2.002.06.96. Одеса : TSPAP, 1997. – 112 p.
11. Zablotskiy Yu.V. (2017), *"Sudovyye parovyye kotly. Teplovoy balans i raschet teploobmena v poverkhnostyakh nagreva" [Marine steam boilers. Thermal balance and calculation of heat transfer in heating surfaces]* : uchebnoye posobiye. Odessa : NU«ОМА», 208 p.
12. Heinrich G., Prescher Karlheinz, Finsterwalder, G. Wasser und Methhanol Zusatze bei dieselmotorischer Verbrennung // MTZ. 1984. – 45. – №5. – P. 183-188.

13. Peng, H.; Long, F.; Ding, C. *Feature selection based on mutual information criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy*. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2005, 27, 1226–1238.
14. Yan, X.; Jia, M. *Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using improved multiscale dispersion entropy and mRMR feature selection*. Knowl.-Based Syst. 2018, 163, 450–471.

Dubynets O.I., Himpel R.M., Boiko S.O., Mannapova O.V.

STUDY OF THE POSSIBILITIES OF THERMAL CONTROL OF A STEAM BOILER AS PART OF A SHIP POWER PLANT BASED ON MACHINE LEARNING

The article discusses approaches to the use of data obtained from instrumentation for performance monitoring, fault detection, etc., which allows to reduce downtime, reduce maintenance, and reduce energy production costs. However, not all instrumentation is sensitive to fault detection. The paper proposes a methodology for selecting the optimal number and composition of a set of instrumentation necessary for effective automated detection of boiler failures based on machine learning for the analysis of steam boiler failures as part of a ship power plant. In this paper, the mRMR dimensionality reduction method and supervised SVM machine learning classifier are used to classify normal and false boiler states. The calculation results show that without implementing the selection of the optimal data set, the SVM-based classifier provides 94.1% machine learning accuracy. After eliminating irrelevant instrumentation, the performance of the machine learning classifier increased in the experiment with optimal instrumentation data. The SVM-based mRMR algorithm provides machine learning accuracy of 97.4%, which is more efficient than the approach without implementing the optimal data set selection.

Keywords: steam boiler, thermal control system, instrumentation, fault, machine learning, classifier, data, dimensionality reduction.

УДК 629.5

doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.17

Трофименко І.В., Бажак О.В., Іваненко В.М., Рященко О.І.

КОДЕКС З ОХОРОНИ СУДЕН І ПОРТОВИХ ЗАСОБІВ ЯК МЕТОДИЧНА ОСНОВА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОХОРОННИХ ЗАХОДІВ НА СУДНАХ І ПОРТОВИХ ОБ'ЄКТАХ

Метою статті є систематизація основних положень Кодексу з охорони суден і портових засобів комплексу охоронних заходів на суднах і в портах для протидії тероризму і піратству на морі, що стосується цілей, вимог щодо досягнення цілей Кодексу, рівнів охорони, структури Плану охорони судна, цілей регулярних переглядів (оглядів) і внутрішніх аудиторських перевірок Плану, заходів з контролю доступу на судно для різних рівнів охорони, цілей та заходів щодо припинення доступу до ділянок обмеженого доступу. Поставлена мета досягається шляхом аналізу джерел інформації та виявлення цілей та вимог, що висуваються для досягнення цілей Кодексу з охорони суден і портових засобів. Надана характеристика рівняв охорони на судні у відповідності до введених Кодексом. Наведена структура плану охорони судна, показана взаємозалежність обов'язкового та

додаткового елементів. Розкрито детальний зміст заходів, що входять до складу обов'язкової та додаткової компоненти. Наголошено про призначення, регулярність та цілі переглядів (оглядів) і внутрішніх аудиторських перевірок Плану. Показано роль, повноваження і відповідальність капітана судна щодо забезпечення безпеки та охорони судна. Визначені заходи з контролю доступу на судно для різних рівнів охорони. Наголошено цілі введення ділянок обмеженого доступу на судні та заходи щодо припинення доступу до ділянок обмеженого доступу при зростанні рівня охорони. Найбільш суттєвим результатом є систематизація деяких основних положень Кодексу та наочність їх представлення. Подальшим напрямом роботи є детальний розбір, аналіз та систематизація основних охоронних заходів щодо спостереження за обробкою вантажу і доставкою суднових запасів і постачання, при поводженні з несупроводжуваним багажем, при контролі захищеності судна, при виконанні стандартних робочих процедур за діями у надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: піратство, морський тероризм, безпека суден, охоронний захід, охорони суден і портових засобів, рівень охорони, контролю доступу на судно, ділянки обмеженого доступу.

Постановка проблеми. У світлі зростаючих загроз Міжнародною Морською Організацією боротьба з морським тероризмом і піратством була піднята на небувалу досі висоту. У грудні 2002 р. ІМО провела Дипломатичну конференцію з морського захисту, на якій було розглянуто питання морської безпеки. Результатом великої роботи стало доповнення Міжнародної конвенції СОЛАС-74 новою главою XI-2 (Особливі заходи щодо підвищення рівня морської безпеки). У ній прописані стандартизовані підходи до оцінки небезпеки. Як результат, посилення безпеки суден і портових об'єктів дало змогу істотно знизити можливі ризики від піратства і морського тероризму на них.

Після ухвалення Кодексу з охорони суден і портових засобів (ОСПЗ) Україна доповнила своє законодавство відповідно до вимог цієї Конвенції. Але Кодекс з охорони суден і портових засобів як методична основа для його застосування у конкретних умовах обстановки для протидії піратству і тероризму на морських шляхах потребує ретельного вивчення основних положень та їх систематизації для підвищення якості охоронних заходів на суднах і портових об'єктах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Піратство і тероризм на морі як дуже серйозні загрози життю і здоров'ю пасажирів суден і членів екіпажів залишається у ряду найважливіших для урядів багатьох держав світу, впливових міжнародних організацій. Дипломатична конференція ІМО з морського захисту (2002 р.) розглянула питання морської безпеки та внесла до Міжнародної конвенції СОЛАС-74 нову главу, що стосується особливих заходів щодо підвищення рівня морської безпеки.

Після ухвалення Кодексу з охорони суден і портових засобів (ОСПЗ) [1] з'явилася низка публікацій, що розкривають особливості розробки та застосування заходів щодо підвищення протидії морському тероризму і піратству. Разом з тим окремі питання систематизації основних положень цього документу та їх практичного застосування у конкретних умовах обстановки для підвищення якості охоронних заходів на суднах і портових об'єктах залишаються без належної уваги з боку дослідників.

Робота [1] являє собою повний зміст Міжнародного Кодексу з охорони суден і портових засобів.

У роботі [2] проводиться аналіз чинних нормативно-правових актів у сфері забезпечення боротьби з незаконними актами проти безпеки морського судноплавства, але не розбираються окремі положення Кодексу стосовно протидії морському тероризмі і піратству.

У роботі [3] увага звертається на правове регулювання протидії тероризму. Але у роботі не розкриті особливості протидії морському тероризму.

Робота [4] присвячена висвітленню правових аспектів тероризму та шахрайства на морі. Але в ній не розглянуті особливості боротьби з цими злочинами на морі.

Автори робіт [5, 6] доводять результати розбійної діяльності піратів, не концентруючись на способах протидії ним.

Тому проведення дослідження щодо систематизації охоронних заходів на суднах і в портах та їх постійне корегування та вдосконалення з метою адаптації у відповідь на зміну тактики ведення морських терористичних атак та виконання піратських дій злочинцями є актуальним завданням.

Метою статті є систематизація основних положень Кодексу з охорони суден і портових засобів комплексу охоронних заходів на суднах і в портах для протидії тероризму і піратству на морі, що стосується не всього документу, а його окремих частин, а саме цілей, вимог щодо досягнення цілей Кодексу ОСПЗ, рівнів охорони, структури Плану, цілей регулярних переглядів (оглядів) і внутрішніх аудиторських перевірок Плану охорони судна, заходів з контролю доступу на судно для різних рівнів охорони, цілей та Заходи щодо припинення доступу до ділянок обмеженого доступу.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Кримінальний кодекс України (його ст. 258) дає однозначне визначення терміну "терористичний акт". Це – застосування зброї, вчинення вибуху, підпалу або інших дій, що створювали небезпеку для життя чи здоров'я людини або заподіяння значної майнової шкоди чи настання інших тяжких наслідків, якщо такі дії були вчинені з метою порушення громадської безпеки, залякування населення, провокації воєнного конфлікту, міжнародного ускладнення, або з метою впливу на ухвалення рішень чи вчинення або невчинення дій органами державної влади чи органами місцевого самоврядування, службовими особами, а також з метою впливу на ухвалення рішень чи вчинення чи невчинення дій органами державної влади або органами місцевого самоврядування, посадовими особами. [3].

Але тероризм на морі з юридичного погляду відрізняється від тероризму взагалі, і не лише сферою, в якій відбувається дія (море), а насамперед більш широким розмахом – міжнародним масштабом на відміну від внутрішньодержавного тероризму.

Міжнародний тероризм на морі спрямований проти іноземних об'єктів, фізичних осіб, які є громадянами іноземної держави, та їхньої власності.

Міжнародний морський тероризм загрожує безпеці мореплавства і зневажає базовий принцип свободи морів.

Останні роки характеризуються зближенням морського тероризму і піратства.

Термін «піратство» походить від грец. *peirates* – грабіжник, розбійник – і означає незаконне захоплення, пограбування або потоплення торговельних суден, які вчиняють приватні або державні судна у відкритому морі та в іншому місці поза юрисдикцією будь-якої держави [4].

Мореплавання, морська торгівля і морські набіги з'явилися практично одночасно на всіх територіях, де місцеве населення оволоділо основами мореплавання. Увесь стародавній світ із різним ступенем успіху займався піратством: хто був недостатньо сильний, торгував і відкуповувався, хто був сміливий, агресивний і в міру сильний, той забирав товар у торговців, брав їх у полон і продавав у рабство [4]. Причому в античних піратів основним заняттям був напад не на судна, а на прибережні поселення й окремих подорожніх для їхнього захоплення та продажу в рабство або отримання викупу за знатних бранців.

Ще за часів Стародавніх Месопотамії, Єгипту, Греції та Риму, коли встановилися міцні торговельні зв'язки між країнами та народами, шкода від піратства почала наносити серйозні удари по економіці та репутації шкоду. Тому піратство стало визнаватися одним

із найтяжчих злочинів і почалися спроби боротьби з ним. Відомий випадок, коли Гней Помпей Великий за три місяці повністю ліквідував піратство в Середземному морі.

Піратство і морська контрабанда стали одним з основних джерел доходів терористичних організацій. Для цього знадобилося створювати власні військові флоти та відповідну інфраструктуру. Але апетити зростали, і до піратства та морської контрабанди додалися теракти на суші та в повітрі.

Останні десятиліття характеризуються різким зростанням терористичної активності груп і організацій в акваторіях морів і океанів. Причому тактика терористів постійно вдосконалюється, удари завдаються вже і з суші із застосуванням підводних плавців, підводних транспортувальників, сучасних засобів доставки, включно з міні-підводними човнами і торпедами, керованими смертниками-шахідами.

Статистика зростання терористичних і піратських злочинів проти комерційних суден на морі не вселяє оптимізму. Причому вже чітко вималювалися основні райони піратства і морського тероризму. До них належать Південно-Східна Азія, Південно-Китайське море, Західна і Східна Африка, Південна Америка і Карибський басейн. У цих регіонах, як правило, розташовані країни, що мають вихід до моря, і де базуються повстанці, бойовики і терористи різних релігійних напрямків [5].

Ще зовсім недавно теракти на воді відбувалися в зазначених вище районах, тобто в основному біля узбереж країн, що розвиваються. Однак останніми роками вже не викликають особливого здивування випадки піратських атак у Середземному і Чорному морях біля берегів Лівану, Сирії, Туреччини та Грузії [6]. Цій обставині сприяло кілька причин. І чи не основною є технічне переоснащення морських терористів. Взв'язавши на озброєння сучасні, більш швидкісні й оснащені судна та передові бойові засоби, пірати й морські терористи почали безсоромно орудувати в територіальних водах цивілізованих держав, деколи агресивно атакуючи навіть у портах і на рейдах, погрожуючи захоплювати й топити газовози, танкери та гігантські круїзні лайнери у відкритому морі.

Як уже зазначалося, відбувається в певному сенсі змичка піратів і морських терористів: їхні акції часто добре скоординовані, а деякі проводяться спільно. І ось уже не тільки методи і способи досягнення цілей однакові, а й самі цілі. Вони дуже корисливі й меркантильні – гроші, величезні гроші. Насильства, знущання, вбивства – це, вибачте, «побічний продукт» цих звірячих акцій. Одна з головних цілей деяких окремих нападів – захопити заможних або впливових пасажирів для отримання викупу. Заручники – це фактично гаманці піратів і морських терористів для оплати спорядження та фінансування своїх акцій.

Усе це свідчить, що проблема піратства і морського тероризму вже вийшла за межі національних і навіть регіональних проблем. Якщо раніше керівники держав, що розвиваються, де процвітав морський розбій, не володіли для боротьби з ним ефективними силами і засобами, не мали необхідних компетенцій, то зараз ця проблема перемістилася у фокус найгострішої уваги всього цивілізованого світу.

Масштабний технічний прогрес, вільний доступ до останніх технологічних досягнень уже в найближчому майбутньому може дати міжнародному тероризму нові можливості в реалізації своїх злочинних планів, а міжнародному співтовариству – нові проблеми. І пов'язано це із зосередженням уваги терористів і піратів на третій природній стихії – водній. Саме водними шляхами переміщуються найжирніші та найласіші пироги міжнародної торгівлі: адже йдеться про сотні мільярдів і навіть трильйони доларів [5, 6]. Тому фахівці попереджають про можливі масштабні атаки проти вантажних, пасажирських і військових кораблів, нафтових платформ, портів і портової інфраструктури, суднобудівних верфей тощо. Уразливість військового і комерційного судноплавства для таких атак, на жаль, небезпідставна.

Найближчий розгляд найпотужнішого терористичного угруповання на морі «Тигри визволення Таміл Ілами», що воює за створення незалежної держави тамілів на північному сході Шрі-Ланки, засвідчив таке. Ця структура є лідером серед азіатських терористичних організацій і має найдосконалішу морську складову. За своїм складом та оснащенням він перевершує флоти більшості країн світу, а за розмірами – це найбільший у світі недержавний флот, який оперативно діє у складі двох окремих формувань [4].

Перше і найпотужніше формування називається «Морські тигри». До його складу входять 3-4 тис. добре навчених і екіпірованих бойовиків, організаційно об'єднаних у 12 секцій. Це секції бойових морських підрозділів; підводних підривних команд; ударних груп «Морські тигри»; інженерних і суднобудівельних структур; загону радіолокації та телекомунікацій; арсеналу морських озброєнь; морехідної школи; рекрутської; політичної пропаганди та фінансування; тилового забезпечення виключної економічної зони; спостереження та розвідки; культурно-побутової та реєстраційної. Вони володіють оперативними і технічними можливостями для проведення терактів і піратських дій у територіальних і прибережних водах та у відкритому морі.

Менш потужними за складом, але не за розв'язуваними завданнями є ще такі секції: «Тигриці» (жіночий підрозділ, вельми численний), військово-морської розвідки (на чолі з офіцером військової розвідки), «Чорні тигри» (команда смертників).

Завдяки досконалому технічному оснащенню, сучасному озброєнню, передовим засобам зв'язку та оптики, чудовій ремонтній базі та логістиці, проведеним експериментам з новітніми видами озброєнь, ударні групи «Морських тигрів» ведуть систематичні та вельми успішні бойові дії з Військово-морськими силами (ВМС) Шрі-Ланки. Величезну роль в успіхах цих бандитів відіграє не тільки вивчення тактики ВМС Шрі-Ланки, а й постійне вдосконалення тактичних прийомів і схем під час проведення своїх атак.

Моніторинг та аналіз тенденцій розвитку міжнародного тероризму, його регіональних і релігійних специфічних аспектів дозволяють однозначно визначити основні загрози для морського транспорту [4]:

а) захоплення або викрадення морського судна чи здійснення контролю над ним силою або погрозою сили чи шляхом будь-якої іншої форми залякування;

б) вчинення акту насильства проти будь-якої особи на борту морського судна (території порту), якщо цей акт може загрожувати безпеці плавання цього судна (безпеці порту);

в) руйнування морського судна або заповдіння йому чи його вантажу ушкоджень, які можуть загрожувати безпечному плаванню цього судна або безпеці порту;

г) розміщення або вчинення дій з метою розміщення на борту морського судна (у тому числі такого, що перебуває на території порту) пристроїв, що можуть зруйнувати це судно, завдати цьому судну чи його вантажу ушкоджень, що загрожують або можуть загрожувати безпечному плаванню цього судна чи безпеці порту;

д) використання кораблів і суден суб'єктами міжнародного тероризму як побічного (непрямого) об'єкта терористичної діяльності;

е) використання морського транспорту суб'єктами транснаціональної організованої злочинності як засобу реалізації незаконної діяльності;

ж) руйнування морського навігаційного обладнання, або нанесення йому серйозного пошкодження, або створення серйозних перешкод його експлуатації, якщо будь-який такий акт може загрожувати безпеці плавання суден;

з) руйнування портової споруди або заповдіння їй серйозних ушкоджень, які загрожують або можуть загрожувати безпеці плавання суден або безпеці порту;

і) повідомлення завідомо неправдивих відомостей, що можуть створити загрозу безпеці плавання суден або безпеці порту.

Морський транспорт призначений для зручного переміщення пасажирів і вантажів на значні відстані. Користуючись прямим призначенням морського транспорту, фігуранти міжнародного тероризму не відмовляють собі в задоволенні здійснити потайне транзитне переміщення потрібних їм пасажирів і вантажів. Часто такими вантажами буває оперативна документація, пропагандистські матеріали, зброя, боєприпаси, вибухові, радіоактивні або отруйні речовини. Пасажири і вантажі можуть переміщатися за легалізованими або підробленими документами, не наражаючи (або не завжди наражаючи) при цьому на небезпеку самі судна, екіпажі, пасажирів і вантажі на борту. Загрози будуть реалізовані пізніше, на території третіх країн, куди буде спроектована терористична діяльність, за допомогою переправлених терористів і вантажів.

Але часто морські судна використовуються в іншій якості. Десь здійснено теракт, і зовсім не обов'язково, що на морському транспорті. Швидше за все, поза морським судном. Можливе захоплення заручників, природно, є терористи, які скоювали злочини. І тепер злочинці і жертви потребують евакуації. І ось морські судна використовуються як транспортний засіб для доставки терористів і заручників у визначену загарбниками географічну точку, де відбуватиметься черговий етап цього дійства.

Але до об'єктів морського транспорту небайдужі не лише морські терористи, а й фігуранти кримінальної діяльності інших напрямів. Очевидними є такі сфери незаконної діяльності, як нелегальна міграція; незаконний обіг наркотичних речовин; незаконний грошовий трансферт; контрабанда зброї, боєприпасів; незаконне переміщення культурних цінностей і творів мистецтва тощо. Характерно, що значна частина операцій організованої злочинності регулярними рейсами пасажирських суден вплетена у звичайні пасажирські та вантажні потоки.

Останні десятиліття виявили ще одну надзвичайно тривожну тенденцію. Її сенс полягає в тому, що постійна конкурентна боротьба між великими судноплавними компаніями або навіть країнами деколи переростає в неадекватні, зокрема терористичні методи. Тобто до двох дій, що вже стали «звичними», (піратства і «традиційних» терористичних актів на морі, які здійснюють міжнародні терористичні організації і переслідують, як правило, політичні цілі), додалося третє. Це – аналогічні піратським і терористичним акти, які планують і проводять конкуренти (часто із залученням найнятих терористів і піратів) проти суден компаній (країн), які конкурують, і різних об'єктів на березі, які мають на меті переслідування економічної мети, спрямовані на усунення або, щонайменше, послаблення конкурента.

Запровадження різних санкцій, обмежень, посилення правил ведення господарської діяльності щодо низки компаній і країн можуть викликати з їхнього боку відповідні неадекватні дії, близькі до терористичних. І загроза застосування таких методів буде тільки зростати. У цих умовах державна і морська влада повинна постійно вести необхідну аналітичну і профілактичну роботу і бути на крок попереду тих, хто планує такі акти.

У світлі зростаючих загроз Міжнародною Морською Організацією боротьба з морським тероризмом і піратством була піднята на небувалу досі висоту. У грудні 2002 р. ІМО провела Дипломатичну конференцію з морського захисту, на якій було розглянуто питання морської безпеки. Результатом великої роботи стало доповнення Міжнародної конвенції СОЛАС-74 новою главою XI-2 (Особливі заходи щодо підвищення рівня морської безпеки). У ній прописані стандартизовані підходи до оцінки небезпеки. Як результат, посилення безпеки суден і портових об'єктів дало змогу істотно знизити можливі ризики від піратства і морського тероризму на них.

Після ухвалення Кодексу з охорони суден і портових засобів (ОСПЗ) Україна доповнила своє законодавство відповідно до вимог цієї Конвенції. Проаналізуємо основні положення цього Кодексу з точки зору позитивного впливу на підвищення якості

охоронних заходів на судах і об'єктах портової інфраструктури.

Мета Кодексу полягає у такому (рис. 1):

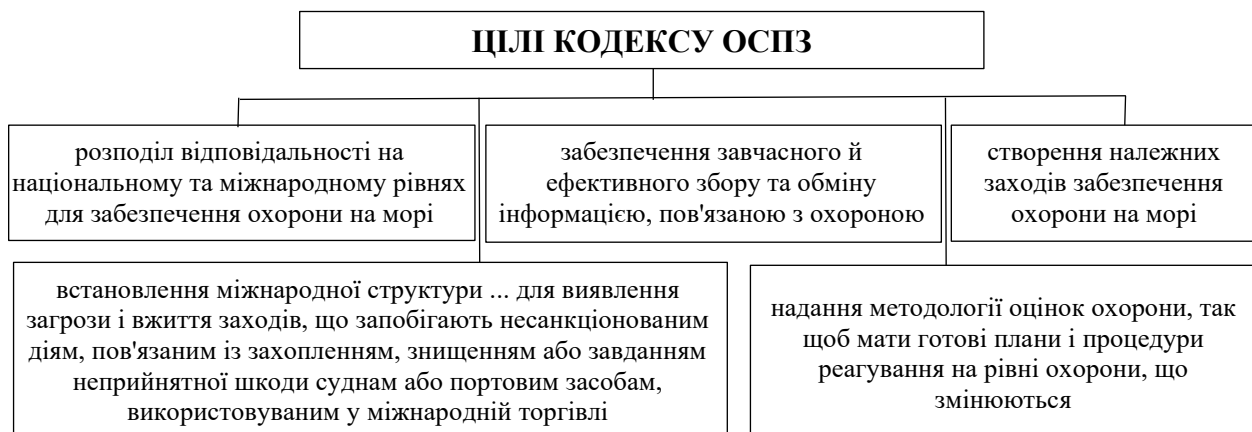


Рисунок 1 – Основні цілі Кодексу з охорони суден і портових засобів

Цілі Кодексу ОСПЗ досягаються виконанням таких функціональних вимог (рис. 2):

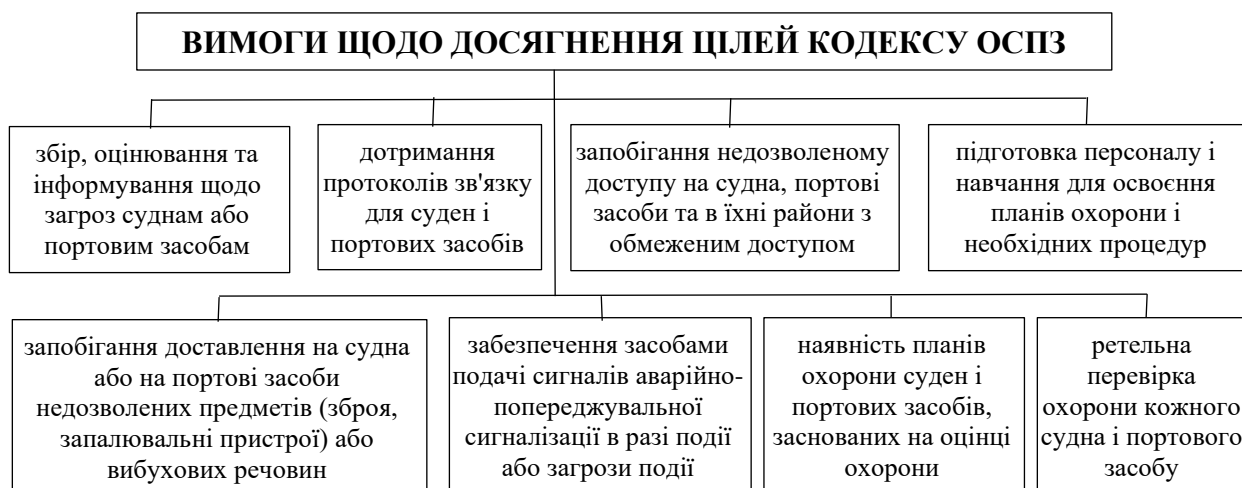


Рисунок 2 – Вимоги щодо досягнення цілей Кодексу ОСПЗ

Задля своєчасної підготовки екіпажу до швидкого та ефективного реагування на можливі акти тероризму та вжиття заходів щодо їх запобігання, з одного боку, та надання рекомендацій капітану, особі командного складу, відповідальній за охорону судна, щодо виконання заходів для різних рівнів охорони, з іншого, на кожному борту є схвалений Адміністрацією План охорони судна.

При підготовці судового плану охорони враховують імовірні ризиковані ситуації, з якими може зіткнутися судовий екіпаж, його здібності і підготовку, можливості встановлення безпечних зон, що охороняються, на судні та наявні на судні засоби спостереження і виявлення.

План містить три рівні охорони (рис. 3):

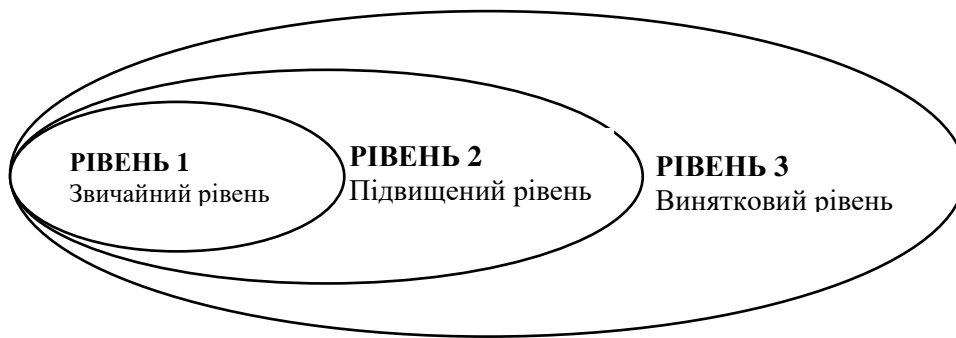


Рисунок 3 – Рівні охорони згідно Кодексу ОСПЗ

На звичайному рівні постійно підтримуються мінімальні заходи щодо забезпечення охорони. На підвищеному рівні приймаються додаткові заходи із забезпечення охорони через підвищений ризик події протягом деякого періоду часу. На винятковому рівні вимагається підтримання подальших особливих заходів із забезпечення охорони в деякому обмеженому проміжку часу, протягом якого подія ймовірна або неминуча.

План охорони судна має певну структуру, яка має дві взаємозалежні складові: обов'язкові та додаткові елементи.

Обов'язковими елементами Плану охорони судна є такі (рис. 4):

ОБОВ'ЯЗКОВІ ЕЛЕМЕНТИ ПЛАНУ ОХОРОНИ СУДНА

1. Організаційна структура охорони судна.
2. Взаємовідносини судна з Компанією, портовими засобами, іншими суднами і відповідною владою, що несуть відповідальність за охорону.
3. Заходи щодо запобігання появі на судні зброї, небезпечних речовин і пристроїв, на перевезення яких немає повноважень і які можуть бути застосовані проти людей або портів.
4. Ділянки обмеженого доступу та заходи щодо запобігання несанкціонованому доступу до них.
5. Заходи щодо запобігання несанкціонованому доступу на судно.
6. Процедури заходів у відповідь у разі загрози події або несанкціонованих дій.
7. Заходи охорони, передбачені для рівня охорони 1, які мають діяти постійно.
8. Заходи охорони, які повинні забезпечувати негайний перехід судна на рівень охорони 2 і, за необхідності, на рівень охорони 3.
9. Процедури виконання будь-яких інструкцій з охорони, які можуть віддавати Договірні уряди за рівня охорони 3.
10. Порядок евакуації у випадках загрози або в разі порушення охорони.
11. Обов'язки і сфера відповідальності всіх залучених до охорони членів екіпажу судна.
12. Процедури аудиторської перевірки діяльності з охорони.
13. Процедури проведення процесу навчання, тренувань і навчань за планом.
14. Процедури періодичного перегляду плану і приведення його на рівень сучасності на підставі досвіду або обставин, що змінилися.
15. Процедури повідомлень про події, пов'язані з несанкціонованими діями.
16. Відомості про особу командного складу, відповідальну за охорону судна.
17. Відомості про посадову особу Компанії з охорони.
18. Процедури проведення перевірки, випробувань, калібрування і технічного обслуговування всього наявного суднового обладнання охорони.
19. Частота проведення випробувань або калібрування будь-якого суднового обладнання охорони.
20. Місця розміщення точок запуску суднової системи оповіщення.
21. Процедури, інструкції та керівництво з використання суднової системи оповіщення, включно з випробуваннями, увімкненням, вимкненням і поверненням у вихідне положення, і з обмеження помилкових сигналів тривоги.

Рисунок 4 – Обов'язкові елементи Плану охорони судна

Крім обов'язкових, План охорони судна може містити додаткові елементи (рис. 5):

ДОДАТКОВІ ЕЛЕМЕНТИ ПЛАНУ ОХОРОНИ СУДНА

1. Необхідні процедури або запобіжні заходи, що гарантують постійне підтримання безперервного зв'язку.
2. Дії з оцінки ефективності процедур охорони та обладнання і систем охорони та виявлення, зокрема процедур виявлення відмови або несправності обладнання та систем і життя контрзаходів.
3. Порядок дій щодо захисту конфіденційної інформації з питань охорони.
4. Відомості про типи обладнання та систем охорони і виявлення.
5. Порядок забезпечення своєчасного подання та розгляду доповідей про можливу наявність незахищених охороною.
6. Порядок складання, ведення і коректури переліку і місця розташування небезпечних вантажів або речовин на борту.

Рисунок 5 – Додаткові елементи Плану охорони судна

План охорони судна є робочим документом, який має відповідати викликам сьогодення та у максимальному ступені забезпечити виконання цілей, які на нього покладаються. Дуже високі очікування від Плану потребують регулярних переглядів (оглядів) і внутрішніх аудиторських перевірок. Вони відбуваються не рідше одного разу на рік. При цьому ці перегляди та перевірки проводяться з такими цілями (рис. 6):

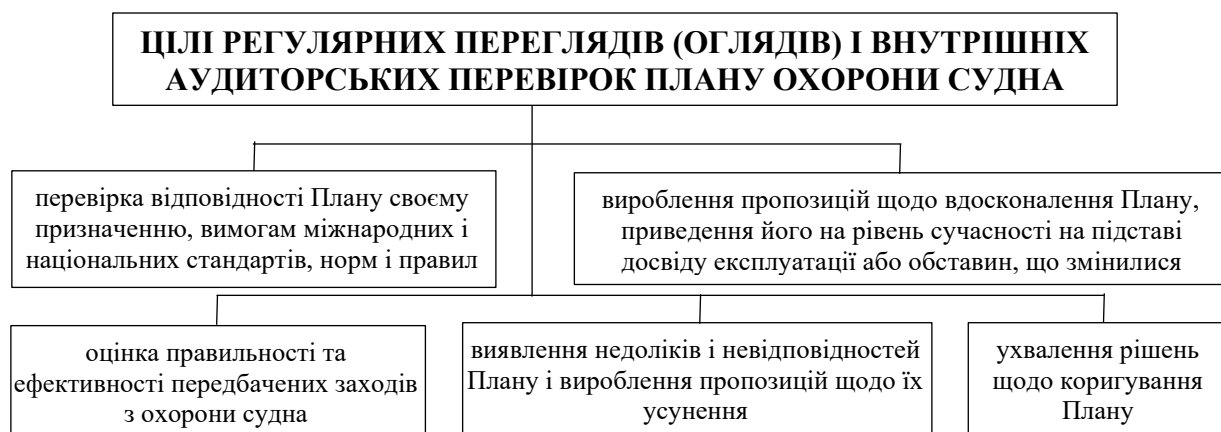


Рисунок 6 – Цілі регулярних переглядів (оглядів) і внутрішніх аудиторських перевірок Плану охорони судна

Говорячи про План охорони судна, не можна обійти боком питання, що стосується повноважень і відповідальності капітана на борту судна. Що стосується ухвалення рішень щодо забезпечення безпеки та охорони судна, то тут капітан має виняткові повноваження. Ніхто, включаючи Компанію, фрахтувальника або будь-яку іншу особу, не можуть обмежити капітана у праві ухвалення на свою відповідальність **будь-яких рішень**, які, за його професійним судженням, необхідні для підтримання належного рівня безпеки та охорони на судні.

Капітан судна несе одноосібну повну відповідальність за безпеку судна. Він може вимагати роз'яснень або змін вказівок, якщо є підстави вважати, що їх виконання може завдати шкоди безпеці судна, незалежно від введеного рівня охорони.

Будучи повністю відповідальним за охорону і безпеку судна, суднового персоналу, вантажу і майна, капітан забезпечує:

а) організацію служби на судні. Її метою є виконання ефективних попереджувальних або адекватних заходів у відповідь у разі загрози події або несанкціонованих дій;

б) розподіл обов'язків, повноважень і відповідальності суднового персоналу, залученого до охорони;

в) регулярний розгляд Плану охорони судна на предмет його відповідності своєму призначенню на основі оцінки охорони судна;

г) планове проведення навчань і тривог з морської безпеки та охорони судна.

Судно як потенційний об'єкт терористичної та піратської загрози передбачає суворі обмеження доступу на нього, реєстрацію та контроль усіх, хто залучається до роботи на судні в порту або на якорі. Крім того, виходити необхідно з того, що проти нас діятиме розумний противник, який може використовувати знання вантажного маніфесту для вибору об'єкта нападу. Тому особливої уваги потребують заходи щодо обмеження доступу до документів з інформацією про вантаж і його розташування на судні. Відповідні заходи контролю передбачено Планом охорони судна. Ці заходи контролю доступу на судно здійснює вахтовий матрос біля трапа судна і вахтовий помічник.

Планом охорони судна мають бути передбачені заходи охорони до всіх засобів доступу на судно: штурмтрапам; посадковим трапам і апарелям; посадковим дверям, бортовим ілюмінаторам, вікнам і лацпортам; швартувальним тросам і якірним ланцюгам; кранам і підйомним пристроям.

Дуже важливим напрямом дій капітана і команди є приведення у відповідність суднової пропускної системи і системи, що застосовується в портовому пропускному засобі. Є чітка заборона допуску в зони обмеженого доступу пасажирів без нагляду.

План охорони судна має містити чіткі заходи, що охоплюють різні рівні охорони (рис. 7).

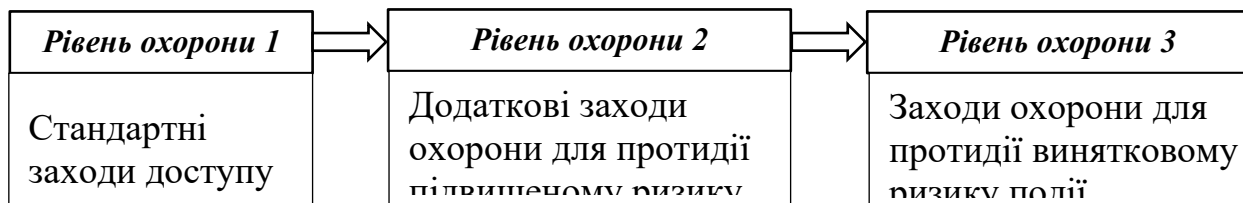


Рисунок 7 – Система нарощування заходів доступу на судно при зростанні рівня охорони

Для рівня охорони 1 Планом охорони судна мають бути визначені заходи з контролю доступу на судно (рис. 8):

ЗАХОДИ З КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ НА СУДНО ДЛЯ РІВНЯ ОХОРОНИ 1

1. Перевірка особи всіх осіб, які бажають пройти на судно, і обґрунтованості їхнього наміру за допомогою перевірки.
2. Забезпечення огорожі ділянок для проведення перевірки та огляду людей, багажу, особистих речей, транспортних засобів та їхнього вмісту (у взаємодії з портовим засобом).
3. Повторюваність огляду до навантаження перевізних засобів, які підлягають завантаженню на призначене для перевезення автомобілів судно (у взаємодії з портовим засобом).
4. Відокремлення осіб, які пройшли перевірку, та їхніх особистих речей від тих, хто ще не пройшов перевірки.
5. Відділення пасажирів, які здійснюють посадку, від пасажирів, які здійснили висадку.
6. Зазначення місць доступу, які мають бути перекриті або охоронятися, для запобігання несанкціонованому доступу.
7. Перекриття доступу на неохоронювані ділянки, що примикають до ділянок, на які мають доступ пасажирів та відвідувачі.
8. Проведення з усім екіпажем судна інструктажів з питань охорони щодо можливих видів загрози, порядку доповідей про підозрілих осіб, об'єкти або дії, а також необхідності проявляти пильність.

Для рівня охорони 2 планом повинні встановлюватися додаткові заходи охорони, що підлягають застосуванню для протидії підвищеному ризику події (рис. 8):

ЗАХОДИ З КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ НА СУДНО ДЛЯ РІВНЯ ОХОРОНИ 2

1. Призначення додаткових людей для обходу ділянок палуби в неробочий час.
2. Обмеження кількості місць доступу на судно, визначення тих місць, які мають бути закриті, і засобів їхнього належного закриття.
3. Вжиття заходів протидії проникненню на судно з боку води.
4. Встановлення зони обмеженого доступу з боку борту, зверненого до берег.
5. Збільшення частоти і ретельності огляду людей, особистих речей і транспортних засобів, що приймаються на судно.
6. Супровід відвідувачів судна.
7. Проведення додаткових, цілеспрямованих інструктажів усього екіпажу, звернених на будь-які виявлені види загрози.
8. Виконання повного або часткового обшуку судна.

Рисунок 9 – Додаткові заходи з контролю доступу на судно для рівня охорони 2

Для рівня охорони 3 у Плані мають бути детально викладені такі заходи (рис. 10):

ЗАХОДИ З КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ НА СУДНО ДЛЯ РІВНЯ ОХОРОНИ 3

1. Зменшення кількості місць доступу до дохідного контрольованого місця.
2. Надання доступу на судно тільки особам, які проводять дії у відповідь; пов'язані з подією або її загрозою.
3. Вказівки людям на борту.
4. Призупинення посадки або висадки.
5. Призупинення вантажних операцій, доставок тощо.
6. Евакуація людей із судна.
7. Перестановка судна.

Рисунок 10 – Заходи з контролю доступу на судно для рівня охорони 3

Разом із порядком допуску на судно для різних рівнів охорони в Плані охорони судна мають бути визначені ділянки обмеженого доступу, що вводяться. План містить вичерпну інформацію про межі цих ділянок, час застосування обмежень, заходи, які мають застосовуватися для контролю доступу на них і для контролю діяльності всередині цих ділянок. Основні цілі введення ділянок обмеженого доступу наведено на рисунку 11.

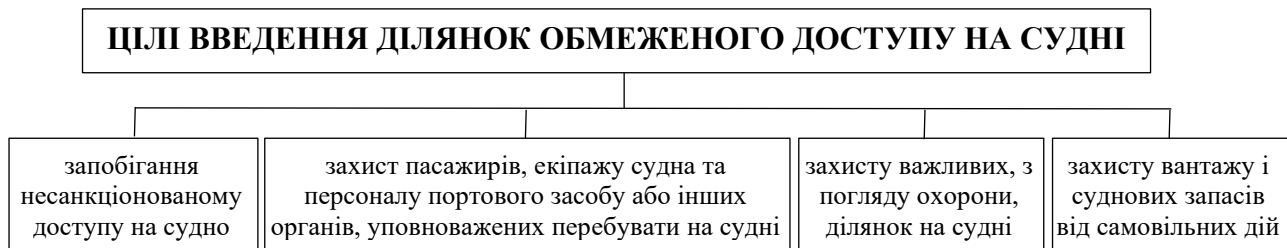


Рисунок 11 – Основні цілі введення ділянок обмеженого доступу на судні

На судні чітко виділені ділянки обмеженого доступу:

- ходовий місток, машинні приміщення та інші пости управління;
- пости управління протипожежним обладнанням і системами;
- приміщення рульової машини;
- приміщення підрулювального пристрою;
- приміщення, де розміщується обладнання та системи охорони і виявлення, а також органи управління ними та системою оповіщення;
- приміщення вентиляційної системи та системи кондиціонування повітря;
- приміщення, звідки є доступ до цистерн з питною водою, насосів або клапанних коробок і трубопроводів;
- приміщення провізійних комор і холодильних установок;
- приміщення, що містять небезпечні вантажі або небезпечні речовини;
- приміщення, де знаходяться вантажні насоси та органи управління ними;
- вантажні приміщення і приміщення для суднових запасів;
- житлові приміщення екіпажу;
- будь-які інші ділянки, куди має бути обмежений доступ з метою підтримання захищеності судна.

На ділянках обмеженого доступу можуть перебувати тільки члени екіпажу. Надаємо вичерпний список осіб, які можуть перебувати на ділянках обмеженого доступу: посадові особи, які несуть вахту в цих приміщеннях; судновий персонал, за яким закріплено завідування цього обладнання або приміщення; обслуговуючий і ремонтний береговий персонал у супроводі вахтового або відповідального за завідування; посадові особи держави порту, які здійснюють контроль системи охорони і мають на те повноваження, у супроводі членів екіпажу.

Несанкціоноване перебування в межах ділянки обмеженого доступу є порушенням режиму охорони, тому на кожному судні розробляються відповідні заходи, що забезпечують обмеження та враховують специфіку судна. Разом з тим можна виділити низку загальних підходів щодо припинення несанкціонованого перебування в межах ділянки обмеженого доступу.

Порти, ілюмінатори та вікна, як можливі шляхи доступу, мають бути надійно закриті. Кришки ілюмінаторів мають бути закриті, а баранці обтягнуті. Внутрішні двері на таких ділянках, що забезпечують безпосередній доступ до ключових місць – містка,

радіорубки, машинного відділення і каюти капітана – мають бути посилені і обладнані спеціальними системами контролю доступу та автоматичною аварійно-попереджувальною сигналізацією. Судна можуть обладнуватися внутрішньою системою телевізійного огляду і запису головних засобів доступу до суднових ділянок обмеженого доступу, коридорів, що ведуть до входів у ключові зони і на місток.

Всі члени екіпажу, які не зайняті важливими зовнішніми обов'язками, в темний час доби повинні перебувати всередині безпечної зони, що охороняється. Цим заходом забезпечується запобігання захоплення окремих членів екіпажу нападниками. Члени екіпажу, які виконують обов'язки поза такою зоною в нічний час, повинні підтримувати постійний зв'язок із містком, а для повернення в безпечну зону в разі нападу повинні використовувати альтернативними шляхи повернення. Члени екіпажу, які побоюються, що не зможуть повернутися в таку зону під час нападу, повинні заздалегідь вибрати місця, де вони тимчасово можуть сховатися.

У межах безпечних зон, що охороняються, мають бути призначені місця збору, де екіпаж може зібратися під час нападу і повідомити на місток своє місцезнаходження.

План охорони судна має містити чіткі заходи, передбачені для ділянок обмеженого доступу (рис. 12).

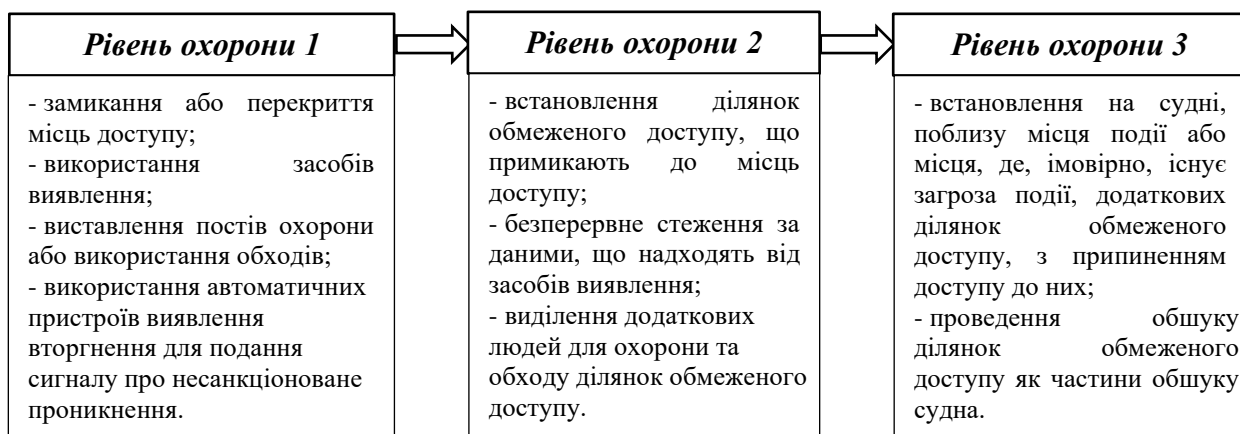


Рисунок 12 – Заходи щодо припинення доступу до ділянок обмеженого доступу при зростанні рівня охорони

Для рівня охорони 2 повторюваність та інтенсивність стеження за ділянками обмеженого доступу збільшується, а Планом охорони судна передбачається застосування додаткових заходів охорони.

Висновки. Події 11 вересня 2001 року змусили багатьох по новому дивитися на проблеми тероризму. Міжнародна морська організація також зробила важливі кроки щодо вироблення єдиних підходів до забезпечення безпеки на морському транспорті. Так, ІМО розробила нові стандарти в галузі морської безпеки, які, зокрема, викладені в Міжнародному кодексі з охорони суден і портових засобів (Кодекс ОСПС), основною метою якого є попередження вчинення можливих терактів.

Даний Кодекс вперше зафіксував поняття "портового засобу", відповідно до положень Кодексу Договірні уряди мають встановлювати рівні охорони об'єктів (пасажирських суден, зокрема й високошвидкісних пасажирських суден; вантажних суден, зокрема й високошвидкісних суден, місткістю 500 і більше; морських пересувних бурових установок; портових засобів, що обслуговують такі судна, які здійснюють міжнародні рейси) та надавати інструкцію з питань захисту від надзвичайних ситуацій, пов'язаних з охороною.

Згідно з введеною класифікацією, більш високі рівні охорони відповідають наявності більшої ймовірності очікуваної події. На встановлення рівня охорони впливають такі чинники: ступінь довіри, обґрунтованості, конкретності (неминучості загрози) інформації про загрозу та потенційні наслідки такої події.

Положення Кодексу вступили в дію з 1 липня 2004 року. Усі судна і порти повинні мати План охорони судна, спеціального офіцера з безпеки. Тому вивчення та систематизація його положень сприятиме якісній підготовці моряків до його однозначного розуміння, підніме рівень морської безпеки до вимог нових міжнародних стандартів, дозволить зберегти багато життів пасажирів та членів екіпажів, вантажі, судна та портову інфраструктуру.

Подальшим напрямом роботи є детальний розбір, аналіз та систематизація основних охоронних заходів щодо спостереження за обробкою вантажу і доставкою судових запасів і постачання, при поводженні з несупроводжуваним багажем, при контролі захищеності судна, при виконанні стандартних робочих процедур за діями у надзвичайних ситуаціях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Международный кодекс по охране судов и портовых средств 2002 г. (Кодекс ОСПС) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ips.ligazakon.net/document/MU02257> (дата обращения 09.01.2023).
2. Балобанов А.О. Терроризм и безопасность морского судоходства. / А.О. Балобанов. Актуальні проблеми держави і права. 2000. Вип. 8: Соціальні та правові проблеми боротьби з тероризмом. С. 83–86.
3. Кримінальний кодекс України: станом на 12 січня 2021 р. Харків : Право, 2021.
4. Хавронюк М. І. Тероризм // Велика українська енциклопедія. URL: <https://vue.gov.ua/Тероризм> (дата звернення: 9.01.2023)].
5. Стефанчишен Р.В. Тероризм на морі (концептуально-правовий аналіз) / Р.В. Стефанчишен. Науковий вісник публічного та приватного права. – Випуск 3-2, 2020. – С. 208-213. – DOI <https://doi.org/10.32844/2618-1258.2020.3-2.36>
6. Канцір В. С. Тероризм у сучасному глобалізаційному просторі : філософсько-правовий вимір. Львів : Край, 2011. 560 с.

Trofymentko I.V., Bazhak O.V., Ivanenko V.M., Riashchenko O.I.

THE SHIP AND PORT FACILITY SECURITY CODE AS A METHODOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING THE QUALITY OF SECURITY MEASURES ON SHIPS AND PORT FACILITIES

The purpose of the article is to systematize the main provisions of the Ship and Port Facility Security Code of the complex of security measures on ships and in ports to counter terrorism and piracy at sea, regarding the objectives, requirements for achieving the objectives of the Code, levels of security, structure of the Ship Security Plan, objectives of regular reviews (reviews) and internal audits of the Plan, measures to control access to the ship for different levels of security, objectives and measures to deny access to restricted areas. This goal is achieved by analysing the sources of information and identifying the goals and requirements for achieving the objectives of the Ship and Port Facility Security Code. The description of the security levels on the ship in accordance with the Code is given. The structure of the ship security plan is given,

the interdependence of mandatory and additional elements is shown. The detailed content of the measures included in the mandatory and additional components is disclosed. The purpose, regularity and objectives of reviews (surveys) and internal audits of the Plan are emphasized. The role, authority and responsibility of the master of the vessel to ensure the safety and security of the vessel are shown. Measures to control access to the ship for different levels of security are defined. The purposes of introducing restricted areas on the vessel and measures to terminate access to restricted areas as the security level increases are emphasized. The most significant result is the systematization of some of the main provisions of the Code and the visibility of their presentation. The further direction of the work is a detailed analysis, analysis and systematization of the main security measures to monitor the handling of cargo and delivery of ship's supplies and supplies, the handling of unaccompanied baggage, the control of ship security, the implementation of standard operating procedures for emergency situations.

Keywords: *piracy, maritime terrorism, ship security, security measure, ship and port facilities security, security level, access control to the ship, restricted areas.*

Голікова В.В., Крайнова В.І., Парменова Д.Г., Сінюта К.О.

ОСОБЛИВОСТІ ЕРГОНОМІКИ РОБОЧОГО МІСЦЯ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Сучасне морське транспортне або пасажирське судно є інженерною спорудою, яка експлуатується у різноманітних, нерідко надзвичайних, умовах Світового океану. Воно водночас представляє виробничо-комунальний об'єкт, який характеризується єдністю зон праці і відпочинку, а також цілодобовим безперервним перебуванням моряка під дією динамічного комплексу природних, виробничих та побутових факторів, параметри яких досягають екстремальних величин. Важливою особливістю виробничої діяльності судових операторів є робота з візуальними дисплейними терміналами, де відбиваються основні параметри навігаційної обстановки, стану автоматизованих судових систем і механізмів, а також їх зміни в різних умовах плавання. Саме на основі аналізу оперативної інформації вахтовий штурман і механік здійснюють оцінку обстановки і застосовують адекватні управляючі дії. Оволодіння професією судового оператора передбачає, поряд з отриманням теоретичних знань, відпрацювання та закріплення професійно важливих навичок та умінь на тренажерах різного ступеня складності.

Ключові слова: тренажери, візуальні дисплейні термінали, професійна підготовка, курсанти, моряки, умови праці.

1. Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. В сучасних умовах до фахівців морської транспортної галузі високі вимоги, які витікають з положень Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року та Кодексу з підготовки і дипломування моряків та несення вахти [1]. Кожен з них повинен мати не тільки необхідний обсяг загальних та спеціальних знань, умінь і навичок (тобто бути компетентним спеціалістом), але, згідно Резолюціям ММО № 890 [2] і № 955 [3], характеризуватись високим потенціалом психосоматичного здоров'я, певними фізичними, позитивними індивідуально-особистими якостями, які забезпечують високу професійну та психофізіологічну готовність до операторської діяльності у складі судового екіпажу. Важливою особливістю виробничої діяльності судових операторів є розумова праця, під час якої 90% інформації надходить через зорову систему людини, тому ефективність діяльності істотно залежить як від якості функціонування цієї системи, так і від виду та способу надання візуальної інформації. Останніми роками з'явилася велика кількість нових носіїв візуальної інформації, якість і способи формування зображень якими значно відрізняються від звичних паперових носіїв. Особливостями сучасної операторської праці – діяльність оператора щодо керування технологічними процесами здійснюється в умовах необхідності перероблення інформації, інтенсивність надходження якої нерідко перевищує індивідуальні фізіологічні можливості людини, обумовлені генетично детермінованою психоархітектонікою мозку [4].

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями формування надійності судових операторів приділяли увагу Шафран Л.М., Мальцев А.С., Голікова В.В., Парменова Д.Г., Крайнова В.І. та багато інших авторів [4-14].

3. Мета дослідження полягає в проведенні порівняння особливостей обладнання на робочих місцях суднових операторів і на повномасштабних тренажерах та проаналізувати дії умов праці при роботі з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ).

4. Основні результати дослідження. Важливою особливістю виробничої діяльності суднових операторів є робота з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) і на різній складності тренажерах, що відбивають основні параметри навігаційної обстановки, стану автоматизованих суднових систем і механізмів, а також їх зміни в різних умовах плавання. Саме на основі аналізу оперативної інформації вахтовий штурман і механік здійснюють оцінку обстановки і застосовують адекватні управляючі дії. З урахуванням ролі автоматизованих комплексів, ступеня комп'ютеризації суден, а також вимог Конвенції ПДНВ, придбанню навичок роботи за ВДТ та з автоматизованими системами в ході спеціальної підготовки курсантів приділяється багато уваги.

Специфічним видом професійної підготовки майбутнього судового оператора є заняття на повномасштабних тренажерах. Нажаль, багато гігієнічних, ергономічних і психофізіологічних аспектів проблеми залишаються вивченими недостатньо, що й увійшло в одне із завдань нашого дослідження.

Саме здобуті на тренажерах навички дозволяють згодом використовувати набуті під час тренінгу стереотипи безпосередньо на судах при проходженні виробничої практики. Співставлення існуючої в пам'яті оператора матриці конкретної операції (маневру, ситуації) зі змістом нової задачі в плаванні дозволяє змінювати структуру алгоритму і диференціювати навігаційні ситуації за ступенем складності на такі, що вирішуються самостійно. Дефіцит часу в подібних ситуаціях потребує відпрацювання типових ситуацій до автоматизму, що значно полегшується завдяки алгоритмізації всіх основних операцій з управління судном.

Оскільки професійні навички мають в своїй основі систему умовно-рефлекторних реакцій, одною з його важливих особливостей є угасання. Саме тому первинна тренажерна підготовка майбутніх суднових операторів здійснюється за розробленими у відповідності до вимог ІМО програмами на протязі всіх шести років навчання у морському вищому навчальному закладі. В подальшому через кожні 5 років праці, а також в разі переходу на нову посаду, судові оператори проходять тренажерну підготовку в порядку підвищення кваліфікації і спеціального тренінгового курсу.

Повномасштабні тренажери, що відтворюють ЦПУ судна, дозволяють проводити ознайомлення курсантів всіх курсів з принциповими схемами роботи двигуна і безпечного управління головною енергетичною установкою та допоміжними механізмами, а також здійснювати оглядові, групові та індивідуальні цикли тренувальних занять, де доводяться до автоматизму всі дії судового оператора у найбільш типових варіантах несіння ходової вахти, відпрацьовуються навички щодо виконання технічної діагностики і оптимізації режимів роботи СЕУ.

Всі можливі нестандартні та надзвичайні ситуації відпрацьовуються кожним курсантом окремо. Оскільки у таких ситуаціях в управляючих діях беруть участь не менш двох спеціалістів (вахтовий механік і моторист), в останньому випадку індивідуальний підхід здійснюється методом зміни рольових функцій.

Проведений нами ергономічний аналіз робочих місць курсантів на повномасштабних тренажерах і професіограм цього виду навчально-виробничої діяльності показали, що переважна більшість операцій, які відпрацьовуються під час тренінгу, складається з стереотипних сенсомоторних реакцій з вираженим інтелектуальним компонентом (робота за заданим алгоритмом). Джерелами інформації являються вербальні сигнали, а також індикатори, маніпулятори, шкали приладів та засоби управління, чисельність яких досягає 100 одиниць (табл. 1).

Таблиця 1- Засоби відображення інформації та маніпулятори на робочих місцях судових операторів і на повномасштабних тренажерах

Група приладів	Види приладів	Кількість приладів			
		ходовий місток		ЦПУ	
		Судно	Тренажер	судно	Тренажер
Засоби відображення інформації	Монітори	2-3	2	1	1
	Світлові індикатори	22-37	26	75-94	34
	Шкали приладів	14-22	7	39-51	16
	Цифрові лічильники	5-7	2	3-5	3
	Джерела звукової інформації	5-7	4	3-4	2
Всього, (M±m)		63,4 ± 5,1	41	137,3 ± 8,1	56
Органи управління	Регулятори	16-27	26	5-7	3
	Ричаги	3-5	2	-	2
	Наборні панелі	1-5	2	1	1
	Кнопки	28-46	26	86-112	24
	Тумблери	22-35	18	39-44	11
	Перемикачі	16-24	8	45-63	18
	Мікрофони	2-3	1	-	1
	Штурвал	1	1	-	-
	Машин. Телеграф	1	1	1	1
Всього, (M±m)		94,6 ± 7,2	74	198,3 ± 13,2	61
Підсумок, (M±m)		157,5 ± 9,4	115	341,7 ± 19,3	117

Кількісні характеристики засобів відображення інформації і органів управління тренажерів співпадають з реальними аналогами, якими користується судовий оператор (штурман або механік) на своєму робочому місці.

З представлених в табл. 1 даних також видно, що велика кількість засобів відображення інформації потребує постійного контролю за показниками, більшість яких змінюється за часом або оперативно викликається у діалоговому режимі. Поточний аналіз даних потребує мобілізації аналізаторних та вищих психічних функцій навіть при обіговому режимі відсліджування основних параметрів (при $i=1$, $t=5$ min оператор судоводій повинен концентрувати увагу 3000 разів за 4-х годинну вахту на ходовому містку, а судномеханік – 6500 разів за таку ж вахту в ЦПУ).

Серед факторів, що можуть негативно впливати на здоров'я та процес розвитку курсантів в процесі навчання, було виділено роботу за візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) колективного користування, а також з портативними персональними комп'ютерами індивідуального користування (ноут-буками). Це пояснюється результатами проведених обстежень та опитування курсантів, які показали, що вони проводять за ВДТ до 25%-50% часу практичних занять, а курсанти-судноводії у тренажерних центрах - до 60% учбового часу. Більшість моніторів, за якими працюють курсанти, мають стандартні розміри 17-19", монітори ноут-буків мають розміри 15-17", а окремі ВДТ у тренажерних центрах та на судах підчас плавпрактики - перевищують 22".

За результатами опитування курсантів і студентів застосування персональних комп'ютерів у навчальному процесі суттєво полегшує та сприяє прискоренню вирішення учбових завдань ($91,7\% \pm 2,5\%$ і $91,9\% \pm 3,2\%$, відповідно). Щодо гігієнічних вимог при роботі з ВДТ, то хоча 62,4% проводять за ПК більш ніж 4 і навіть 6-10 годин на добу, не дотримуються навіть елементарних правил більш ніж у 47,2% $\pm 2,2\%$ випадків. Викладачі на практичних заняттях на цей аспект роботи теж не звертають уваги, виходячи з концепції про стовідсоткове освоєння ПК в школі. Тому існує задача щодо необхідності впровадження в цей процес психогігієнічних заходів.

Слід зазначити, та нагадати що при роботі з ВДТ на працівників діють несприятливі виробничі чинники різної природи – переважно психофізіологічні та фізичні. Хімічні та біологічні мають менше значення з позицій гігієни праці. Виробничі чинники, пов'язані з роботою ВДТ:

Психофізіологічні: напруження органу зору – спостереження за екранами, світловими датчиками, малі розміри об'єкта розрізнення, велика частота переведення погляду з монітора на клавіатуру, паперовий документ, що вводиться; нервові напруження – введення та редагування тексту, робота з графічними зображеннями; нервово-емоційне напруження – необхідність прийняття рішень, відповідальність, творча діяльність, інформаційне навантаження, нестабільна робота комп'ютера та деяких програм; гіподинамія; вимушена робоча поза; напруження окремих груп м'язів передпліччя, кистей та пальців рук – виконання дрібних стереотипних рухів (уведення та редагування тексту, редагування зображень); монотонність праці.

Фізичні: змінні електромагнітні поля – рентгенівське, ультрафіолетове, оптичне, інфрачервоне, радіочастотне випромінювання; електростатичні поля; нераціональне освітлення – недостатня чи (та) нерівномірна освітленість, відбита блискість, несприятливий розподіл яскравості в полі зору; шум – робота принтерів (переважно матричних та струменевих, сканерів, дисководів, систем охолодження); зміна іонного складу повітря – зменшення концентрації негативних іонів і збільшення позитивних; вібрація – робота матричних та струменевих принтерів; пил паперу, тонера – друк на лазерних принтерах на низькосортному папері.

Хімічні: леткі хімічні речовини, що виділяються в повітря робочої зони з полімерів та пластмас, з яких виготовлений комп'ютер та інші периферичні пристрої: діоксин, фуран, поліхромовані біфеніли тощо (робота моніторів, лазерних принтерів, процесорів, відеокарт характеризується виділенням тепла, що підвищує вихід летких речовин в повітря робочої зони); озон – робота деяких моделей моніторів та лазерних принтерів; хлорвмісні сполуки використання для друку на лазерних принтерах паперу, що відбілений хлором; компоненти чорнила, тонерів – друк на струменевих та лазерних принтерах.

Біологічні: деякі види патогенних мікроорганізмів, що передаються контактним шляхом – можливо при роботі з клавіатурою та мишею декількох осіб.

В цілому проведенні дослідження показують, що у морських ВНЗ існують всі необхідні передумови щодо гігієнічного та матеріально-технічного забезпечення

навчального процесу для забезпечення високого рівня розвитку професійно важливих якостей і формування майбутніх фахівців морського флоту. Вони дозволяють зробити ряд закономірних висновки.

5. Висновки: Важливим елементом навчального процесу є робота курсантів в відео-дисплейними терміналами (комп'ютери, тренажери), нерідко до 10 і більше годин на добу, що потребує чіткого виконання правил гігієни і охорони праці операторів. Проте, як свідчать результати анкетування, а також вибіркові спостереження в тренажерному центрі, 47,2%±2,2% курсантів недостатньо ознайомлені з такими вимогами, що вимагає проведення спеціальної підготовки для профілактики негативних психосоматичних зрушень і підвищення продуктивності цього важливого елементу навчально-виробничої підготовки. На нових суднах виконання практично всіх типових виробничих операцій здійснюється судовими системами в автоматичному режимі, залишаючи за оператором функції спостереження і контролю, тоді як прийняття управлінських рішень стає необхідним в основному у нестандартних та надзвичайних ситуаціях .

Постійне робоче місце судового оператора обладнано великої кількістю візуально-дисплейними терміналами, які не тільки несуть корисну інформацію, ще мають негативний вплив на організм працюючого.

ЛІТЕРАТУРА

1. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року (консолідований текст з манільського поправками). Кодекс з підготовки і дипломування моряків та несення вахти, з поправками. - К .: ВПК «Експрес Поліграф», 2012. - 568 с.
2. ІМО .Principles of minimum safe manning (resolution A.1047(27)), adopted in 2011.
3. ІМО. Resolution A. 955 (23). Amendments To The Principles Of Safe Manning (Resolution A.890 (21)), Adopted on 5 December 2003.
4. Голікова В.В. Гігієнічні аспекти стомлення зорового аналізатора у судових операторів / В.В. Голікова, В.І. Крайнова// Матеріали науково-технічної конференції "Морський та річковий флот: експлуатація та ремонт»,25.03.2021-26.03.2021–Одеса: НУ « ОМА» -2021- С.185-188.
5. Мальцев А.С. Динамика психофизиологических функций у курсантов и судоводителей при решении задач судовождения на радиолокационном тренажере /А.С. Мальцев, В.В. Голікова В.В.// Актуальные проблемы транспортной медицины, 2007. - № 1 (7). - С. 20-26.
6. Парменова Д.Г. Особливості підготовки судових механіків у сучасних умовах / Д.Г. Парменова, С.А. Бондар//Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт» 25.03.2021 – 26.03.2021- Одеса: НУ "ОМА"-2021- С.181-1857.
- 7.Голікова В.В. Вплив психоемоційного стресу на імунологічну реактивність організму судового оператора / В.В.Голікова// Актуальные проблемы транспортной медицины. – Одеса. -2016. – №2(44) – С. 7-18.
- 8.Burak Zincirli, Caglar Dere1, Cengiz Deniz1. Scenario Based Assessment Method for Engine Room Simulator Courses: The 13th International Conference on Engine Room Simulators, 20 – 21 September, Odessa: National University “Odessa Maritime Academy”, 2017: 165 – 171.
9. Голікова В.В. Формирование здоровьесберегающих компетенций- важная задача профессиональной подготовки судовых операторов / В.В.Голікова// Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – Вип.37. – Одеса: НУ «ОМА», 2017. – С.39-50.

10. Golikova V. V. Professional competence of ship's operators as chemical safety predictor in the maritime- dangerous goods transport /V.V. Golikova, L.M.Shafran // Актуальные проблемы транспортной медицины. – Одесса -2018. – №3(53) – С. 7-19 с.
11. Vasilios D. Tsoukalas, Dimitrios A. Parachristos, Nikolaos K. Tsoumas and Elisabeth C. Mattheu. Marine Engineers' Training: Educational Assessment for an Engine Room Simulator. Athens, Athens Merchant Marine Academy, Technological Educational Institute of Piraeus. WMU Journal of Maritime Affairs. 2008; Vol. 7, № 2: 429 – 448.
12. Golikova. The new paradigm of the professional health competence formation in the maritime cadets/ L. Shafran, V. Golikova, J. Chumaeva//15th International Symposium on Maritime Health –Hamburg-12-15 June 2019.
13. Kumar, Surender & Anand, Neeraj. (2015). Simulator training and its effects on knowledge and skill levels of seafarers after training. Journal of Global Research Computer Science and Technology. Vol. III. URL: https://www.researchgate.net/publication/303524569_Simulator_training_and_its_effects_on_knowledge_and_skill_levels_of_seafarers_after_training
14. Stefan Kluj. The Environmental Awareness in the Engine Room Simulator Training: The 13th International Conference on Engine Room Simulators. – Odessa, September, 20 – 21, National University “Odessa Maritime Academy”, 2017: 35 – 38.

Golikova V. V., Krainova V. V., Onishchenko O. A.

FEATURES OF WORKPLACE ERGONOMICS OF FUTURE WATER TRANSPORT SPECIALISTS

A modern marine transport or passenger ship is an engineering structure that is operated in various, often extraordinary, conditions of the World Ocean. At the same time, it represents an industrial and communal facility, which is characterized by the unity of work and rest zones, as well as the 24-hour continuous stay of a sailor under the influence of a dynamic complex of natural, industrial and household factors, the parameters of which reach extreme values. An important feature of the production activity of ship operators is work with visual display terminals, which reflect the main parameters of the navigation situation, the state of automated ship systems and mechanisms, as well as their changes in various sailing conditions. It is on the basis of the analysis of operational information that the watch navigator and mechanic assess the situation and apply adequate management actions. Mastering the profession of a ship operator involves, along with acquiring theoretical knowledge, practicing and consolidating professionally important skills and abilities on simulators of varying degrees of complexity.

Keywords: simulators, visual display terminals, professional training, cadets, sailors, working conditions.

Коскіна Ю.О.

ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ «ФРАХТУВАННЯ» БАКАЛАВРАМ З ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ (НА МОРСЬКОМУ ТА РІЧКОВОМУ ТРАНСПОРТІ)

У статті визначено місце фахової дисципліни «Фрахтування» у освітньо-професійній програмі «Організація перевезень та управління на транспорті», розробленій у рамках спеціальності 275 Транспортні технології, яка реалізується у Науково-навчальному інституті морського бізнесу Одеського національного морського університету. Встановлено взаємні зв'язки із дисциплінами, які мають бути попередньо вивчені як такі, окремі знання за якими формують базу для вивчення дисципліни «Фрахтування». Наведено загальні та професійні компетентності, яких мають набути майбутні бакалаври з транспортних технологій, а також очікувані результати навчання. Їх сформовано із врахуванням специфіки сфери трампового судноплавства, на яку і орієнтовано дисципліну. Подано загальні відомості щодо обсягу та змісту дисципліни із їх поділом на частини відповідно до видів і сутності фрахтування суден. Вказано методи та форми реалізації освітнього процесу, які базуються на традиційних лекційних та практичних заняттях, але із використанням широкої документальної бази – реальних договорів фрахтування суден, «читати» які студенти мають навчитися. При виконанні ситуативних завдань, передбачених відповідними навчальною і робочою програмами, заохочується ухвалення студентами самостійних рішень із обґрунтуванням власної думки та коментарями отриманих результатів. Ситуативне завдання полягає в обґрунтуванні найбільш прийняттого для судновласника варіанту відфрахтування судна на рейс та передбачає виконання необхідних розрахунків експлуатаційних та економічних показників. Вивчення дисципліни потребує значних знань англійської мови, яку під час занять студенти мають можливість поглибити та розширити за рахунок вживання термінів, які використовуються у фрахтовому бізнесі, а також вдосконалити навички ділового листування англійською мовою.

Ключові слова: *бакалавр, фрахтування, трампове судноплавство, транспортні технології, компетентності.*

Вступ. Компетентнісний підхід, на якому ґрунтується сучасна вища освіта в Україні, висуває певні вимоги до організації та реалізації освітнього процесу у вищих навчальних закладах, що мають бути враховані викладачами дисциплін загальної та професійної підготовки. Формування необхідних для подальшої роботи за фахом переліку отриманих знань та навичок вимагає чіткого розуміння місця та ролі кожної дисципліни в освітній програмі, її взаємного зв'язку із іншими дисциплінами. Адже лише за такого підходу можливою є розробка змістовного наповнення дисципліни матеріалом, вивчення якого дозволить студенту стати саме «компетентним» - надасть можливість використовувати певні професійні знання та навички для вирішення конкретних виробничих завдань і проблем.

Освіта у галузі транспорту, як наразі і освіта у будь-якій іншій галузі знань, має відповідати вимогам та потребам ринку праці. Тож освітній процес має реалізовуватися на

високому рівні, який забезпечуватимете набуття необхідних навичок, знань та вмінь, необхідних та достатніх для початку професійної діяльності здобувачів вищої освіти, на підставі яких можливим є подальше їх удосконалення, а відтак – і професійне зростання. «Транспортні» спеціальності характеризуються практичною спрямованістю, мають доволі сильну прикладну специфіку, яка наразі є різною для різних видів транспорту. Розробка освітньо-професійних програм (ОПП) для цих спеціальностей має ґрунтуватися на чіткому взаємозв'язку професійних дисциплін, логічній послідовності у їх вивченні, а зміст кожної дисципліни має бути взаємопов'язаним зі змістом дисциплін, що вивчаються у попередніх та наступних семестрах, за умови відсутності дублювання матеріалу.

Аналіз літератури. Сутність компетентнісного підходу як технології навчання останнім часом, враховуючи вимоги сучасності та основні тенденції в освіті, доволі детально викладений у працях вітчизняних [1-5] та іноземних авторів [6-11]. Втім, названі публікації надають лише загальні відомості, наголошують на необхідності впровадження такого підходу, аналізують його переваги у навчанні на різних рівнях освіти. Освіта в нашій країні є сферою, яка у певному сенсі регулюється державою, зокрема – у вигляді затверджених стандартів вищої освіти. Як і для будь-яких інших галузей знань, стандарт спеціальності «Транспортні технології» [12], відповідно до [13], окрім іншого, встановлює нормативний зміст підготовки здобувачів вищої освіти, сформульований у термінах результатів навчання. При розробці освітніх програм вищій навчальний заклад, відповідно до Закону України «Про вищу освіту», самостійно визначає перелік та зміст компетентностей, яких має набути здобувач вищої освіти. Саме ними і формується фахове «ядро» підготовки і саме у них відображується специфіка кожного виду транспорту [14-17]. Слід зазначити, що саме специфічні дисципліни, які становлять «ядро» кожної ОПП, формують ті навички та знання, які стануть у нагоді здобувачам вищої освіти при їх роботі за фахом. Тож саме на них – їх особливостях, взаємозв'язках із іншими дисциплінами, підходах до викладання має бути зосереджено увагу викладачів. Разом із тим, місцю та ролі фахових дисциплін у конкретних ОПП приділено незначну увагу – так, лише [18] декларує місце та форми викладання фахової дисципліни (пов'язаної із технологією перевезення вантажів морськими суднами) у процесі підготовки бакалаврів, однак – безвідносно до компетентностей та результатів навчання відповідно до ОПП «Організація перевезень та управління на транспорті».

За мету цієї статті поставлено визначення місця та ролі, форм та методів викладання дисципліни «Фрахтування», яку включено до ОПП «Організація перевезень та управління на транспорті» Науково-навчального інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету.

Основний матеріал. Дисципліна «Фрахтування» є однією з навчальних дисциплін ОПП «Організація перевезень та управління на транспорті», у якій вона відноситься до циклу дисциплін професійної підготовки за профілем ОПП [17]. Дисципліну закріплено для викладання на кафедрі «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень», що є цілком доречним, адже предметна галузь дисципліни полягає саме у сфері комерційної експлуатації торговельного флоту, охоплюючи зокрема трампове судноплавство. Обсяг дисципліни становить 4 кредити ECTS із іспитом як формою підсумкового контролю.

Вивчення дисципліни «Фрахтування» сприяє здобуттю та розвитку у студентів компетентностей, яких потребує подальша їх робота у сфері трампового судноплавства та фрахтового бізнесу. Їх умовно можна поділити на такі, що носять узагальнений характер, пов'язані зі спеціальністю загалом, та такі, що враховують специфіку фрахтових операцій із торговельними суднами. Матеріал дисципліни сприяє поглибленому розумінню сфери майбутньої професійної діяльності, зокрема – експлуатації суден у трамповому судноплавстві та організації перевезень зовнішньоторговельних масових вантажів.

Трампове судноплавство – характер роботи суден, вантажна база, власне судна, які використовуються за цієї організаційної форми, практика укладання угод – характеризується суттєвими відмінностями від лінійного судноплавства, що забезпечує дисципліні «Фрахтування» власну нішу у ОПП, а компетенції, які формуються у результаті вивчення дисципліни, відрізняються від тих, що їх набувають студенти під час вивчення дисциплін з організації роботи лінійного судноплавства. Перелік компетентностей та логічний їх взаємний зв'язок подано на рис. 1.



Рисунок 1 – Компетентності, які забезпечує вивчення дисципліни «Фрахтування»

Основний результат вивчення дисципліни «Фрахтування» відображено у ОПП [17]: «організувати операції з фрахтування суден», який наразі поточнюється та деталізується як можливість відповідати, пояснювати, розуміти пояснення, вести дискусію, звітувати,

листуватися іноземною мовою із використанням фрахтової термінології на достатньому для професійної діяльності рівні; організовувати та контролювати експлуатацію суден у різних видах фрахтування як складову частину експлуатації флоту судноплавного підприємства; організовувати та управляти перевезеннями вантажів у міжнародному сполученні із використанням морського транспорту; обирати транспортні засоби (судна); контролювати хід виконання перевезення; виконувати розрахунки експлуатаційних та економічних показників відфрахтування суден у різних видах фрахтування, аналізувати їх величини, виявляти зовнішні (ринкові) та внутрішні (договірні умови) чинники, які впливають на них; здійснювати порівняння отриманих величин показників та робити висновки щодо доцільності експлуатації суден у різних видах фрахтування; порівнювати пропозиції щодо відфрахтування суден на рейсових умовах під перевезення вантажів розрахунковим шляхом; розробляти пропозиції щодо можливих змін формулювань умов договору фрахтування з метою підвищення ефективності фрахтової операції; вести перемовини (як усні, так і письмові) щодо укладання угоди з фрахтування суден, представляючи інтереси однієї із сторін; складати RECAP та оформлювати чартер-партію; надавати коментарі у частині правової відповідальності та економічної ефективності фрахтової операції; розуміти принципний порядок формування та функціонування фрахтового ринку, знати чинники, які впливають на його динаміку та стан, аналізувати вплив дій судновласників і вантажовласників на кон'юнктуру фрахтового ринку.

Дисципліна «Фрахтування» викладається на останньому році навчання за рівнем освіти «бакалавр», що є обґрунтованою необхідністю – адже як відповідна сфера практичної діяльності, пов'язана із залученням суден, що працюють у трамповому судноплаванні, вона акумулює у собі знання та навички, які мають отримати студенти, вивчаючи фахові дисципліни попередніх років навчання. Працюючи у сфері фрахтового бізнесу, фахівець має розумітися на особливостях конструкції суден торговельного флоту та їх основних техніко-експлуатаційних характеристиках; мати чітке уявлення щодо організації вантажних перевезень у міжнародному сполученні; володіти знаннями щодо організації транспортних процесів та особливостей функціонування транспортних систем, пов'язаних із доставкою масових вантажів; добре орієнтуватися у специфіці організації роботи суміжних із морським перевезенням установ, організацій та підприємств; розумітися на транспортних характеристиках вантажів та технологічних особливостях їх перевезення суднами. Поза обговоренням залишається англійська мова – це є само по собі зрозумілим, адже фрахтовий бізнес використовує саме англійську як основну мову спілкування. Не ставлячи за мету поєднати усі дисципліни ОПП, на рис. 2 проілюстровано зв'язок дисципліни «Фрахтування» із іншими дисциплінами, знання за якими у певному сенсі та у певній своїй частині є базовими для розуміння предметної сфери дисципліни «Фрахтування».

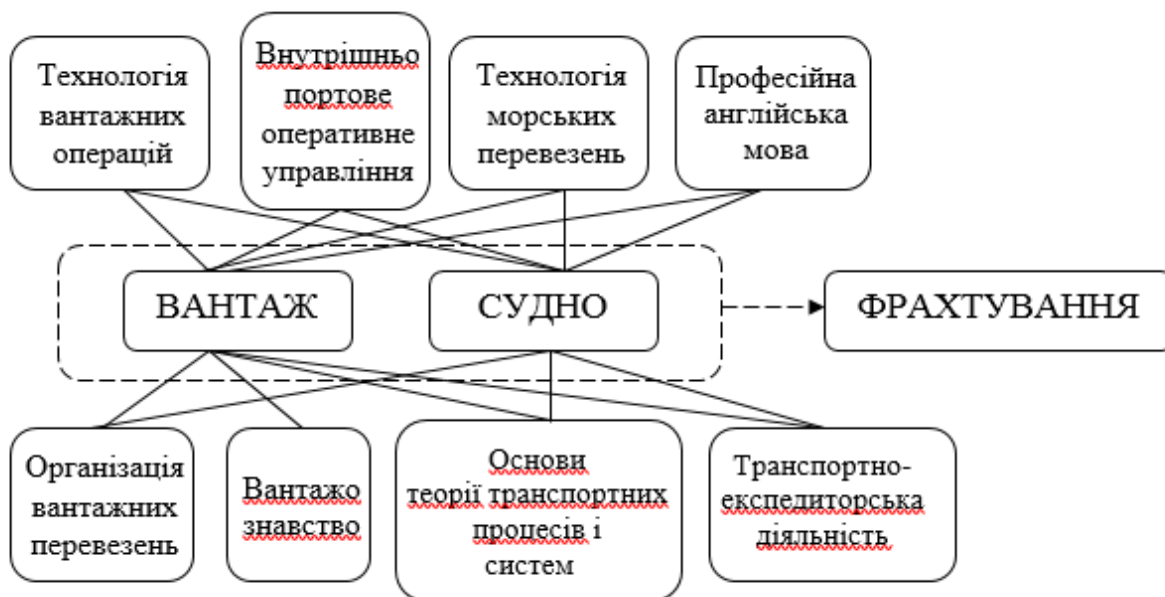


Рисунок 2 - Взаємозв'язок дисципліни «Фрахтування» із дисциплінами ОПП, які мають бути вивчені на попередніх курсах навчання

Характерним є те, що більшість дисциплін, знання та навички за якими є у певному сенсі підґрунтям для вивчення дисципліни «Фрахтування», відносяться до циклу дисциплін професійної підготовки. Саме на них базується «Фрахтування», що підкреслює специфічність дисципліни. Незважаючи на стійкий зв'язок із іншими дисциплінами ОПП, дисципліна «Фрахтування» є необхідною для фахівців саме у галузі морського транспорту, оскільки присвячена вивченню трампового судноплавства – проблематика організації залучення суден для перевезень вантажів (масових зокрема, оскільки саме вони формують вантажну базу роботи для трампових суден) розглядається з позицій обох сторін, що залучаються (судновласника і фрахтувальника).

Змістовно дисципліну поділено на дві частини відповідно до двох основних видів фрахтування суден – рейсове і на час; певна частина навчального часу приділяється особливостям укладання різновидів угод у межах названих видів. Окремий розділ дисципліни розглядає суто практичну частину фрахтового бізнесу – підготовка та реалізація фрахтової угоди. При цьому вступна частина дисципліни «Фрахтування» присвячена підґрунню фрахтових операцій – огляду практики реалізації зовнішньоторговельних договорів купівлі-продажу товарів у частині їх транспортних умов. Такий підхід вдається цілком логічним, адже перевезення вантажів (як у трамповому, так, до речі, і у лінійному судноплавстві) так чи інакше є логічним наслідком факту укладання торговельної угоди.

Формами подання матеріалу, що застосовуються, є традиційні для вітчизняних закладів вищої освіти лекції із закріпленням отриманого матеріалу на практичних заняттях. Перелік лекційних та практичних занять побудовано у такий спосіб, що матеріал кожної лекції пов'язаний із матеріалом попередньої та є підґрунтям для наступної. Так, викладанню матеріалу щодо сталійного часу присвячено 4 години, оскільки ці умови фрахтової угоди є одними з найбільш важливими та характеризуються багатоваріантністю формувань. Пояснення наступного лекційного матеріалу – контрсталійний час та демередж, не є можливим без пояснення умов та формувань по сталійному часу, у той час як базою для пояснення умов про сталійний час у свою чергу є домовленості по портах завантаження/розвантаження.

Втім, викладання матеріалу здійснюється не лише у словесній формі – як монолог лектора. У навчальному процесі активно використовуються наочні методи – студенти працюють із «живими» чартер-партіями, укладеними за універсальними проформами, знайомлячись із тим, як у практичній діяльності формулюються та вказуються у них умови угоди та домовленості сторін. Вже укладений чартер містить один з декількох варіантів формулювань умов договору, тож можливість, доцільність та практика використання інших формулювань, так само як і їх тлумачення, мають бути пояснені окремо. Такий підхід поживляє ход проведення заняття, оскільки студенти фактично є залученими у процес «читання» чартер-партії, намагаючись самостійно прокоментувати їх або ж отримуючи коментарі викладача.

Викладання дисципліни передбачає також комбінацію лекційних та практичних занять, у рамках чого студенти вирішують ситуаційне завдання з обґрунтування судновласником найбільш прийнятної пропозиції з відфрахтування судна на рейс. Тут важливою особливістю слід вказати той факт, що сплин процесу фрахтових перемовин та оцінки запропонованих пропозицій з виконання судном рейсу є настільки індивідуальним у кожному завданні, що позбавляє роботу суто механічних розрахунків, коли за відомими формулами обчислюються певні показники, а результати вирішення поставленої задачі у певному сенсі відомі заздалегідь. Тож при виконанні роботи студенти мають проявити творчий підхід – як у пошуку необхідних даних (з вільно доступних джерел) для виконання певних розрахунків, так і у поясненні свого розуміння отриманих результатів та можливостей їх коригування.

Англійська мова є основною мовою спілкування у фрахтовому бізнесі, враховуючи міжнародний характер перевезень вантажів із залученням морського транспорту. Використовуючи доволі потужну базу професійної англійської мови, дисципліна «Фрахтування» передбачає поповнення словникового запасу студентів – за рахунок специфічних термінів, притаманних суто сфері фрахтових операцій. Договори фрахтування суден укладаються англійською мовою – так само, як і перемовини щодо її укладання (зокрема – листування) здійснюються англійською мовою. Характерним є використання численної кількості абревіатур, тлумачити та розуміти сенс яких студенти саме і мають змогу навчитися при вивченні дисципліни «Фрахтування».

Висновки. Необхідність забезпечення високого якісного рівня освітніх послуг, які надаються закладами вищої освіти, вимагають постійного удосконалення (змістовно та за формами викладання) дисциплін, зокрема – фахових, які формують коло професійних навичок і компетентностей. Освітній процес має захоплювати студента, тож постійною є необхідність розробки та впровадження новітніх технологій та засобів навчання. Подальший розвиток змістовного наповнення дисципліни «Фрахтування» має базуватися на оновленні інформаційної бази, яка використовується у навчальному процесі, а форми проведення занять – заохочувати та мотивувати студентів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шаров С. Компетентнісний підхід: переваги, структура та особливості. *Науковий вісник МНУ імені В.О. Сухомлинського. Педагогічні науки*. 2018. № 4 (63). С. 194-199.
2. Стинська, В. В., Ящишин З. М., Кліщ, І. П. Компетентнісний підхід у вищій професійній освіті України. *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. Серія 5 : Педагогічні науки : реалії та перспективи : зб. наук. праць / Міністерство освіти і науки України, Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова. – Київ : Видавничий дім «Гельветика», 2021. – Вип. 79 (т. 2). – С. 139-142. – DOI [10.31392/NPU-nc.series5.2021.79.2.30](https://doi.org/10.31392/NPU-nc.series5.2021.79.2.30)*

3. Лунячек В. Компетентнісний підхід як методологія професійного розвитку працівника освіти. *Нова педагогічна думка*. 2020. № 2 (102). С. 37-45. DOI 10.37026/2520-6427-2020-102-2-37-45
4. Компетентнісний підхід у вищій школі: теорія і практика. Монографія / кол авт. ; за заг. ред. О.А. Жукової, А.І. Комишана. – Харків : ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2021, - 264 с. DOI 10.26569/978966285629
5. Холоденко В. О. Компетентнісний підхід у вищих навчальних закладах України: деякі теоретичні аспекти освітньої парадигми. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*, 2022. Вип. 204. С. 268-274. DOI 10.36550/2415-7988-2022-1-204-269-274
6. Oroszi T. Competency-Based education. *Creative Education*. 2020. 11. p. 2467-2476. DOI 10.4236
7. Glaesser J. Competence in educational theory and practice: a critical discussion. *Oxford Review of Education*. 2019. 45:1, p. 70-85. DOI 10.1080/03054985.2018.1493987
8. Kellogg S. Competency Based Education: Best Practices and Implementation Strategies for Institutions of Higher Education. 2018. Doctorate in Education. URL: [3https://core.ac.uk/download/pdf/235302572.pdf](https://core.ac.uk/download/pdf/235302572.pdf)
9. Sturgis Ch., Casey K. Quality Principles for Competency-Based Education. URL: <https://aurora-institute.org/wp-content/uploads/Quality-Principles-Book.pdf>
10. Curry L., Docherty M. Implementing competency-based education. DOI: 10.22329/cely.v.10i0.4716. *Collected Essays on Learning and Teaching*. 2017. Vol. X. p. 61-74.
11. Halász G., Michel A. Key Competences in Europe: interpretation, policy formulation and implementation. *European Journal of Education*. 2011. Vol. 46, No. 3. p. 289-306.
12. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. – Київ, 2018. – 20 с.
13. Методичні рекомендації щодо розроблення стандартів вищої освіти: Протокол № 3 від 29.03.2016 // Сектор вищої освіти Науково-методичної ради Міністерства освіти і науки України. – К., 2016. - 29 с.
14. Освітня-професійна програма (зі змінами) «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)». URL: https://odaba.edu.ua/upload/files/OPP_TT__2021.pdf
15. Освітня-професійна програма «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)». URL: <https://docs.ztu.edu.ua/>
16. Проект ОПП «Організація перевезень і управління на транспорті». URL: <https://kart.edu.ua/pro-universitet/public-info/obgovorennya/osvitni-programi/275-transportni-tehnologii-275-02-na-zaliznichnomu-transporti>
17. ОПП «Організація перевезень та управління на транспорті». URL: <https://www.onmu.odessa.ua/ua/nn-imb/trans-tech-bach/oput-bach.html>
18. Дрожжин О.Л., Тихоніна І.І. Форми й методи викладання дисципліни «Технологія морських перевезень» для бакалаврів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 4 (234). С. 94-97.

Koskina Yu.O.

PECURIALITIES OF THE TEACHING OF THE COURSE OF "CHARTERING" FOR BACHELORS OF TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY SEA AND RIVER TRANSPORT)

The paper defines the place of the professional course "Chartering" in the educational and professional program "Organization of transportation and transport management", developed within the specialty 275 Transport technologies, which is implemented at the Scientific and Educational Institute of Maritime Business of the Odessa National Maritime University. Interrelationships have been established with the disciplines, which must be previously studied as

such, some knowledge of which forms the background for studying the "Chartering". The general and professional competencies that future bachelors in transport technologies should acquire, as well as the expected learning outcomes, are given. They are formed considering the specifics of the field of tramp shipping, on which the discipline is oriented. General information on the scope and content of the discipline is provided, with their segmentation into two parts according to the modes and meaning of vessels' chartering. Methods and forms of implementation of the educational process are indicated, which are based on traditional lectures and practical classes, but using a wide documentary base - real charter-parties, which students should learn to "read". The situational task for students is provided by the relevant educational and work programs, and accomplishing it students are encouraged to make individual decisions with justification of their own opinion and comments on the results obtained. The situational task consists in ensuring the most acceptable option for the shipowner to charter out the vessel for a voyage and involves calculations of the operational and economic indicators. The study of the course requires significant knowledge of English, which during classes students have the opportunity to deepen and expand due to the use of terms specific to freight business; to improve the skills of business correspondence in English.

Key words: *bachelor, chartering, tramp shipping, transport technologies, competencies*

Лопатюк С.П.

ВЗАЄМОЗАЛЕЖНІСТЬ ЗМІНИ КЛІМАТУ І БЕЗПЕКИ НАШОГО МАЙБУТНЬОГО

Зміна клімату в останні роки є однією з найголовніших глобальних проблем. Політика провідних країн світу зміщуються в сторону довгострокових проблем сталого розвитку і міжнародної безпеки. Розробці стратегій для пом'якшення антропогенного впливу на навколишнє середовище та їх реалізації присвячені чисельні міжнародні конференції під егідою ООН. Акцент зосереджується на регулюванні викидів вуглеводнів. Цей процес супроводжується конфліктними ситуаціями між провідними країнами, країнами з перехідною економікою, країнами, що розвиваються.

В статті досліджуються основні тенденції впливу зміни клімату на сталий розвиток країн світу. Приділяється увага реакції провідних держав на можливі загрози конкурентоспроможності національних економік і міжнародним механізмам протидії зміні клімату.

***Ключові слова:** зміна клімату, антропогенні парникові гази, вуглеводні, сталий розвиток, міжнародна безпека.*

Постановка проблеми. Проблеми зміни клімату активно досліджують вчені світу, вивчаючи вплив змін клімату на населення світу, його міграцію, можливість конфліктів. Екологічні складові є важливими чинниками, що впливають на рішення про міграцію. Наприклад, дефіцит ресурсів призводить до відтоку населення з місць проживання, переміщення в інші регіони, що, в свою чергу, може викликати конфліктні ситуації. Якщо державні інституції не зможуть адаптуватися до наслідків зміни клімату, збіднення природних ресурсів, то безпека людини буде під загрозою [1- 6].

Мета дослідження полягає в дослідженні і та викладенні основних тенденцій впливу зміни клімату на соціально-економічне, соціально-політичне життя населення планети і можливість геополітичних конфліктів.

Основний текст дослідження. Зміни клімату є непрямую загрозою безпеці провідних країн світу, які занепокоєні їх впливом на конкурентоспроможність своїх економік, на доступ до нових природних ресурсів [2]. При цьому держави, які недооцінюють небезпеку або неспроможні її подолати, ризикують ослабнути економічно і технологічно, а держави, що намагаються виграти за рахунок політичного використання теми зміни клімату, створюють реальну загрозу недооцінки цієї глобальної небезпеки, відкладаючи її вирішення на невизначений час із всіма негативними екологічними та соціально-економічними наслідками. Відмінності поглядів на проблему зміни клімату і протиріччя інтересів країн «Великої двадцятки» суттєво впливають на міжнародну безпеку.

З високою достовірністю підвищення глобальних середніх температур пов'язано із збільшенням концентрації антропогенних парникових газів, насамперед, вуглекислого газу і метану (рис.1). Підвищення глобальних концентрацій парникових газів головним чином пов'язують з використанням викопних видів палива [4]. Разом з тим, існує і інша думка про природну мінливість, що призводила до драматичних кліматичних змін у минулому. Відсутність консенсусу з даного питання ускладнює прийняття ефективної програми

розв'язання проблеми зміни клімату на національних і міжнародних рівнях. Коректна оцінка наслідків зміни клімату є важливою для розробки ефективної політики щодо зниження кліматичних загроз для сталого розвитку країн.

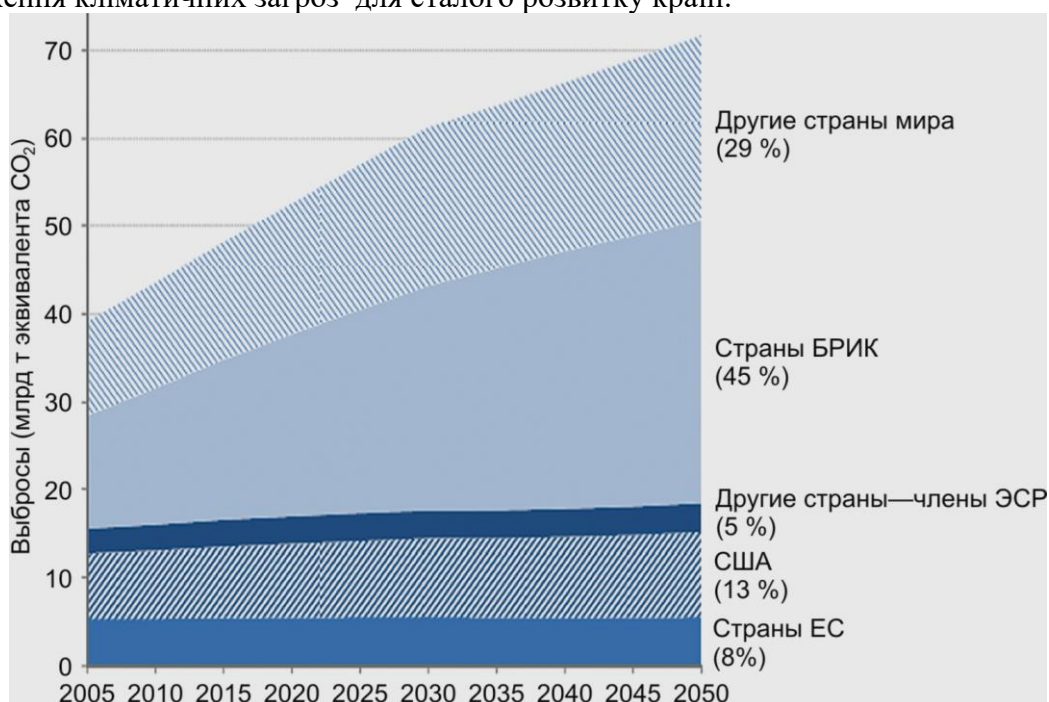


Рисунок 1 - Динаміка світових викидів парникових газів [2]

За прогнозами експертів [4] на період до 2030 року очікується потепління приблизно 0,2° С за десятиліття. Із ймовірністю 90% в середині століття напівзасушливі райони (Середньоморський басейн, західна частина США, Південна Африка, північно-східна Бразилія) будуть страждати від скорочення водних ресурсів внаслідок зміни клімату. В Росії в поточному десятилітті збільшуватиметься середньорічна температура особливо взимку, особливо в Сибіру та субарктичних регіонах.

Британська консалтингова компанія Marplecroft в «Атласі кліматичних змін і ризику для навколишнього середовища» представила рейтинг 193 країн за рівнем їх залежності від погодних змін. Росії відвели 117 місце, США – 129-е місце. Мінімальний рівень ризику у північно-західних країн Європи. В зоні високого ризику знаходиться південний захід Бразилії, а також китайські прибережні райони, хоча самі країни знаходяться в зоні середнього ризику. В країнах Близького сходу у зв'язку з гострим дефіцитом прісної води різко зменшиться врожайність в зонах незрошувального землеробства, що підвищить рівень продовольчої небезпеки багатьох африканських країн.

Краще всіх до кліматичних змін зможуть адаптуватись країни Північної Європи: Фінляндія, Ірландія, Швеція і Норвегія.

Прогнози соціально-економічного розвитку Росії до 2030 року [2] найбільш ймовірним вважають інерційний характер сировинно-енергетичного спрямування, в якому 20 % ВВП - це доля нафтогазового сектора. Цей сектор економіки достатньо вразливий до змін клімату. Крім того, збільшаться проблеми розвитку виробничої, енергетичної і транспортної інфраструктури в зв'язку з деградацією зони вічної мерзлоти внаслідок зміни клімату. Спричинена цими загрозами шкода може становити приблизно 2-3% ВВП. З іншої сторони, зміна клімату може призвести до покращення ситуації в сільськогосподарському виробництві і зміцнення продовольчої безпеки Росії, зменшенню

терміну опалювального сезону, і відповідно економії на витратах палива, збільшення навігаційного періоду і, відповідно, можливостей розвитку водного транспорту. Але реалізувати ці позитивні тенденції можливо тільки при переході на інноваційний шлях розвитку країни.

Вплив зміни клімату на теплові електростанції виражається в зниженні їх загальної термічної ефективності через підвищення середньорічних температур, а також в нагріванні і висиханні прилеглих охолоджувальних водойм. Пропонується повторно використовувати технологічну воду (замкнуті системи водообігу) або більш дорогі технології сухого охолодження. Урагани, повені і засухи впливають значно більше, і методи захисту від них більш дорогі. Відновлювана енергетика важлива з точки зору пом'якшення наслідків антропогенної зміни клімату. Однак наразі на неї припадає не більше 25 % світових генеруючих потужностей, при цьому 16 % складає гідроенергетика та близько 5% – сонячні і вітрові електростанції [3].

Кліматично обумовлені загрози міжнародній безпеці пов'язані не тільки із зміною клімату, але і з реакцією на них зі сторони конкретних країн, груп країн, міжнародної спільноти. Вперше на глобальному рівні проблема зміни клімату була оголошена на конференції 1992 р. в Ріо-де-Жанейро (179 країн учасників). В листопаді 2022 р., на тлі пандемії і війни в Україні, в конференції ООН по клімату в Єгипті взяли участь представники 100 країн світу.

Тема зміни клімату в останні роки залишається однією з найголовніших глобальних проблем, поруч із такими як стабільність економіки і міжнародний тероризм. Це свідчить про те, що пріоритети в політиці провідних країн зміщуються в сторону довгострокових проблем сталого розвитку і міжнародної безпеки. Чим пояснюється такий інтерес до проблеми зміни клімату? Причинами називають недостатню вивченість рівня небезпеки, загрози життю і здоров'ю людей, а також рівня обізнаності населення про неї. Крім цього, спостерігається намагання політичних лідерів деяких країн світу скористатись цією проблемою для розв'язання стратегічних задач розвитку і національної безпеки. У політизації проблеми зміни клімату виділяють три стадії: оцінку проблеми з точки зору загрози національній безпеці, розробку стратегій для пом'якшення впливу на національний розвиток, реалізацію стратегій з ціллю отримання вигоди. До кінця 1980-х років проблема зміни клімату розглядалась як наукова (Доповідь Римського Клубу, 1990 р.). У 1992 році відбувся Міжнародний Саміт ООН в Ріо-де-Жанейро, де було проголошено Рамочну Конвенцію ООН про зміну клімату. Далі в Кіотському Протоколі (1997 р.) була представлена проблема скорочення антропогенних викидів парникових газів (за деякими даними вони становлять близько 4% від загального обсягу викидів в атмосферу). При цьому акцент зосереджувався на регулюванні викидів CO₂, насамперед, від теплоенергетичних комплексів. Таке регулювання стимулює довгострокову тенденцію скорочення попиту і цін на вуглеводне паливо, що є вигідним для країн-імпортерів з Європи, США і Японії.

Саме тому на фоні розвитку міжнародного діалогу з проблеми зміни клімату можна спостерігати і загострення конкуренції держав за прийняття вигідних для них рішень. Досвід реалізації Кіотського протоколу (1997 р.), рішень Копенгагенської конференції (2009 р.), Паризької угоди (2015 р.), конференція ООН з питань змін клімату в Єгипті (2022 р.) свідчать про існуючі протиріччя інтересів країн світу з питань зміни клімату та його наслідків для сталого розвитку і міжнародної безпеки.

Китай є лідером щодо емісії парникових газів (рис.2), але відмовився від прийняття нового обов'язкового для всіх сторін договору на заміну Кіотського протоколу, дія якого закінчилась у 2012 році. Солідарні з Китаєм такі країни як Індія, Бразилія і ЮАР.

Стримуючим механізмом є тенденція на зниження попиту на вуглеводневе паливо, що призводить до зменшення залежності США і ЄС від його імпорту і одночасно скорочує доходи країн-експортерів вуглеводів, наприклад, Росії.

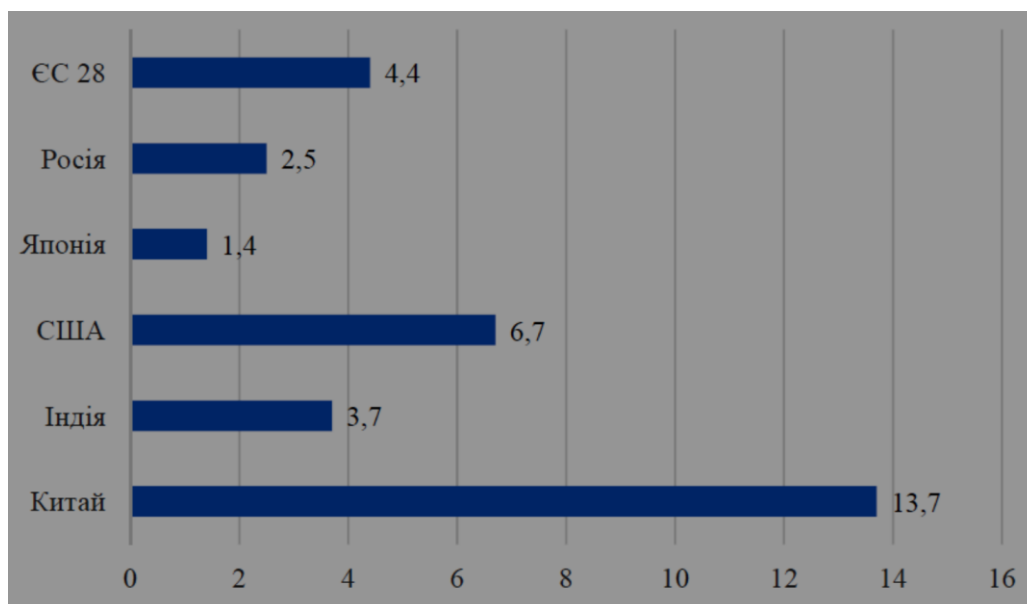


Рисунок 2 - Викиди парникових газів у 2018 р., гігатон/рік [6]

США і країни ЄС використовують проблему зміни клімату з однієї сторони як спосіб стримування конкурентів, а з іншої – як стимул для світового науково-технічного лідерства. Міжурядова група експертів із зміни клімату ввела принцип «кращих наявних технологій», який активно підтримують країни ЄС, що передбачає обов'язкове оновлення обладнання у промисловості на основі нормативних показників об'ємів викидів вуглецю в розрахунку на одиницю виготовленої продукції. Ці доцільні і прогресивні ініціативи, крім позитивних наслідків для захисту довкілля, посилюють залежність країн-імпортерів цих технологій від країн Заходу. Завдяки цьому розвинені країни отримують додаткові можливості для розвитку «зеленої» економіки майбутнього.

США підтримуючи і фінансуючи діяльність дослідницьких центрів, що розробляють концепцію глобального антропогенного потепління, з іншої сторони намагаються уникнути величезних витрат, пов'язаних з виконанням вимог Кіотського протоколу, які б могли нанести шкоду конкурентоспроможності національної економіки.

По суті, історія розвитку концепції глобального антропогенного потепління відображає процес перерозподілу сфер впливу між традиційними галузями промисловості і теплоенергетичним комплексом, з однієї сторони, і компаніями «зеленої» економіки та фінансовими гравцями, з іншої сторони.

Країни ЄС, намагаючись закріпити своє лідерство у світовій політиці щодо зміни клімату, у 2009 р. запропонували розвиненим країнам взяти на себе обов'язок зменшити викиди парникових газів на 30% від рівня 1990 р. до 2020р. для обмеження росту глобальної температури до 2°C у порівнянні з доіндустріальним періодом. Ці обмеження потребують великих витрат на розробку і впровадження енергоефективних технологій. Чималі витрати несуть країни ЄС і при купівлі скорочення викидів парникових газів, у відповідності до механізму передбаченого Кіотським протоколом, у країн, що розвиваються. На сьогодні можна констатувати, що такі дії не призводять до реального зниження викидів парникових

газів на глобальному рівні. Подальше посилення норм ЄС в галузі охорони навколишнього середовища зменшило конкурентоспроможність енергоефективного європейського обладнання на користь більш дешевої продукції машинобудування з інших країн.

Євросоюз обрав Росію, основного експортера вуглеводнів, основним об'єктом тиску щодо виконання європейського законодавства. Заборона або обмеження імпорту енергоємної чи недостатньо екологічно чистої продукції становить загрозу економічній безпеці Росії. Ініціатива Євросоюзу щодо відміни переносу невикористаних прав на викиди парникових газів, процедури передбаченої Кіотським протоколом, унеможливить отримання Росією доходів або інвестицій, які б вона могла отримувати в межах міжнародної торгівлі квотами.

США відмовились від ратифікації Кіотського протоколу і намагаються вплинути на Китай і Індію, які діють за межами протоколу стосовно викидів парникових газів. Основний аргумент США – необхідність запровадження глобального режиму обмежень для всіх найбільших світових емітентів парникових газів, в наслідок чого обов'язки США і цих країн стають взаємозалежними. Китай, в свою чергу, жорстко не йде на поступки, посиляючись на історичну відповідальність розвинених країн за наслідки антропогенного глобального потепління.

Євросоюз розраховував компенсувати витрати на переоснащення машинобудування за рахунок надходження коштів від «зеленої» економіки. І швидко модернізуючи виробництво в країнах-членах ЄС, випередити США в конкурентоспроможності економіки. Крім того, Євросоюз роками субсидував Китай і країни, що розвиваються, купуючи їх проектні скорочення парникових газів в рамках Кіотського механізму «чистого розвитку», намагаючись підсилити свої позиції у конкурентній боротьбі із США.

Китай успішно скористався можливостями продажу проектних скорочень в межах Кіотського протоколу, ставши монополістом продажу прав на викиди парникових газів, залишивши далеко позаду Росію, Україну, Індію, країни Латинської Америки.

Зміни клімату відображаються на геополітиці держав світу [7]. Кожна країна хоче отримати доступ до нових ринків і відкрити нові можливості для співробітництва. Сьогодні в цій політиці лідирують Китай, США і ЄС. А в Росії, як і раніше, основою економічної моделі залишається експорт вуглеводнів. США вважають загрозою особистій і глобальній безпеці ті країни, які налаштовані проти боротьби із зміною клімату. Це не може не відобразитись на стосунках США і Росії. Формально Росія виконує домовленості Паризької угоди, в яких зниження відраховуються від рівня 1990 року, але на сьогодні країна займає 4-е місце у світі за об'ємом викидів парникових газів, що фактично заважає виконанню цієї угоди. Росія визнає небезпеку зміни клімату, але не поспішає з підготовкою до енергетичної модернізації, сподіваючись на позитивні наслідки глобального потепління для сільського господарства і покращення стратегічного становища в Арктиці за рахунок танення льодових покривів.

Не менше значення мають питання про трубопровід «Північний потік – 2» з Росії в Німеччину і про поставки зрідженого природного газу в Європу. Виробництво зрідженого газу пов'язано з викидами вуглекислого газу і метану, але цей газ став для США важливим експортним товаром, незважаючи на проголошену всередині країни політику жорсткого регулювання викидів парникових газів. Конкуренція Росії і США з цих питань ставить світ перед загрозою тривалої конфронтації двох держав.

У 2012 році дію Кіотського протоколу було продовжено до 2020 року, але у грудні 2015 року на Конференції по клімату в Парижі була прийнята Паризька угода (підписана в квітні 2016 року). Ціллю угоди була активізація впровадження Рамочної конвенції ООН по зміні клімату: утримати зростання глобальної температури нижче 2° С і докласти зусиль до обмеження зростання температури величиною 1,5 ° С. У 2017 році США вийшли з

Паризької угоди (за угодою США мали б до 2025 року зменшити рівень викидів парникових газів на 26-28 % у порівнянні з рівнем 2005 року), а в січні 2021 повернулись до угоди. Росія ратифікувала Паризьку угоду у 2019 році.

На початку 2021 року Європейський інвестиційний банк заявив про наміри припинити фінансування масштабних проектів з виробництва теплоенергії, що виробляється з газу. ЄС і США обговорюють введення мита на викиди парникових газів. Тому Росії необхідно, враховуючи політику ЄС щодо повної відмови від викопного палива, розробити нову стратегію розвитку для підвищення конкурентоспроможності у світі, що змінюється. США, зі своєї сторони, мали б запропонувати Росії договір про скорочення шкідливих викидів, подібний за логікою до договору про ядерне роззброєння. Це сприяло би подоланню сучасних геополітичних проблем.

Проте існують і інші думки щодо безперечності висновків кліматологів [8]. За діями правлячих кіл США криються намагання викоринити вугільну і нафтогазові галузі як такі, що є «брудними» і впливають на зміну клімату планети. Пропонується за десять років ліквідувати викопне паливо і замінити його «зеленими» джерелами енергії. Кліматологія з нормальної галузі знань перетворилась на релігію нового віку. Головна небезпека криється не в зміні клімату, а в спробах маніпулювати цим, руйнуючи економіку. Формування інфраструктури для сонячної і вітроенергетики обійдеться в трильйони доларів. Правлячі кола використовують зміну клімату для особистого збагачення і централізації влади. Наростаюча хвиля фінансових вливань виявляється потужним стимулом для виведення вченими висновку про апокаліпсис, що на нас насувається.

В грудні 2016 р. Кабінетом Міністрів України схвалено Концепцію реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року. Україна протягом 2017-2019 рр. значно піднялась у рейтингу Climate Change Performance Index, увійшовши у світові ТОП 20 країн, що здійснюють значний внесок у розвиток міжнародного кліматичного руху [6]. На виконання Паризької угоди та Плану заходів щодо виконання Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року розроблено Стратегію низьковуглецевого розвитку України до 2050 року. Відповідно до неї індикативний показник викидів парникових газів до 2050 року має досягти рівня 31-34% порівняно з 1990 роком. Розробляються щорічні національні кадастри антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні. З 1 січня 2021 року введений в дію Закон України від 12 грудня 2019 року № 377-IX «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів», який забезпечить створення в Україні нормативно-правової бази для досягнення цілей Рамкової конвенції ООН про зміну клімату.

В листопаді 2022 року в Єгипті відбулася Конференція ООН по клімату. В різних заходах, переговорах та прес-конференції взяли участь понад 100 глав держав і урядів, понад 35 тис. учасників. На 27-ій конференції ООН зі зміни клімату (COP 27) Україна, вперше у власному павільйоні, представила проблеми, пов'язані із повномасштабним вторгненням Росії. Делегація України провела зустрічі з представниками країн світу щодо можливості розробки спільних підходів оцінки збитків довкіллю від військових дій. Крім того, пройшла низка переговорів, які дозволили отримати доступ до міжнародних екологічних фінансів та щодо ринкових і неринкових механізмів регулювання викидів парникових газів. Росія фактично зводить нанівець усі зусилля, які десятиліттями докладались цивілізованими країнами для захисту довкілля і запобігання кліматичним змінам. Війна призвела до викидів мільйонів тонн парникових газів. Росія завдала природним ресурсам України величезної руйнації і забруднення, і для подолання кліматичної кризи доведеться значно більше зусиль [9].

Результати конференції в Єгипті можна охарактеризувати такими підсумками [10]:

- створення спеціального фонду для фінансування втрат і шкоди для країн, що постраждали від повеней, засухи та інших кліматичних лих;
- підтверджений намір зберегти ціль 1,5° С в межах досяжності. Для обмеження зростання глобальної температури 1,5° С необхідно, щоб глобальні викиди парникових газів досягли піку не пізніше 2025 року, а до 2030 року скоротились на 43 % ;
- концентрація уваги на підзвітності всіх учасників переговорного процесу по клімату;
- виділення додаткових фінансових коштів для країн, що розвиваються;
- перехід до здійснення положень Паризької угоди.

Однак, саме під час проведення Конференції ООН в Єгипті Британія і США підготували велику газову угоду. США планують продати Британії мільярди кубометрів скрапленого природного газу протягом наступного року. Готовність Британії імпортувати більше викопного палива, одночасно закликаючи до дій по боротьбі зі зміною клімату, в даний час розглядається як необхідна умова для забезпечення енергетичної безпеки країни.

Висновки. Зміна клімату супроводжується такими глобальними тенденціями, як збільшення кількості небезпечних природних явищ значної руйнівної сили, неощадливе використання природних ресурсів, екологічна міграція, збільшення вразливості сільського господарства в деяких регіонах планети, втрати і шкоди від екстремальних явищ і пандемії. Відсутність консенсусу щодо запобігання антропогенному впливу на навколишнє середовище загрожує соціально-економічними, соціально-політичними, геополітичними наслідками і загостренням існуючих конфліктів. Нездатність досягнення незалежного від зміни клімату сталого розвитку може привести до несприятливого майбутнього для людей і природи

ЛІТЕРАТУРА

1. Marc Kodack. The Complexity of the Climate Change, Migration and Conflict Nexus <https://climateandsecurity.org/2020/12/the-complexity-of-the-climate-change-migration-and-conflict-nexus/> Оpubлiковано: 9.12.2020
2. Порфирьев Б.Н., Катцов В.М., Рогинко С.А. Изменения климата и международная безопасность. М.:РАН, Отделение общественных наук, 2011. 290с. <https://www.hse.ru/news/science/51608383.html>
3. Вплив кліматичних змін на енергетичний сектор. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1847_web.pdf
4. Climate Change 2007: Synthesis Report. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/ru/main.html).
5. <https://techno.bigmir.net/discovery/5909381-nazvany-strany-kotorye-pogubit-ih-klimat> (дата звернення: 29.11.22)
6. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь / [С.П. Іванюта, О. О. Коломієць, О. А. Малиновська, Л. М. Якушенко]; за ред. С. П. Іванюти. К. : НІСД, 2020. 110 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [dop-climate-final-5_sait Національний інститут стратегічних досліджень Україна http://www.niss.gov.ua](http://www.niss.gov.ua)
7. Изменение климата: некоторые аспекты проблемы. Часть 4. Ташкент: НИЦ МКВК, 2021. 73с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cawater-info.net/library/content/clim-ch-2021-4.htm>

8. Justin Spittler. How to Profit From Climate Change Hysteria // <https://www.caseyresearch.com/daily-dispatch/how-to-profit-from-climate-change-hysteria/> Перевод ZONAkz <https://zonakz.net/2019/10/24/kak-mozhno-izvlech-vygodu-iz-isterii-povoduizmeneniya-klimata/>
9. <https://ukranews.com/ua/news/893081-ukrayina-vpershe-za-bagato-rokiv-predstavyt-vlasnyj-paviljon-na-konferentsiyi-oon-zi-zminy-klimatu> (дата звернення: 07.11.22)
10. <https://unfccc.int/ru/peregovornyy-process-i-vstrechi/konferencii/sharm-el-sheikh-climate-change-conference-november-2022/pyat-klyuchevykh-itogov-ks-27> (дата звернення:05.12.22)

REFERENCES

1. Marc Kodack. The Complexity of the Climate Change, Migration and Conflict Nexus <https://climateandsecurity.org/2020/12/the-complexity-of-the-climate-change-migration-and-conflict-nexus/> Opublikovano: 9.12.2020
2. Porfirev B.N., Katcov V.M., Roginko S.A. Climate change and international security. M.:RAN, Otdelenie obshchestvennykh nauk, 2011. 290s. <https://www.hse.ru/news/science/51608383.html>
3. The impact of climate change on the energy sector. [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1847_web.pdf
4. Climate Change 2007: Synthesis Report. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/ru/main.html).
5. <https://techno.bigmir.net/discovery/5909381-nazvany-strany-kotorye-pogubit-ih-klimat> (data zvernennya: 29.11.22)
6. Climate change: consequences and means of adaptation: analytical report / [S.P. Ivanyuta, O. O. Kolomiyec, O. A. Malinovska, L. M. Yakushenko]; za red. S. P. Ivanyuti. K. : NISD, 2020. 110 s. [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: [dop-climate-final-5_sait Nacionalnij institut strategichnih doslidzhen Ukrayina http://www.niss.gov.ua](http://www.niss.gov.ua)
7. Climate change: some aspects of the problem. Chast 4. Tashkent: NIC MKVK, 2021. 73s. [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://www.cawater-info.net/library/content/clim-ch-2021-4.htm>
8. Justin Spittler. How to Profit From Climate Change Hysteria // <https://www.caseyresearch.com/daily-dispatch/how-to-profit-from-climate-change-hysteria/> Perevod ZONAkz <https://zonakz.net/2019/10/24/kak-mozhno-izvlech-vygodu-iz-isterii-povoduizmeneniya-klimata/>
9. <https://ukranews.com/ua/news/893081-ukrayina-vpershe-za-bagato-rokiv-predstavyt-vlasnyj-paviljon-na-konferentsiyi-oon-zi-zminy-klimatu> (data zvernennya: 07.11.22)
10. <https://unfccc.int/ru/peregovornyy-process-i-vstrechi/konferencii/sharm-el-sheikh-climate-change-conference-november-2022/pyat-klyuchevykh-itogov-ks-27> (data zvernennya:05.12.22)

Lopatuk Svitlana

INTERDEPENDENCE OF CLIMATE CHANGE AND THE SECURITY OF OUR FUTURE

Climate change in recent years is one of the main global problems. The policy of the leading countries of the world is shifting towards long-term problems of sustainable development and international security. Numerous international conferences under the auspices of the UN are devoted to the development of strategies for mitigating the anthropogenic impact on the environment and their implementation. The focus is on the regulation of hydrocarbon emissions.

This process is accompanied by conflict situations between leading countries, countries with economies in transition, and developing countries.

The article is devoted to the study the main trends in the impact of climate change on the sustainable development of the countries of the world. Attention is paid to the reaction of leading states to possible threats to the competitiveness of national economies and to international mechanisms to combat climate change.

Key words: *climate change, anthropogenic greenhouse gases, hydrocarbons, sustainable development, international security.*

УДК 629.5:656.13

doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21

Тимощук О.М., Боріна М.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Підвищення екологічності суднових енергетичних установок (СЕУ) є важливим та актуальним завданням, пов'язаним з посиленням вимог до екологічності по викидам NO_x, SO_x та CO_x з боку міжнародних організацій, розширення зон контролю (спеціальних районів) за викидами в морському просторі, звертання уваги суднобудівників до питання екологічності. В результаті обчислень з використанням розробленої математичної моделі зроблено висновок про необхідність установлення всередині ФОЕ направляючих пластин, що дозволить збільшити температурний перепад у газовому потоці за рахунок збільшення розміру пухирців ВГ у процесі підйому. У ході дослідження встановлено, що швидкість підйому пухирців ВГ всередині ФОЕ досягає постійної величини за три секунди початку руху, не залежить від швидкості їх підведення або в'язкості отриманої суміші газу з рідиною. Для підвищення ефективності процесу фільтрування суднових ВГ необхідно у рідині необхідно збільшувати поверхню контакту пухирців газів з рідиною всередині ФОЕ. Конструктивно це можливо зробити шляхом генерування в нижній частині елемента газових пухирців максимального діаметра та вибором кута нахилу направляючих пластин всередині ФОЕ, таким чином, щоб забезпечити максимально тривалий контакт ВГ з рідиною.

Ключові слова: *екологічність, методи, енергетичні установки, водне середовище*

Постановка проблеми. Еволюція дизелебудування передбачала наступний ланцюг підвищення характеристик: “економічність” – “надійність” – “екологічність”. Існуючі методи та способи очищення вихлопних газів (ВГ) СЕУ забезпечують механічне очищення двооксиду вуглецю за допомогою поверхнево активних речовин, каталізаторів для оксидів азоту, оксидів сірки при виконанні заходів паливопідготовки. В той же час існує технічна можливість фільтрації вихлопних газів та охолодження їх у водному середовищі. Підвищення екологічності СЕУ за рахунок розроблення технологічних схем очищення ВГ у водному середовищі. На сьогоднішній день частка дизельних двигунів (ДДВ) у СЕУ складає близько 90%.

До основних світових виробників СЕУ з ДДВ відносяться (в дужках вказано відсоток ринку станом на 2020 рік) [1, 2]:

“Wartsila Switzerland Ltd” (Швейцарія) ” (25%);
“Mitsubishi Heavy Industries Ltd”, (Японія) (10%);
“Burmeister and Wain” (Данія) (7%);
“MA” (Німеччина) (6,3%);
“Doksford” (Великобританія) (4,3%);
“Stork” (Нідерланди) (3,5%);
“Getaverken” (Швеція) (3,1%);
“Fiat” (Італія) (2,6%);
“Pillstick” (Франція) (1,8%).

ДДВ, які випускаються даними компаніями, відрізняються, як за конструктивними, так і за експлуатаційними характеристиками, але при використанні ідентичного за характеристиками сортом палива загальними в їх роботі є склад ВГ.

При роботі СЕУ виникають газоподібні технологічні викиди двох видів:

- 1) озоноруйнуючі технологічні гази;
- 2) продукти згоряння палива у ДДВ.

Перший вид викидів пов'язаний із присутністю речовин, до яких в основному відносяться різні холодильні агенти суднових систем кондиціонування та охолодження:

- хлорпентафторетан (газ рефрижераторний R 115);
- бромхлордифлорметан (хладон 12В1);
- бромтрифторметан (хладон 13В1);
- трихлорфторметан (фреон R11, фтортрихлорметан, фреон-11, хладон-11, CFC-11, R-11);
- 1,2-дибром-1,1,2,2-тетрафторетан (фреон 114В2);
- гідрохлорфторвуглець (холодоагенти: R21, R22, R141b, R142b, R123, R124);
- дихлордифторметан (холодоагент хладон-12);
- 1,1,2-трихлор-1,2,2-трифторетан (холодоагент ДО 113);
- 1,2-дихлор-1,1,2,2-тетрафторетан (газ рефрижераторний R 114).

Другий вид викидів містить усі компоненти продуктів згоряння ДДВ. У відповідності до вимог нормативних документів концентрація шкідливих домішок при викиді в навколишнє середовище визначається для кожного компонента індивідуально.

Найбільш токсичними компонентами ВГ ДДВ СЕУ є оксиди азоту (NO_x), причому їх концентрація залежить саме від конструкції дизеля. Допустимі границі викидів для основних компонентів вихлопних газів, що виникають при роботі суднового дизеля повинні бути менше значень, які наведені у таблиці 1.1.

При роботі СЕУ малошкідливі або нейтральні (N₂, O₂, CO₂ та H₂O) речовини в сумі складають до 99% від загального об'єму ВГ. Інші містять у собі окисли азоту (NO_x), сірки (SO_x), окис вуглецю (CO), вуглеводні (C₂H₄) та тверді речовини (сажу).

При роботі судна, відповідно до основних регламентуючих документів для постійного контролю викидів продуктів згоряння використовуються значення концентрації двох основних хімічних газоподібних сполук - оксидів азоту (NO_x) і комбінації оксидів сірки (SO_x) із твердими частками. Саме тому, дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі є актуальними і вимагають дослідження.

Метою статті є підвищення екологічності СЕУ за рахунок розроблення технологічних схем очищення у водному середовищі.

Питання екологічності СЕУ достатньо повно розглядається у роботах як вітчизняних, так і закордонних фахівців, що умовно можна розділити на ряд взаємопов'язаних груп:

- роботи з дослідження конструктивних особливостей СЕУ та удосконалення конструкції двигунів для підвищення їх екологічності;

- роботи з конструювання додаткових елементів СЕУ, які можуть бути розміщеними в корпусах суден без суттєвих змін їх конструкції;
- роботи з підвищення екологічності інших двигунів (авіаційних, автомобільних, тракторних тощо);

Теоретичною базою дослідження є роботи вітчизняних та закордонних авторів: Ареф'єва М.М., Голікова В.М., Спіркіна В.Г., Солодовнікова В.Г., Сагіна С. В., Шевченка В.А. [1-6]. Практична значимість отриманих результатів полягає в підвищенні екологічності очищення вихлопних газів, шляхом проектування суднової системи фільтрації вихлопних газів, інтегрованої в технологічну схему суднового головного дизеля

Основний матеріал. Розробка математичної моделі процесів тепломасообміна пухирців ВГ з нерухомою рідиною при барботажі необхідна для прогнозування характеристик зміни термодинамічного стану ВГ: температури, концентрації компонентів газової суміші та швидкості руху.

У більшості випадків при моделюванні процесу руху ВГ у рідині використовуються різні емпіричні рівняння, які у цілому враховують специфіку окремо узятих умов фільтрації, але у зв'язку з їх обмеженістю не можуть розглядатися, як універсальні для моделювання кінетики процесів тепломасообміну в цілому.

Іншим методом є побудова математичної моделі, що описується аналітичним рівнянням. Кожен метод та рівняння, які використовуються на його основі, повинні враховувати той факт, що зміна кількості руху в потоці ВГ залежить від різних фізико-хімічних властивостей та зв'язків між рідиною й ВГ. Основні зв'язки наведені на рис. 1.

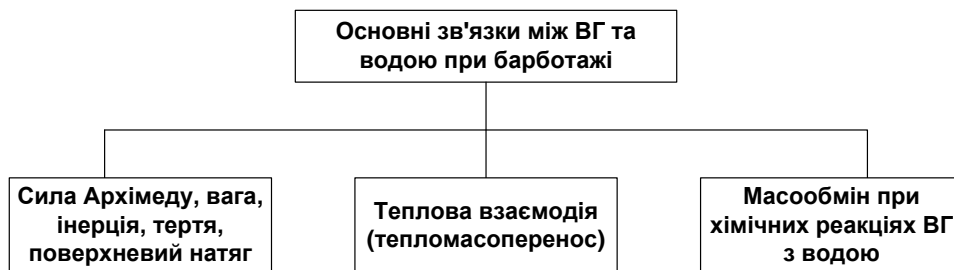


Рисунок 1 – Основні зв'язки між відпрацьованими газами СЕУ та рідиною при барботажі

Для опису процесу передачі маси від основних компонентів ВГ (CO, SO_x, NO_x) у воду використовується поняття швидкості масопередачі.

Вона розраховується за відомим рівнянням:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = J_m S (C_r - C) \quad (1)$$

де J_m – коефіцієнт масопередачі водяної плівки; S – сумарна площа поверхні газових пухирців (площина міжфазового контакту); C_r – концентрація газу при повному насиченні води; C – поточна концентрація розчиненого в рідині газу.

Невідомими, як правило, залишається коефіцієнт масопередачі, який повинен максимізуватися.

Величину коефіцієнта масопередачі водяної плівки знаходять за формулою Хігбі:

$$J_m = 2 \sqrt{\frac{D \cdot V}{\pi \cdot d_n}} \quad (2)$$

де D – середньозважене значення коефіцієнту дифузії основних складових ВГ в рідині;
 V – швидкість спливу пухирця ВГ; d_n - діаметр пухирця ВГ.

Формула (2) дає можливість моделювати процес масопередачі при нестационарній молекулярній дифузії, коли водяна плівка, що є одночасно границею розділу фаз «газ»-«рідина» рухається разом із пухирцем.

Чисельними границями області її застосування, що відповідають перехідному (від ламінарного до турбулентного) режиму спливання пухирця є:

– нижня границя $d_n = 0,12 \cdot 10^{-3}$; $V = 0,0082$; $Re = 1$. Коефіцієнт гідравлічного опору складає $\xi = 24$;

– верхня границя $d_n = 1,37 \cdot 10^{-3}$; $V = 0,37$; $Re = 500$. Коефіцієнт гідравлічного опору складає $\xi = 0,13$.

У випадку, коли здійснюється турбулентний режим руху пухирців ВГ у нерухомій рідині, необхідно використовувати формулу Данквертса [7]. Вона враховує взаємодію поверхні пухирця ВГ з турбулентними вихрами, які генеруються при його спливанні. Саме в ході такої взаємодії відбувається виникнення дрібних поверхневих пухирців на границі розділу та зміна форми основного спливаючого пухирця, а точніше границі розділу двох фаз – газу, що знаходиться всередині пухирця, й оточуючого його води.

Ця формула має вигляд:

$$J_m = \sqrt{D_t \cdot R_r} \quad (3)$$

де D_t – коефіцієнт турбулентної дифузії; R_r – фактор оновлення кордону розділу фаз.

Величина R_r у зв'язку зі складністю характеру турбулентного руху в аналітичному виді не може бути отримана й повинна визначатися емпірично за наближеними формулами.

Найбільш адекватним підходом для отримання величини фактору відновлення границі розділу фаз можна вважати аналіз енергетичного балансу.

На основі термодинамічного підходу приймається, що процес відновлення розділу фаз під дією турбулентних вихрів, повинен бути пов'язаний з витратами енергії на поверхні міжфазного розділу. За рахунок дії сил поверхневого натягу при відновленні поверхні міжфазної взаємодії між ВГ та рідиною виконується робота A . Чисельне значення нової поверхні розділу, що утвориться в одиницю часу за рахунок турбулентного обміну елементів рідини на одиниці поверхні з урахуванням виконаної роботи може бути розраховано, як:

$$S' = \frac{A}{\sigma} \quad (4)$$

де A – робота, яка виконується в одиницю часу на одиниці поверхні; σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Якщо в першому наближенні вважати, що виконана робота порівняна з добутком швидкості спливання газових пухирців на втрату тиску DU за висотою стовпа рідини:

$$A = V \cdot \Delta P = V \xi \frac{pV^2}{2} = \xi \frac{pV^3}{2} \quad (5)$$

то кінцеве значення величини S знайдемо за формулою:

$$S' = \xi \frac{pV^3}{2\sigma} \quad (6)$$

Урахування фактора форми пухирця дозволяє отримати уточнене значення величини S у порівнянні з (6). У цьому випадку виконана робота обчислюється як відношення секундної роботи A_ξ , що витрачається на подолання гідродинамічного опору, до поверхневої енергії пухирця ВГ E_ξ :

$$A_\xi = S_{\text{п.с.}} \xi \frac{pV^3}{2} \quad (7)$$

$$E_\xi = \sigma \cdot S_{\text{п.п.}} \quad (8)$$

де $S_{\text{п.с.}}$ – площа поперечного розтину пухирця; $S_{\text{п.п.}}$ – площа поверхні пухирця ВГ.

З урахуванням формул (7) та (8) формула для отримання величини оновлення поверхні міжфазової взаємодії в ході очищення судових ВГ може бути записана у вигляді:

$$S' = \frac{1}{f_n} \xi \frac{pV^3}{2\sigma} \quad (9)$$

де f_n – форма параметру пухирця вихлопного газу.

Величина f_n дозволяє враховувати вплив сил поверхнього натягу на поверхні міжфазового розділу та гідродинамічного опору на пухирець ВГ при його спливанні.

При використанні формули (9) рівняння (1) може бути наведено у вигляді:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = A_\xi \sqrt{D_t \xi \frac{pV^3}{2\sigma}} (C_r - C) \quad (10)$$

Інтегрування рівняння (10) в інтервалі $0 \leq \partial m \leq \Delta m$ та $0 \leq \partial t \leq \Delta t$ дозволяє записати формулу:

$$\Delta m = A_\xi \sqrt{D_t \xi \frac{pV^3}{2\sigma}} (C_r - C) \Delta t \quad (11)$$

де Δm – загальна маса складових ВГ, що розчиняється у воді за час фільтрації Δt .

Для поодинокого пухирця ВГ з площею поверхні $S_{\text{п.п.}}$ та об'ємом $W_{\text{п.п.}}$ зниження концентрації компонент вихлопних газів можливо розрахувати як:

$$\Delta C = \frac{1}{\Omega_{\text{п.п.}}} \sqrt{D_t \xi \frac{pV^3}{2\sigma}} (C_r - C) \Delta t \quad (12)$$

де ΔC – зниження концентрації компонент вихлопних газів, кг/м³; $\Omega_{\text{п.п.}} = W_{\text{п.п.}}/S_{\text{п.п.}}$ – відносний розмір пухирця ВГ, м.

Коефіцієнт фільтрації, як узагальнююча характеристика даної математичної моделі представляє собою відношення маси складових частин ВГ, які будуть розчинені в воді в

ході фільтрації Δt , до маси m даних компонент у УГ, що подаються на фільтрацію після суднового утилізаційного котла (УК):

$$K_f = \frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta C}{C_{\text{вх}}} = \frac{1}{C_{\text{вх}} \cdot \Omega_{\text{п.п.}}} \sqrt{D_t \xi \frac{pV^3}{2\sigma}} (C_r - C) \Delta t \quad (13)$$

де $C_{\text{вх}}$ – концентрація компонент ВГ на вході у фільтроохолоджуючу установку (ФОУ), кг/м^3 .

Рівняння динаміки та балансу енергії ВГ при проходженні через водяний фільтр можуть бути отримані підсумовуванням ідентичних рівнянь, що складаються для кожного, окремо взятого компонента (NO_x , SO_x). При цьому можна вважати, що всі отримані значення будуть середніми величинами для усіх фаз одночасно.

При розробці математичної моделі були також використані теоретичні результати роботи [8]. У ній відзначається, що у зв'язку зі складністю математичного опису процесів, пов'язаних з рухом газів усередині однорідної рідини, дотепер відсутні універсальні рівняння, які можуть описати такий рух.

Розглянемо чисельне моделювання процесу тепломасопереносу для обґрунтування характеристик фільтроохолоджувального елемента. Рішення даного завдання пов'язане з установленням впливу форми ФОЕ на об'ємні коефіцієнти тепломасопередачі, геометричні характеристики якої адаптовані до прогностичної математичної моделі і визначають початкові та граничні умови процесу барботажу.

Особливістю рішення даного завдання є вибір методу рішення диференціальних рівнянь у частинних похідних щодо просторових координат та часу з можливістю наступної його експериментальної перевірки в ході визначення геометричних розмірів ФОЕ.

Як видно з наведених раніше рівнянь математичної моделі усі вони складені для двовимірного плину у вертикальній площині фільтруючого елемента. Це зроблено на підставі наступних передумов:

– робоча камера ФОЕ є призмою з квадратною основою, а висхідні лінії плину ВГ у розрахунковій вертикальній площині можуть прийматися в першому наближенні, як цілком ідентичні один одному;

– вихрові утворення, які виникають у кутових зонах, утворених основою направляючих пластин і корпусом, а також на краях направляючих пластин усередині робочої камери через незначну швидкість руху зникають при взаємодії між собою пухирців ВГ. При руйнуванні вихрів дисипація енергії в навколишню рідину не робить впливу на процес тепло- або масопереносу.

Для проведення розрахунків на підставі записаних вище рівнянь необхідно задавати початкові та граничні умови.

Найбільш раціональним способом завдання граничних умов є рівність нулю всіх складові швидкості на твердих поверхнях моделюемого об'єму. Для кожного розрахункового часового шару така умова герметичності твердих поверхонь розрахункового об'єму записується в наступному вигляді:

$$V = V_x = V_y = 0 \quad (14)$$

Самий нижній перетин розрахункового об'єму, що відповідає індексу $j = 0$ також повинен розглядатися, як вхідна границя. На даному перетині у всіх розрахункових вузлах при чисельному моделюванні необхідно задавати наступні умови для вхідних динамічних характеристик потоку:

– температура в кожній розрахунковій точці ($i=0..N$), яка чисельно дорівнює значенню вхідної температури ВГ:

$$T = T_{\text{вх}} \quad (15)$$

– поперечна складова швидкості відсутня, а повна швидкість визначається вертикальною складовою, яка дорівнюється швидкості подачі ВГ у фільтраційну колону:

$$V = V_y = V_{\text{вх}} \quad (16)$$

$$V_x = 0 \quad (17)$$

– тиск у першому перетині визначається сумою динамічного тиску ВГ на вході у розрахунковий об'єм та статичний тиск, який створюється висотою стовпа фільтруючої води:

$$P = P_{\text{вх}} + P_{\text{ст}} = \frac{\rho V^2}{2} + \rho g H \quad (18)$$

– концентрація та маса ВГ визначається їх вихідним складом на вході в розрахунковий об'єм:

$$C_{\text{NOx}} = C_{\text{NOx}}^{\text{вх}}; C_{\text{SOx}} = C_{\text{SOx}}^{\text{вх}}; M_{\text{в.г.}} = M_{\text{NOx}}^{\text{вх}} + M_{\text{SOx}}^{\text{вх}} \quad (19)$$

– діаметр пухирців ВГ у перших трьох розрахункових перетинах ($j < 4$) дорівнює діаметру вихлопних отворів роздавальних ґраток:

$$d_{\text{в.г.}} = d_{\rho} \quad (20)$$

Початкові умови для проведення наступних чисельних розрахунків необхідно задавати по всій розрахунковій області на перших двох часових рівнях.

У цьому випадку вважається, що у початковий момент часу всередині розрахункового об'єму знаходиться тільки нерухома фільтруюча вода і швидкість у всіх її точках дорівнює нулю, а тиск (за винятком першого перетину, див. (18)) описується тільки основним законом гідростатики:

$$V = V_x = V_y = 0 \quad (21)$$

$$P = P_{\text{ст}} = \rho g H \quad (22)$$

Температура по всьому розрахунковому об'єму задається однаковою, що дорівнюється початковій температурі фільтраційної води:

$$T = T_{\text{вх}} \quad (23)$$

Концентрація та маса ВГ у всіх точках розрахункового об'єму за виключенням перетину $j = 0$, задаються нульовими:

$$C_{\text{NOx}} = 0; C_{\text{SOx}} = 0; M_{\text{в.г.}} = 0 \quad (24)$$

Оскільки при моделюванні процесу очищення суднових ВГ розглядається газоповітряна суміш, то її динамічна в'язкість повинна бути набагато менше, ніж у води. При завданні початкових умов у ході чисельних експериментів вона приймалася: $\mu = 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$.

Кінцево-різницева схема була складена для розвитку наведеної в попередньому підрозділі магістерської роботи математичної моделі з використанням розрахункової сітки, наведеної на рис. 2 (а), для можливості її використання при русі пухирців ВГ по висоті ФОЕ.

У ході математичного моделювання кількість направляючих пластин усередині робочої камери ФОЕ було прийнято рівним їх кількості в натурному об'єкті, а при проведенні розрахунків відповідало п'ятьом одиницям.

Оскільки робоча камера ФОЕ представляє собою призму з квадратною основою, то було прийняте допущення про відсутність градієнтів швидкості (бічних плинів) у поперечному напрямку. Вважалося, що оскільки основний рух потоку відбувається тільки у вертикальному та поперечному напрямках, то тривимірні ефекти просторового плинусу усередині робочої камери на результати розрахунків не роблять ніякого впливу. З цієї причини всі чисельні експерименти проводяться в пласкій (двовимірній) постановці.

Початок координат (точка відліку перетинів, на яких розташовуються розрахункові вузли) розрахункової сітки (рис. 2 (а)) знаходився в нижньому лівому куті робочої камери.

У напрямку вісі ОХ кількість розрахункових перетинів складало: $i_N = 2500$, а у вертикальному напрямку вздовж вісі ОУ відповідно $j_M = 25000$. Таким образом, кількість розрахункових вузлів, що при дискретизації замінювали весь робочий простір камери ФОЕ, складало: $i_N \cdot j_M = 62500000$ од.

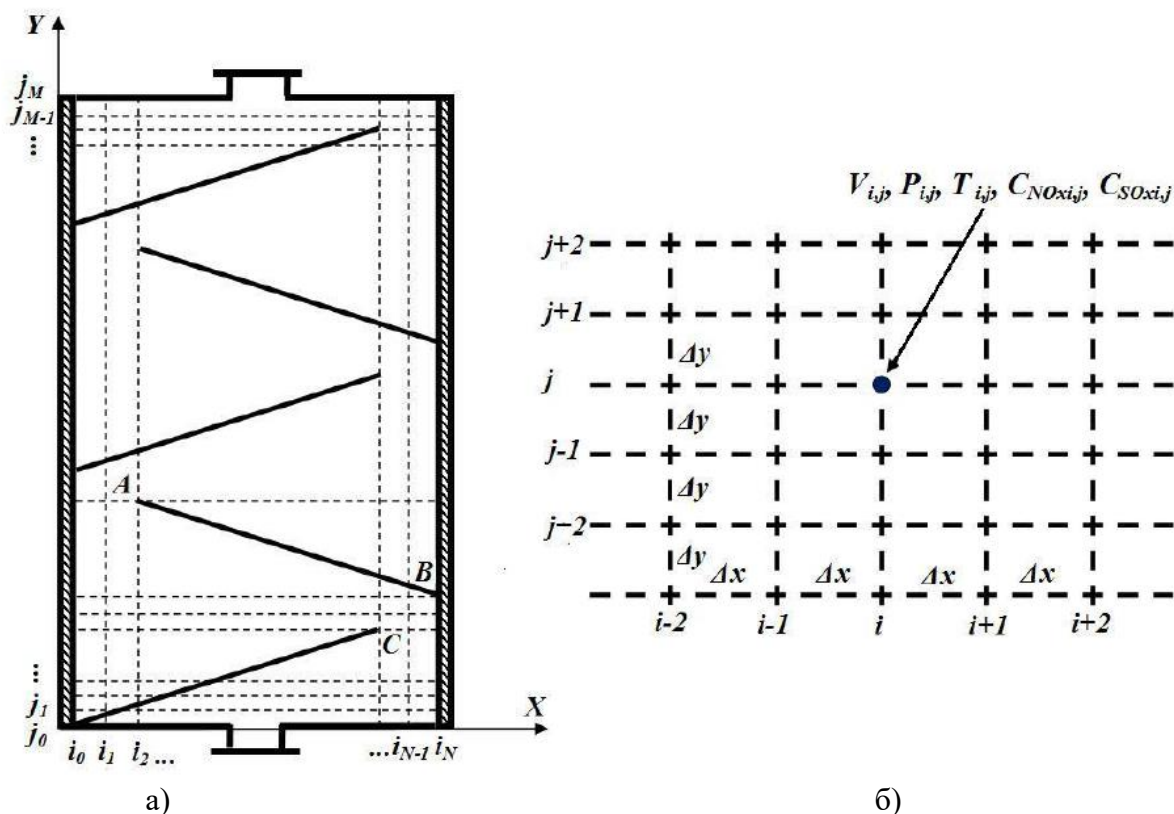


Рисунок 2 – Розрахункова сітка:
а – розрахунковий об'єм; б – виділена область розрахункової сітки

Крок сітки в обох напрямках вибирається таким чином, щоб точки, які відповідають початку й закінченню направляючих пластин усередині робочої камери, мали чіткі та

однозначні координати по і-му та j-му індексу розрахункової сітки. Як приклад, на рис. 1 (а) ці точки позначені, як А, В та С.

Усі чисельні експерименти виконуються в розмірній формі. Оскільки моделюємо процеси тепло- та масообміну у більшому ступені залежать від поперечного напрямку руху, то досить важливим було якісно відтворювати зміну всіх параметрів від одного горизонтального шару до іншого. За цією причиною крок сітки вздовж осі ОХ (див. рис. 2.2 (б)) приймався великим у порівнянні з кроком у вертикальному напрямку ОУ.

У цих напрямках вони мали фіксовані значення і, відповідно, складали: $\Delta x = x_i - x_{i-1} = 4 \cdot 10^{-4}$ мм, та $\Delta y = y_i - y_{i-1} = 8 \cdot 10^{-6}$ мм,

Наведена на рис. 2 (б) розрахункова сітка використовується для виконання нестационарних розрахунків.

У кожній вузловій точці на поточному та невідомому розрахунковому часовому шарі визначалися: швидкість, тиск, температура й концентрації складових компонентів суднових ВГ: $V_{i,j}, P_{i,j}, T_{i,j}, C_{NOxij}, C_{SOxij}$.

Кожна похідна, що входить у рівняння математичної моделі, була записана в кінцево-різницевому представленні. У залежності від розташування на сітці розрахункового вузла всі складові дискретизувалися за допомогою лівосторонніх, центральних та правобічних кінцевих різниць.

Як приклад, для першої похідної швидкості вздовж осі ОХ формули переходу від суцільного розрахункового об'єму до дискретного наведено в табл. 1.

У табл. 1 наведені формули для дискретизації нелінійного (відповідального за зміну якісних характеристик процесу обробки ВГ) та нестационарного (відповідального за зміну просторово-часових значень обумовленого параметра) додатків. У табл. 1 перші три формули дискретизації можна отримати шляхом розкладання відповідного додатка в ряд Тейлора з прибиранням залишкових членів. Усі приведені кінцево-різницеві формули мають другий порядок точності по простору й часу [9].

При дискретизації всіх рівнянь математичної моделі використовується явна апроксимація. У випадку її застосування всі невідомі на новому часовому рівні завжди розраховувалися тільки на підставі уже відомих з попередніх ітерацій. Отже описані початкові умови повинні задаватися для перших двох часових рівнів. Дискрет часу складав $\Delta t = 0,001$ с.

Таким чином, на підставі усіх викладених вище допущень і формул основні рівняння математичної моделі представлені в лінеаризованому дискретному виді.

Таблиця 1 – Формули дискретизації похідних першого порядку

Найменування складової	Математична формула
Лівобічні різниці	$\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{3V_{i,j}^{n-1} - 4V_{i-1,j}^{n-1} + V_{i-2,j}^{n-1}}{2\Delta x}$
Правобічні різниці	$\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{-3V_{i,j}^{n-1} - 4V_{i-1,j}^{n-1} - V_{i-2,j}^{n-1}}{2\Delta x}$
Центральні різниці	$\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{V_{i-1,j}^{n-1} - V_{i-2,j}^{n-1}}{2\Delta x}$
Нелінійна складова	$V \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{1}{2} (3V_{i,j}^n - V_{i,j}^{n-1}) \frac{\partial V}{\partial x}$
Нестационарна складова	$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2} V_{i,j}^{n+1} - V_{i,j}^n + \frac{1}{2} V_{i,j}^{n-1} \right)$

У приведених вище рівняннях невідомим залишається часовий рівень, для якого виконується розрахунок параметрів потоку, що позначений як $n+1$.

При проведенні розрахунків підстановка різницевої формули у загальне рівняння виробляється в залежності від розташування розрахункового вузла. Так, для перших та останнього розрахункових перетинів використовується по напрямку ОХ – однобічні різниці, а в напрямку ОУ – центральні різниці, крім першого та останнього розрахункового вузла. У цих вузлах також використовувалася односпрямована апроксимація диференціальних операторів.

Основними вимогами до формування рекомендацій є: забезпечення можливості зміни діаметра пухирців газу в поперечному перерізі ФОВ; зміни часу контакту робочих середовищ; зниження віднесення абсорбенту з ВГ, пошарового контролю стану барботуючого середовища.

Отже, в її основу покладені умови геометричної та фізичної подоби й критеріальної ідеальності, особливо за критерієм ізохронності Ньютона.

Введення експериментального ФОВ, що складається з трьох паралельно з'єднаних ФОВ різних об'ємів, у робочий процес очищення ВГ ДДВ повинен виконуватися одночасно з початком роботи СЕУ. У такому випадку забезпечується повна відповідність отриманих результатів вимірам робочих характеристик оброблюваного потоку ВГ.

Знаходження розмірів ФОВ проводиться з використанням трьох варіантів їх габаритних розмірів. Умови проведення експерименту на кожному ФОВ повинні бути цілком ідентичними (рис. 3). Для цього необхідно під час кожного експерименту з інтервалом від 5 до 10 хвилин за допомогою відповідних безповоротних клапанів по черзі підключати ФОВ з різними габаритами до лінії очищення ВГ ДДВ СЕУ.

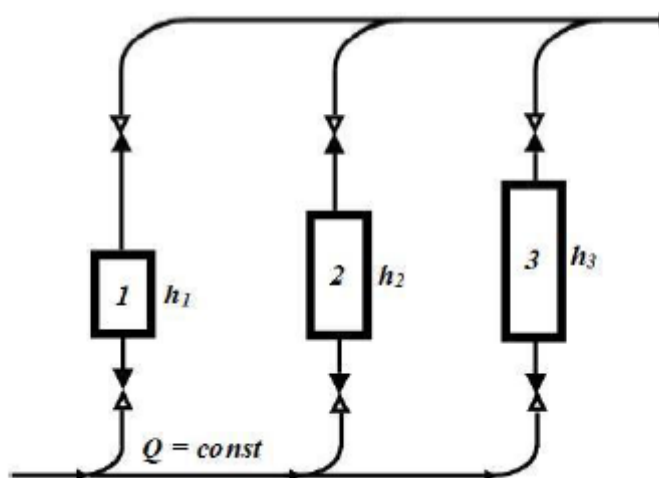


Рисунок 3 – Схема розташування фільтроохолоджувальних елементів у експериментальному варіанті фільтроохолоджувальної установки

Такі умови проведення експерименту дозволять знайти оптимальне співвідношення розмірів ФОВ та їх кількості у ФОВ. При цьому максимальна кількість ФОВ не повинна перевищувати чотирьох (за умови компоновки СЕУ).

При визначенні габаритів та/або кількості робочих елементів усі виміри виробляються в режимі ручного управління. При закипанні, миттєвому забрудненні або виносі в димохід фільтруючої води необхідно переключати потік на елемент із найбільшими габаритними розмірами або включити в роботу всі елементи одночасно.

До початку виконання вимірювання необхідно за допомогою газоаналізатора перевірити відповідність величини вхідної концентрації NO_x і SO_x у ВГ відомим даним для

відповідного виду палива. У випадку сильної розбіжності цих показань (більш 20 %) виміри не проводяться.

Ефективність процесів фільтрації та охолодження ВГ ДДВ СЕУ визначається за величиною поверхні контакту газової та рідинної складової всередині фільтруючого елемента. З метою її зміни необхідно конструктивним способом забезпечувати генерацію в нижній частині ФОВ газових пухирців різного діаметра, вибрати та установити кут нахилу направляючих пластин усередині ФОВ таким чином, щоб забезпечити максимально довгий контакт ВГ з рідиною.

Пошаровий вимір температури суміші за висотою ФОВ необхідно виконувати після стабілізації режиму роботи СЕУ. З метою зниження розкиду отриманих даних виміри повинні виконуватися не менш восьми разів у кожному створі ФОВ із наступним їх усередненням.

Визначення оптимальної швидкості подачі ВГ у ФОВ та вимір градієнта спаду температури у ФОВ варто визначати шляхом варіації швидкості подачі ВГ.

Вимір градієнта падіння концентрації NO_x та SO_x залежно від площі контактної взаємодії фаз “газ”-“рідина” виконується зміною діаметра пухирців ВГ у входному перетині ФОВ. Зміна розміру пухирців відбувається за рахунок використання двох варіантів плоских роздавальних колекторів.

На їх поверхні рівномірно та симетрично розташовуються отвори однакових діаметрів. Габаритні розміри кожного роздавального колектора повинні відповідати внутрішнім розмірам фільтруючого елемента, а діаметр отворів у першому випадку повинен складати 6 мм, а в іншому 10 мм.

Заповнення елемента фільтруючою рідиною повинно здійснюватися до рівня $0,85H$, де H – висота його робочої камери ФОВ, знята за внутрішнім розміром. Незаповнений об’єм камери забезпечить наявність простору для пінного малодисперсного пухирцевого шару, що неминуче буде утворюватися при виході ВГ з води.

Частина води буде виноситися ВГ, отже для затримки крапель води необхідно у верхній частині фільтруючої камери встановлювати краплевідбійники (рис. 4).

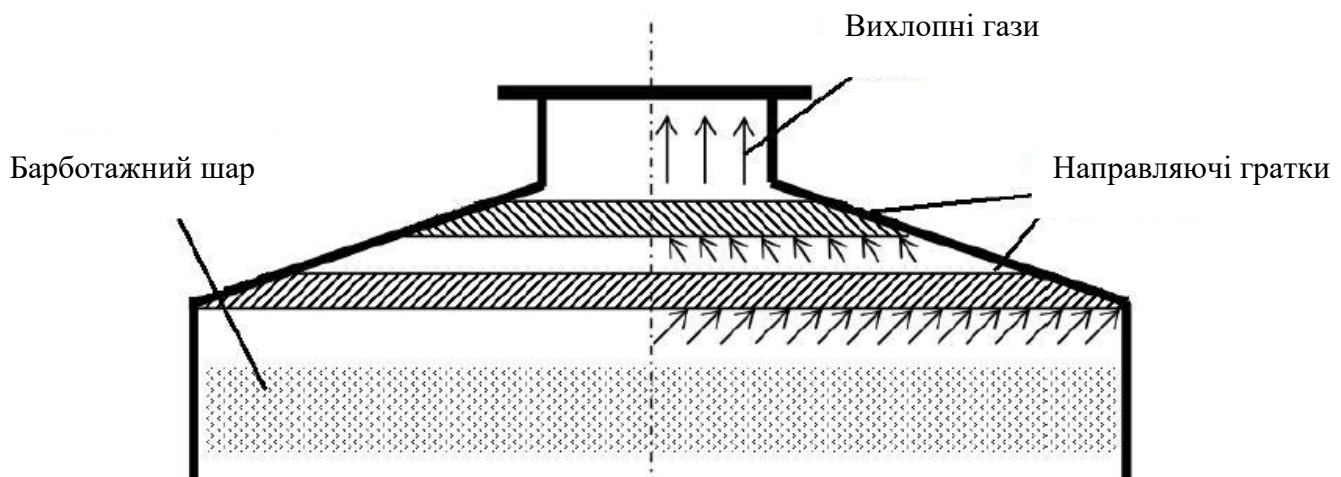


Рисунок 4 – Розташування граток для уловлювання крапель води

При наявності двох граток, що містять односпрямовані рівнобіжні канали, волога буде конденсуватися на поверхні пластин, і при укрупненні крапель за рахунок сил гравітації вони будуть стікати назад у воду. Частина вологи, що буде виноситися ВГ, потрапить у канали інших граток, маючи інший напрямок потоку в порівнянні з першими гратками з поворотом на 90° . Це призведе до додаткової турбулізації газу й конденсації дрібних

крапель води на поверхні направляючих ґраток, викликаючи додатковий аеродинамічний опір газу.

Висновки. У ході дослідження встановлені термодинамічні характеристики протікання процесу барботажу в системі “газ”-“рідина” та конструктивні характеристики засобів забезпечення умов його протікання у ФОЕ для:

– прогнозу протікання процесу барботажу газу в нерухомій рідині у вигляді математичної моделі, що встановлює закони зміни температури, маси й швидкості руху газової складової у вертикальній площині перетину ФОЕ і представлених у виді системи трьох нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних;

– адаптації математичної моделі процесу барботажа (18) до моделей конструювання ФОЕ шляхом чисельної лінеаризації, здійсненої методом кінцевих різниць диференціальних рівнянь першого порядку;

– установки обмежень на діапазони зміни термодинамічних параметрів й умов протікання процесу за допомогою конструктивних особливостей ФОЕ, представлених у вигляді рекомендацій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів / С. В. Сагін. // Одеса : НУ «ОМА». – 2018. – №38. – С. 139–149..
2. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат під час експлуатації довгоходових дизелів морських суден / С. В. Сагін, Т. О. Столярик // Матеріали 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 08-10 вересня 2020 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2020. – С. 174-176.
3. Ареф'єв М.М. Розробка принципової схеми установки для зниження шкідливих викидів з відпрацьованими газами судових двигунів. XXII Сесія молодих вчених, технічні науки, Том 2, 2017. С. 192-195.
4. Голиков В. А. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології / В.А. Голиков, О. А. Онищенко // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2017. – № 37. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 13-27.
5. Солодовніков В. Г. Удосконалення системи паливopідготовки судових середньооберткових дизелів шляхом зниження концентрації компонентів, що містять сірку: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03: захищена 03.02.16 / Солодовніков Валерій Григорович. – Одеса, 2016. – 201 с.
6. Шевченко В. А., Онищенко О. А. Проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності тенденції розвитку складних судових технічних систем і комплексів. 4th International scientific and practical conference “Perspectives of world science and education” (December 25-27, 2019) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. 2019, p.p. 995-1005.
7. Голиков В. А., Голубев М. В. Управление процессом фильтрации продуктов сгорания на судовых энергетических установках / В. А. Голиков, М. В. Голубев // Одесса: Куприенко. – Сборник научных трудов SWorld, 2013. Т.2. – С.15-18.
8. Sagin S. V. Estimation of Operational Properties of Lubricant Coolant Liquids by Optical Methods / S. V. Sagin, V. G. Solodovnikov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12. – Num. 19. – P. 8380-8391.
9. Антонов, А. В. Системный анализ: учеб. для вузов / А. В. Антонов – М.: Высш. шк., 2004. – 454 с.

REFERENCES

1. Sagin S.V. Reduction of energy losses in precision steam fuel equipment of ship diesels / S. V. Sagin // Odesa: NU "OMA". – 2018. – №38. – P. 139–149..
2. Sagin S. V. Reduction of energy losses during the operation of long-range diesel engines of marine vessels / S. V. Sagin, T. O. Stolaryk // Materials of the 11th International Scientific and Practical Conference "Modern energy installations on transport and technologies and equipment for them maintenance", September 8-10, 2020 - Kherson: Kherson State Maritime Academy. – 2020. – P. 174-176.
3. Arefiev M.M. Development of the principle scheme of the installation for reducing harmful emissions with exhaust gases of ship engines. XXII Session of Young Scientists, Technical Sciences, Volume 2, 2017. P. 192-195.
4. Golikov V.A. Development of modern theory and practice of technical exploitation of the sea and river fleet: concepts, methods, technologies / V.A. Golikov, O. A. Onyshchenko // Naval power plants: scientific and technical. Sat. – 2017. – No. 37. – Odesa: NU "OMA". - P. 13-27.
5. Solodovnikov V.G. Improvement of the fuel preparation system of marine medium-speed diesel engines by reducing the concentration of sulfur-containing components: abstract of the dissertation. Ph.D. technical Science: 05.05.03: protected 02.03.16. - Odesa, 2016. - 201 p.
6. Shevchenko V. A., Onyshchenko O. A. Problems of improvement, increase in energy efficiency and development trends of complex ship technical systems and complexes. 4th International scientific and practical conference «Perspectives of world science and education» (December 25-27, 2019) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. 2019, year 995-1005.
7. Golykov V. A., Golubev M. V. Control of the process of filtration of combustion products on ship power plants / V. A. Golykov, M. V. Golubev // Odessa: Kuprienko. – Collection of scientific works SWorld, 2013. Volume 2. - P.15-18.
8. Sagin S. V. Estimation of Operational Properties of Lubricant Coolant Liquids by Optical Methods / S. V. Sagin, V. G. Solodovnikov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12. – Num. 19. – P. 8380-8391.
9. Antonov A. V. System analysis: textbook for universities / A. V. Antonov – M.: Vyssh. school.

Tymoshchuk O., Borina M.

RESEARCH OF METHODS OF ENHANCING THE ENVIRONMENTAL FACILITY OF SHIP POWER PLANTS IN THE AQUATIC ENVIRONMENT

Increasing the environmental friendliness of ship power plants (SEU) is an important and urgent task related to the strengthening of environmental requirements for emissions of NO_x, SO_x and CO_x by international organizations, the expansion of control zones (special areas) for emissions in the sea space, drawing the attention of shipbuilders to the issue of environmental friendliness. As a result of calculations using the developed mathematical model, it was concluded that it is necessary to install guide plates inside the FOE, which will allow to increase the temperature difference in the gas flow due to the increase in the size of HV bubbles during the rise. In the course of the research, it was established that the speed of the rise of gas bubbles inside the FOE reaches a constant value within three seconds of the start of movement, and does not depend on the speed of their introduction or the viscosity of the resulting gas-liquid mixture. In order to increase the efficiency of the process of filtering shipboard gas, it is necessary to increase the contact surface of gas bubbles with the liquid inside the FOE in the liquid. Structurally, this can be done by generating gas bubbles of the maximum diameter in the lower part of the element and choosing the angle of inclination of the guide plates inside the FOE, in such a way as to ensure the longest possible contact of the HV with the liquid.

Keywords: environmental friendliness. methods, power plants, water environment

АВТОРИ ВИПУСКУ

Бажак Ольга Валеріївна	–	старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-0598-5235
Боріна Маргарита Вікторівна	–	здобувачка кафедри навігації та управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій
Бойко Анна Дмитрівна	–	старший викладач кафедри інфраструктури та інноваційних технологій водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій https://orcid.org/0000-0002-1387-3164
Бойко Світлана Олексіївна	–	доктор філософії, доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій
Білоусов Євген Вікторович	–	професор, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, https://orcid.org/0000-0001-8185-8209
Ганношина Ірина Миколаївна	–	доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри навігації та управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0001-5810-2462
Гімпель Роман Михайлович	–	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-0546-6654
Голікова Владислава Володимирівна	–	доцент, кандидат медичних наук, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри безпеки життєдіяльності, https://orcid.org/0000-0003-1946-4609
Горбань Анатолій Вікторович	–	доцент, кандидат історичних наук, доцент кафедри теоретичної та прикладної економіки, Державний університет інфраструктури та технологій https://orcid.org/0000-0002-3396-0898
Дакі Олена Анатоліївна	–	доктор технічних наук, професор, директор Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-3932-462X
Давидов Володимир Семенович	–	доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри навігації і управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0002-4985-1143

Довгаль Іван Іванович	–	здобувач кафедри завідувач кафедри енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації, Державний університет інфраструктури та технологій
Доронін Володимир Васильович	–	доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри навігації і управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0002-8387-2992
Іваненко Віталій Миколайович	–	старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-3271-5257
Kristine Carjova	–	доктор інженерних наук, ректор Латвійської морської академії, https://orcid.org/0000-0002-3941-8055
Калініченко Євгеній Володимирович	–	доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри навігації і керування судном Одеського Національного Морського Університету, https://orcid.org/0000-0003-2898-7313
Калініченко Тетяна Валентинівна	–	здобувачка кафедри навігації та управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-3531-8281
Коскіна Юлія Олексіївна	–	доктор технічних наук, доцент, професор кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету, https://orcid.org/0000-0002-3164-6504
Крайнова Вероніка Іванівна	–	старший викладач кафедри безпеки життєдіяльності, Національний університет «Одеська морська академія»
Кукалець Людмила Миколаївна	–	старший викладач кафедри судових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0001-5904-0371
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
Ліганенко Віталій Валерійович	–	старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0002-6523-4137
Любарець Ігор Олександрович	–	здобувач кафедри навігації і управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0003-1810-1435
Маннапова Оксана Володимирівна	–	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних

		дисциплін Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0002-6871-3272
Маслов Ігор Захарович	–	доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і систем Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», https://orcid.org/0000-0003-1759-6077
Мельник Ольга Володимирівна	–	Доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0002-0089-6535
Нікітін Павло Володимирович	–	доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри навігації та управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій
Онищенко Олег Анатолійович	–	професор, доктор технічних наук, заслужений діяч науки і техніки України, кафедра технічної експлуатації флоту Національного університету Одеська морська академія, https://orcid.org/0000-0002-3766-318865029 .
Парменова Дана Георгіївна	–	доцент, кандидат технічних наук, Національний університет «Одеська морська академія», завідувач кафедри безпеки життєдіяльності, https://orcid.org/0000-0001-7794-8586
Пліта Леонід Леонідович	–	доктор філософії, доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0001-6422-444X
Постніков Євген Євгенович	–	здобувач кафедри суднові енергетичні установки, Одеського Національного Морського Університету, https://orcid.org/0000-0001-7327-5353
Рибальченко Микола Євгенович	–	здобувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, https://orcid.org/0000-0003-3533-3967
Рященко Оксана Іванівна	–	старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті, Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0002-9242-0752
Сапіга В'ячеслав Володимирович	–	доцент, кандидат технічних наук, кафедра корабельної енергетики та електроенергетичних систем Інституту Військово-Морських Сил ”, https://orcid.org/0000-0002-2752-5152 .
Сінюта Катерина Олександрівна	–	здобувачка, Національний університет «Одеська морська академія», асистент кафедри теорії та устрою судна, https://orcid.org/0000-0003-1526-6912

Сорока В'ячеслав Володимирович	–	здобувач кафедри завідувач кафедри енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0002-7581-7141
Сьомін Олексій Анатолійович	–	доцент, кандидат технічних наук, декан факультету експлуатації технічних систем на водному транспорті, Державний університет інфраструктури та технологій
Тимошук Олена Миколаївна	–	професор, д.т.н., професор кафедри навігації та управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-3684-6182
Трофименко Ірина Валеріївна	–	доктор філософії, доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій
Федунов Валерій Миколайович	–	старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0001-5092-2511
Фуклев Олег Іванович		здобувач кафедри навігації і управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0002-9674-3743
Шуміло Олександр Миколайович	–	доцент, кандидат технічних наук, кафедра суднових енергетичних установок і технічної експлуатації Одеського національного морського університету, https://orcid.org/0000-0003-0574-1951 .

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

1. До друку у збірнику наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій «Водний транспорт» приймаються лише наукові статті, які мають такі необхідні елементи: **постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.**

2. Стаття має відповідати тематичному спрямуванню журналу і бути завізована власноручно підписом автора. Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.

Разом з текстом статті і електронним носієм із записаним текстом до редколегії надаються: рецензія на статтю доктора наук (професора); довідка про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання, почесне звання, місце роботи, посада, номер контактного телефону, обліковий запис автора ORCID, поштова адреса).

3. Матеріал треба викладати стисло, послідовно, стилістично грамотно. Терміни та позначення повинні відповідати чинним стандартам. Не допускаються повтори, а також зайві подробиці при переказі раніше опублікованих відомостей – замість цього подаються посилання на літературні джерела. Одиниці вимірювання слід подавати лише за міжнародною системою одиниць SI чи в одиницях, допущених до застосування в Україні згідно з вимогами чинних державних стандартів.

4. До рукопису додається анотація двома мовами (українська, англійська), в якій має бути чітко сформульована головна ідея статті та коротко обґрунтована її актуальність (обсяг не менш 1000 знаків), а також ключові слова (трьома мовами, 5-10 слів).

5. Цитати, таблиці, статистичні дані, цифрові показники, що підвищують рівень аналітичних матеріалів, подаються з посиланням на джерела. Таблиці мають бути пронумеровані й мати заголовки.

6. Текстові матеріали готуються та друкуються на аркушах білого односортового паперу з використанням комп'ютерних текстових редакторів MS Word для Windows 98/2000/XP (формат A4), для набору формул використовують вбудовані редактори рівнянь, табличні матеріали можуть готуватись з використанням електронних таблиць (MS Excel). При цьому має застосовуватись шрифт Times New Roman.

7. Матеріали набирають та розміщують у послідовності: УДК – 12 пунктів, курсив (УДК повинно бути обов'язково). Розміщують зліва на сторінці; автори – 12 пунктів, напівжирний курсив. Розміщують зліва на сторінці; НАЗВА СТАТТІ – прописні літери, 12 пунктів, напівжирний. Розміщують посередині сторінки; анотація – 12 пунктів, курсив; основний текст – 12 пунктів, звичайний; ЛІТЕРАТУРА – 12 пунктів, напівжирний

8. Текст, формули, таблиці, рисунки, діаграми, схеми розміщуються на сторінці в одній колонці. Відступ першого рядка абзацу – 10 мм, інтервал між рядками – одинарний. Інтервали між елементами матеріалу такі: УДК – автори – 2; автори – назва статті – 2; назва статті – анотація – 2; анотація – основний текст – 1;

основний текст – назва таблиці (верхній край рисунка, схеми, діаграми) – 1; назва таблиці – її верхній край (нижній край рисунка, діаграми, схеми – їхні назви) – 1; нижній

край таблиці (назва рисунка, діаграми, схеми) – основний текст – 1; основний текст – ЛІТЕРАТУРА – 1; ЛІТЕРАТУРА – список літератури – 1.

Усі рисунки, таблиці, діаграми повинні мати назви та номери. Слова Рисунок, Таблиця, Діаграма, Схема та їхні номери набираються звичайним шрифтом, 12 пунктів, назви таблиць розміщуються над таблицями, а рисунків, діаграм, схем – під ними. Відривати назви від зазначених елементів забороняється.

Від рисунка до підпису і від підпису до наступного тексту потрібно відступити один інтервал. Посилання в тексті на таблиці або на рисунки даються у скороченому вигляді звичайним шрифтом: «табл. 1» або «рис.1».

Якщо таблиця не вміщається на одній сторінці, всі її колонки нумерують, а над перенесеною частиною таблиці справа надписують: «Продовження табл. 1» або «Закінчення табл. 1».

9. Графічні файли з формулами, графіками, рисунками, схемами та фотографіями повинні бути розташовані в тексті в таблиці MS Word. Номер формули проставляється справа в кінці рядка, в круглих дужках, не виходячи на поле. Формули розташовуються на сторінці по центру. Між ними та текстом витримується інтервал в один рядок.

Вводяться вони в графічному редакторі Microsoft Equation 3.0 для MS Word. Латинські літери та позначення величин (символи) набирають курсивом, українські та російські літери – тільки прямим шрифтом.

10. Список використаної літератури складається двома мовами та повинен включати не менш 10 джерел кожний. Перший (мовою оригінала джерела) відповідно до ДСТУ 7.1:2006, ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання: загальні положення та правила складання». Другий (References) латиницею (транслітерацією) з обов'язковим перекладом назви джерела на англійську мову.

11.Рекомендується при оформленні наукової статті використовувати ДСТУ 3008:2015– ЗВІТИ У СФЕРІ НАУКИ І ТЕХНІКИ. Структура та правила оформлення.

Підп. до друку 15.12.2022. Формат 60x84/8. Папір для тиражувальних апаратів.

Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 18.71. Наклад 100 прим.

Зам. № 27. Віддруковано з оригіналів.

Державний університет інфраструктури та технологій

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації

(серія КВ № 23216-13056ПР від 23.02.2018 р.)

вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

тел./факс: (044) 463-74-70, тел. (044) 417-17-57

<https://duit.edu.ua/research-activities/scientific-publications/water-transport>