

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

ЛІ ТХАНЬ БІН

УДК 629.5.01: 629.5.017

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ПРОЕКТУВАННЯ СУДНА ЗМІШАНОГО
РАЙОНУ ПЛАВАННЯ З УРАХУВАННЯМ НАВІГАЦІЙНО-ГЕОГРАФІЧНИХ
УМОВ**

Спеціальність 5.08.03 – конструювання та будування суден

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування (НУК) імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник –

доктор технічних наук, професор НУК

Соломенцев Олег Іванович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, доцент кафедри
теорії та проектування суден.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Дихта Леонід Михайлович,
Чорноморський державний університет
імені Петра Могили,

завідувач кафедри прикладної та вищої
математики;

кандидат технічних наук, доцент

Давидов Ігор Пилипович,
Одеська національна морська академія,
доцент кафедри теорії та устрою судна.

Захист відбудеться "___" _____ 2015 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: м. Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9.

Автореферат розісланий "___" _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

Коростильов Л.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Ефективність та безпека експлуатації судна є першочерговими пріоритетами під час його проектування. Різні райони плавання розрізняються ступенями інтенсивності вітро-хвильових режимів і навігаційними особливостями. Тому в процесі проектування необхідно враховувати навігаційно-географічні умови в районі плавання судна, що проектується.

Аналіз реальних навігаційно-географічних умов в низці країн разом із існуючою практикою морських перевезень вантажу, коли рейс судна включає як морську, так і річкову ділянки, привів автора до введення поняття судна змішаного району плавання (СЗРП). По-перше, функціонування такого судна пов'язане із проходженням річкових ділянок шляху, і цю обставину необхідно враховувати під час визначення його головних елементів. По-друге, судно має пройти морську ділянку шляху із досить інтенсивним хвилюванням, і саме інтенсивність хвилювання на морській ділянці і визначає район плавання судна у відповідності із Правилами класифікаційного товариства. Таким чином, поняття судна змішаного району плавання не пов'язане із визначенням району плавання згідно із Правилами. Практично судно змішаного району плавання може бути згідно із класифікацією Правил морським судном необмеженого, або обмежених районів плавання, або навіть судном змішаного плавання у залежності від інтенсивності вітро-хвильового режиму на морській ділянці.

Морські перевезення за схемою "ріка-море" відіграють важливу роль у розвитку економіки України, В'єтнаму та інших країн. Вони мають наступні переваги в порівнянні з іншими видами транспорту: низьку собівартість перевезень, високу провозоздатність. У даний час, у В'єтнамі та на Україні спостерігається стабільне зростання попиту на модернізацію і побудову СЗРП.

Детальний огляд літератури показав відсутність узагальненого методу урахування навігаційно-географічних умов районів плавання на початкових етапах проектування СЗРП.

Таким чином, **актуальність** теми дисертації обумовлена:

- необхідністю підвищення ефективності та безпеки СЗРП при різних умовах експлуатації;
- стабільним зростанням попиту на модернізацію і побудову СЗРП;
- відсутністю узагальненого методу урахування навігаційно-географічних умов районів плавання на початкових етапах проектування СЗРП.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертація включає результати досліджень, отриманих при виконанні фундаментальної д/б науково-дослідної роботи "Розробка методики визначення параметричної надійності суден на початкових етапах їх проектування " № ДР 0111U002319, "Удосконалення ефективності та надійності малих та швидкісних металевих суден" № ДР 0113U000244 Кафедри теорії та проектування суден, НУК, а також результати досліджень, отриманих відповідно до державної програми "Розвиток океанської економіки і будівництва суден В'єтнаму" №1601/QĐ-TTg.

Мета наукового дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення методу проектування суден змішаного району плавання з урахуванням навігаційно-географічних умов (співвідношення між частинами річкової та морської ділянок

шляху, гідрометеорологічних умов та даних метеорологічних прогнозів) для початкової стадії проектування.

Основні задачі наукового дослідження. Для реалізації цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити базу даних вантажних суден і створити математичну модель вантажних СЗРП з урахуванням навігаційно-географічних умов.

2. У складі зазначеної моделі удосконалити методи оцінки і розробити нові пропозиції щодо підвищення морехідності і безпеки плавання проектного судна.

3. Сформулювати і вирішити оптимізаційну задачу з вибору головних елементів вантажних СЗРП з урахуванням навігаційно-географічних умов на початковій стадії проектування.

4. Виконати дослідження математичної моделі на стійкість до змін вихідних даних і на чутливість до відхилень параметрів, що оптимізуються, від оптимальних значень.

Об'єктом дослідження є вантажне судно змішаного району плавання.

Предметом дослідження є процес проектування вантажного судна змішаного району плавання.

Методи дослідження. В основу виконаної роботи покладено теоретичні методи дослідження, відомі з теорії корабля і теорії проектування суден. Це методи регресійного аналізу в розрахунках навантаження мас судна, що проектується, а також методи спектральної теорії випадкових процесів у розрахунках морехідності судна. Для вирішення оптимізаційної задачі було застосовано методи нелінійного програмування, а саме: для переходу від оптимізаційної задачі з обмеженнями до задачі без обмежень – метод внутрішньої точки (або бар'єрних функцій) з використанням функції Лагранжа, для вирішення оптимізаційної задачі без обмежень – метод безумовної мінімізації другого порядку, заснований на квазі-методі Ньютона.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що розроблена ММ СЗРП, є значно повнішою у порівнянні з раніше створеними ММ. Розроблена ММ враховує вимоги до безпеки плавання та особливості експлуатації СЗРП. Результати роботи забезпечують швидке сходження процесу проектування СЗРП за рахунок отриманих в дисертації аналітичних взаємозв'язків і співвідношень.

У результаті досліджень:

1. Вперше отримано формули для визначення забезпеченості розрахункової амплітуди хвилювання з урахуванням метеопрогнозу шляхом застосування для ординат хвилювання закону Пірсона типу I і формул повної ймовірності, що дає можливість більш обґрунтовано визначати параметри, пов'язані із вимушеним зниженням швидкості вантажного СЗРП на хвилюванні.

2. Вперше на основі методу критичних точок отримано залежність для визначення коефіцієнта загальної повноти вантажного СЗРП, яка на відміну від існуючих підходів враховує у явному вигляді осереднену по терміну служби інтенсивність хвилювання в районі експлуатації судна, що дає можливість більш обґрунтовано обчислювати цей коефіцієнт.

3. Вперше запропоновано схему вибору забезпеченості умовної розрахункової амплітуди бортової хитами в задачі нормування остійності вантажного СЗРП на

основі розрахунку ймовірності перекидання і середнього часу життя на стаціонарному вітро-хвильовому режимі з використанням методу критичних точок, що дає можливість забезпечити під час проектування судна наближену непрямую оптимізацію співвідношення між безпекою плавання та економічною ефективністю.

4. Удосконалено метод розрахунку вимушеного зниження швидкості вантажного СЗРП на хвилюванні шляхом розробки на основі теорії хитавиці судна на нерегулярному хвилюванні модифікованих критеріїв слемінгу та заливття, що дало можливість підвищити точність розрахунків економічних показників вантажних СЗРП.

5. Отримала подальший розвиток математична модель визначення головних елементів вантажних СЗРП з урахуванням співвідношення між частинами річкової та морської ділянок шляху, гідрометеорологічних умов та даних метеопрогнозів, що дає можливість підвищити ефективність процесу проектування цих суден.

6. Отримали подальший розвиток метод внутрішньої точки і метод модифікованих функцій Лагранжа шляхом знайдення штрафних коефіцієнтів за критерієм найшвидшої збіжності оптимізаційного процесу в математичній моделі вантажного СЗРП, що дало можливість зrealізувати задачу оптимізації головних елементів вантажного СЗРП та розробити відповідне прикладне програмне забезпечення.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати можуть бути використані для визначення головних елементів проектного судна змішаного району плавання з урахуванням навігаційно-географічних умов на початковій стадії проектування.

Результати дослідження математичної моделі на стійкість до величини гранично допустимої осадки можуть бути застосовані при плануванні днопоглиблювальних робіт на річкових ділянках шляху проєктованих суден.

Результати розрахунків із використанням програми оптимізації головних елементів судна "RSAVShip" можуть бути використані у проектно-конструкторських та дослідницьких організаціях для вибору оптимальних головних елементів судна, що проектується.

Впровадження результатів. Отримані в дисертації результати використано при вирішенні задач з проектування суден в ПАТ "Чорноморсуднопроект", м. Миколаїв, Україна, а також в конструкторському бюро Інституту науки і технології суднобудування (SSTI), м. Ханой, В'єтнам.

Отримані у роботі теоретичні результати використано при підготовці та читанні лекційних курсів "Ймовірнісна динаміка морських систем", "Додаткові розділи динаміки корабля" і "Моделі функціонування суден" в Національному університеті кораблебудування ім. адм. С.Й. Макарова, м. Миколаїв, Україна.

Отримані теоретичні результати впроваджено також в навчальний процес факультету суднобудування В'єтнамського морського університету (м. Хайфонг, В'єтнам) при підготовці і читанні лекційних курсів "Морехідність і керування судна" і "Автоматизоване проектування суден".

Особистий внесок здобувача у отриманні наведених у дисертації наукових результатів полягає у розробці ММ СЗРП з урахуванням навігаційно-географічних умов.

У складі ММ здобувачем було розроблено:

- методи розрахунків характеристик морехідності СЗРП при його проектуванні;
- схему визначення середньоквадратичної помилки метеопрогнозу;
- схему визначення забезпеченості амплітуд хвиль з урахуванням помилки метеопрогнозу;
- схему визначення ймовірності перекидання і середнього часу життя судна до перекидання згідно з енергетичним критерієм.
- алгоритм і програмний комплекс "RSAVShip" оптимізації головних елементів судна, а також оцінку ступеня впливу окремих головних елементів на ефективність експлуатації судна.

Апробація роботи. Результати роботи доповідалися на наступних науково-технічних конференціях:

1. На Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю "Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд", Миколаїв (23–25 травня 2012 р., 22–24 травня 2013 р. і 21–23 травня 2014 р.).

2. На Міжнародній науково-технічній конференції "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці", Миколаїв (9–11 жовтня 2013 р. і 8–10 жовтня 2014 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць (з них 4 роботи без співавтора), у тому числі: 5 наукових статей у збірниках наукових праць НУК, 1 наукова стаття в електронних наукових працях "Вісник НУК", 1 наукова стаття у збірнику наукових праць В'єтнамського морського університету та 5 публікацій у збірниках матеріалів українських науково-технічних конференцій.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел літератури і 2 додатків. Дисертація містить 203 сторінки основного матеріалу, 44 рисунки, 38 таблиць, 202 найменування літературних джерел. Обсяг додатків – 30 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання роботи.

У **першому розділі** дисертації було досліджено навігаційно-географічні умови району Південно-Китайського моря, прийнятого для розрахункового району плавання. Проаналізовано стан ринку морських перевезень і флоту суховантажних суден В'єтнаму.

Виконано огляд літератури з проектування вантажних СЗРП. За загальними принципами проектування суден обмежених районів плавання можна назвати роботи В.В. Ашика, А.В. Броннікова, О.Й. Гайковича, Л.М. Ногіда та інших. Більш новий підхід до проектування СОРП представлено в роботах Г.В. Єгорова на основі теорії ризику. Крім того, для СЗРП було проведено огляд літератури по морехідності, остійності, ходовості і міцності для випадків плавання на морі і на річці. Основними посиланнями є роботи Ю.О. Нецветаєва, Г.В. Бойцова, О.Є. Літонова, Ф.Г. Канделя, В.М. Шаца, Г.В. Єгорова.

Розроблено базу даних в'єтнамських суховантажних суден і виконано її аналіз. В результаті отримано наближені формули для визначення головних розмірів СЗРП

(довжини L , ширини B та осадки d) у функції від дедвейту DW на початковій стадії проектування (табл. 1).

Для розрахунку маси металевого корпусу судна проведено регресійний аналіз даних і отримано відповідний вимірник маси p_{MK} в залежності від водотоннажності Δ , при цьому $p_{MK} = 0,1456 + 1,88 \cdot 10^{-6} \Delta$, де Δ – в тонах.

Таблиця 1 – Зведена таблиця залежностей головних розмірів СЗРП від дедвейту

Найменування	Вираз	R^2
Залежність L від DW	$L = -9,65E-7DW^2 + 1,27E-2DW + 44,81$	0,884
Залежність B від DW	$B = 7,079E-8DW^2 + 5,648E-4DW + 10,23$	0,912
Залежність d від DW	$d = 1,113E-8DW^2 + 4,642E-4DW + 3,774$	0,823

Отримано нову формулу для визначення коефіцієнта загальної повноти, яка враховує хвильовий режим в районі експлуатації СЗРП. На відміну від існуючих формул для визначення коефіцієнта загальної повноти, додатково враховувався вплив додаткового опору руху судна на хвилях. Для цього було використано довгостроковий розподіл висот хвиль 3%-забезпеченості. Параметром цього розподілу є зведений стандарт висоти хвиль 3%-забезпеченості S_h , усереднений по районах експлуатації судна, з урахуванням відносної протяжності морських і річкових ділянок рейсу. У роботі отримано узагальнену залежність виду:

$$C_B = A_6(S_h) - B_6(S_h)Fr,$$

де коефіцієнти $A_6(S_h)$ і $B_6(S_h)$ отримано методом критичних точок.

Проведено розрахунки для суден з відношенням $L/B = 6,5 - 7,5$ і $B/d = 2,0 - 3,0$ при різних значень S_h і було отримано формули для визначення коефіцієнта загальної повноти. На рис. 1 показано графіки значень коефіцієнта загальної повноти при різних постійних числах Фруда в залежності від S_h .

При традиційному підході, коли приймається $S_h = 0$, отримані в роботі результати задовільно співпадають з існуючими даними, і коефіцієнт загальної повноти досягає в цьому випадку при числах Фруда $Fr < 0,14 - 0,15$ величин порядку $0,88 - 0,90$.

У цьому розділі також розглянуто питання, що стосуються визначення розрахункової висоти хвилі для СЗРП з урахуванням метеорологічних прогнозів. Передбачається, що прогноз хвилювання характеризується прогнозованою амплітудою хвилі r_{Π} і середньоквадратичною похибкою прогнозу δr_{Π} . На підставі центральної граничної теореми теорії ймовірностей передбачається також, що прогнозована амплітуда хвилі є випадковою величиною, яка розподілена за нормальним законом з математичним сподіванням $\overline{M}_{\Pi}$ і з дисперсією $D_{\Pi} = \delta r_{\Pi}^2$. При цьому математичне очікування $\overline{M}_{\Pi}$ і видається як прогноз, а δr_{Π} є середньоквадратична похибка прогнозу. Для опису морського хвилювання в роботі було прийнято за основу закон розподілу для амплітуд хвиль, який, в свою чергу, заснований на закон розподілу Пірсона типу I для ординат хвиль. Далі за формулою повної ймовірності було отримано залежність для розрахункової забезпеченості висоти хвилі з урахуванням середньоквадратичної похибки прогнозу δr_{Π} .

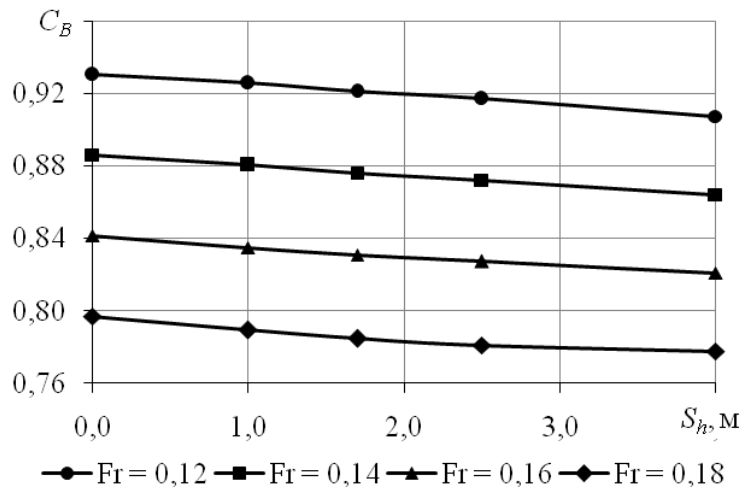


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта загальної повноти від зведеного стандарту висоти хвиль 3%-забезпеченості S_h

Визначення цієї похибки також розглянуто в роботі. На практиці можливі два типи похибок прогнозу:

1. Похибка першого роду, яка пов'язана з неточним прогнозуванням фактичної амплітуди хвилі, середньоквадратичне значення цієї похибки є $\delta r_{\Pi 1}$.

2. Похибка другого роду, яка пов'язана з несвоєчасним прогнозуванням величини фактичної амплітуди хвилі, яка охарактеризована середньоквадратичної похибкою амплітуди хвилі $\delta r_{\Pi 2}$.

Помилки першого і другого роду допустимо прийняти незалежними один від одного. Тоді сумарна середньоквадратична помилка δr_{Π} визначиться як:

$$\delta r_{\Pi} = \sqrt{\delta r_{\Pi 1}^2 + \delta r_{\Pi 2}^2}.$$

Помилка першого роду визначається шляхом апостеріорного статистичного зіставлення прогнозних і фактичних амплітуд хвиль, в даній роботі питання її визначення не розглядається. Визначення помилки другого роду в роботі розглянуто. Нехай T_{Π} – час попередження метеопрогнозу, а час $\tau_{\Pi} \geq 0$ є перевищенням фактичного ходового часу судна над часом попередження метеопрогнозу, де L_B – випадкова відстань судна від порту (місця) – притулку в момент отримання ним метеопрогнозу; V_s – розрахункова швидкість ходу судна на тихій воді; а η_v – коефіцієнт зниження швидкості ходу на хвилюванні. Відповідно до означення помилки прогнозу другого роду при $\tau_{\Pi} = 0$ маємо $\delta r_{\Pi 2} = 0$ і при $\tau_{\Pi} > 0$ маємо $\delta r_{\Pi 2} > 0$. В якості прогнозу видається найбільша амплітуда хвилі $[r_{\Pi}]$ або її висота $[h_{\Pi}] = 2[r_{\Pi}]$, яка пов'язана з висотою хвилі 3%-забезпеченості $h_3 = [h_{3\Pi}]$ на цьому ж хвильовому режимі формулою, яка отримана шляхом апроксимації графіка Д.М. Ананьєва і має вигляд $[h_{3\Pi}] \approx 0,425[h_{\Pi}]^{1,25}$.

У роботі наведено алгоритм, що дозволяє зв'язати між собою безрозмірну середньоквадратичну похибку прогнозу другого роду $\delta \bar{r}_{\Pi 2} = \frac{\delta r_{\Pi 2}}{\sqrt{[D_{r\Pi}]}}$ і безрозмірний час $\bar{\tau}_{\Pi} = \tau_{\Pi}/T_{\Sigma}$, де T_{Σ} – половина ходового часу судна. Результати розрахунків за цим

алгоритмом наведено на рис. 2. Цей графік характеризує те, як безрозмірна середньоквадратична похибка прогнозу $\delta \bar{\tau}_{П2}$ залежить від того, як в загальному балансі половини ходового часу судна T_{Σ} співвідносяться частина часу $T_{П}$, охоплена прогнозом, і частина часу $\tau_{П}$, яка прогнозом не охоплена.

У **другому розділі** було розглянуто питання безпеки судна, пов'язані із забезпеченням його остійності в умовах хвилювання і вітру. Виконаний аналіз існуючих правил і норм дав наступні результати.

Спочатку (починаючи з 1950-х р.) норми остійності, обмежуючись розглядом тільки одного бортового коливання, що вважалося екстремальним, були орієнтовані на випадок дії на судно регулярних хвиль. Починаючи з 1960-х р., в нормативах стала розглядатися остійність судна під дією нерегулярних хвиль. Разом з тим була збережена перевірка остійності судна за колишньою схемою, для одного екстремального коливання. А це привело до протиріччя при визначенні умовної розрахункової амплітуди бортової хитавиці θ_a . Припускаючи, що амплітуди бортової хитавиці розподілені за законом Релея, знайдемо, що $\theta_a = \sqrt{-2 \ln P_{\theta} D_{\theta}} = \sqrt{2 \ln N_{Ц} D_{\theta}}$, де D_{θ} – дисперсія ординат бортової хитавиці, P_{θ} –

розрахункова забезпеченість і $N_{Ц} = \frac{1}{P_{\theta}}$ – кількість циклів бортових коливань за час дії стаціонарного хвильового режиму заданої інтенсивності. Але при розгляді одного екстремального коливання маємо $N_{Ц} = 1$ і відповідно $\theta_a = 0$.

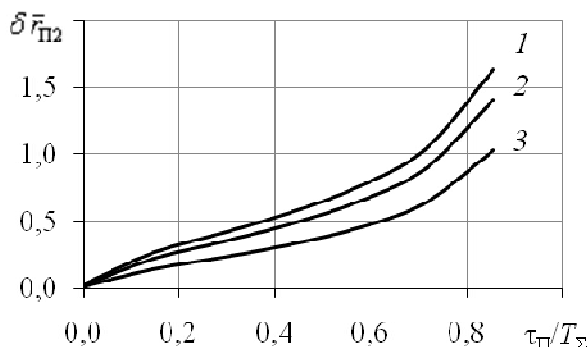


Рисунок 2 – Залежність безрозмірної середньоквадратичної похибки прогнозу $\delta \bar{\tau}_{П2}$ від відношення $\tau_{П}/T_{\Sigma}$ при різних середніх швидкостях вітру $u_{В}$:

1 – $u_{В} = 30$ м/с; 2 – $u_{В} = 20$ м/с; 3 – $u_{В} = 10$ м/с

Прийняття тієї чи іншої величини m_{θ} істотно впливає на результати перевірки остійності за тими чи іншими нормами. У діючих нормах параметр $m_{\theta} = \sqrt{-2 \ln P_{\theta}} = \sqrt{2 \ln N_{Ц}}$ не дорівнює, звісно, 0 і коливається в межах від 2,1 до 3,0. Однак переконливі обґрунтування тієї чи іншої величини m_{θ} в коментарях до норм відсутні – та їх і неможливо дати, залишаючись в рамках прийнятих у більшості норм припущень. У роботі було отримано формули, які виявляють явний зв'язок між забезпеченістю амплітуди бортової хитавиці P_{θ} і умовної ймовірності перекидання судна $P_O(O/X)$ в рамках прийнятих в нормах класифікаційних товариств припущень (множина X). Тоді при нормуванні остійності величини P_{θ} і m_{θ} виявляються

пов'язаними з неявно закладеною в норми нормативною ймовірністю перекидання і в перспективі повинні – так само, як і аналогічні величини при нормуванні міцності – визначатися на основі техніко-економічного обґрунтування. У роботі запропоновано попереднє наближене вирішення цієї проблеми, засноване на методі критичних точок.

З цією метою в роботі розглянуто алгоритм розрахунку ймовірності перекидання судна на стаціонарному вітро-хвильовому режимі в будь-який випадковий момент часу, а також інтенсивності перекидань (функції ризику). Типовою розрахунковою ситуацією тут є дія на судно стійкого поривчастого вітру, коли на не залежну від часу постійну складову швидкості вітру накладається залежна від часу пульсацій на складова швидкості. Дія хвиль обумовлює бортову хитавицю судна. Так, нехай $M(t)$ – безперервний і хоча б один раз диференційований центрований випадковий процес зі щільністю ймовірності $\varphi_M(M)$. У загальному випадку для ймовірності відмови $P_M(M_0)$, коли під відмовою розуміється перетин процесом $M(t)$ рівня M_0 , та функції ризику $\lambda_M(M_0)$, яка також відповідає перетинанню рівня M_0 , маємо наступні залежності:

$$P_M(M_0) = \int_{M_0}^{\infty} \varphi_M(M) dM;$$

$$\lambda_M(M_0) = \varphi_M(M_0) \int_0^{\infty} \varphi_{\dot{M}}(\dot{M}) \dot{M} d\dot{M},$$

де точка зверху означає диференціювання за часом.

У даному випадку $M_0 = \Pi(\theta) = \Delta[d_{\theta\max} - d_{\theta}(\theta)] \geq 0$ і $M = K$, тут Δ – вагова водотоннажність судна; $d_{\theta\max}$ – максимальна ордината діаграми динамічної остійності; $\Pi = \Delta d_{\theta\max}$ – повний запас потенційної енергії, що викликає бортову хитавицю судна; $d_{\theta}(\theta)$ – ордината діаграми динамічної остійності, яка відповідає куту крену θ , і K – кінетична енергія судна, що здійснює бортову хитавицю.

На реальному нерегулярному хвилюванні ордината кута крену θ , $-\infty < \theta < +\infty$ є центрована нормально розподілена з дисперсією D_{θ} випадкова величина з щільністю ймовірності $\varphi_{\theta}(\theta)$. Кінетична енергія судна, що здійснює бортову хитавицю, K також є випадковою величиною з щільністю ймовірності $\varphi_K(K)$, $0 < K < +\infty$. Тоді щільність ймовірності перевищення рівня M_0 для даного конкретного випадку з урахуванням відомих співвідношень для визначення повної ймовірності приймає вигляд:

$$\varphi_M(M_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_K[\Pi(\theta)] \varphi_{\theta}(\theta) d\theta.$$

Таким чином, ймовірність перекидання та функції ризику судна визначаються за формулами:

$$P_O = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_K[\Pi(\theta)] \varphi_{\theta}(\theta) d\theta;$$

$$\lambda_O = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_K[\Pi(\theta)] \varphi_{\theta}(\theta) d\theta \int_0^{+\infty} \varphi_{\dot{K}}(\dot{K}) \dot{K} d\dot{K};$$

Щільність ймовірності $\varphi_K(K)$ і забезпеченість $P_K(K)$ кінетичної енергії судна, що здійснює бортову хитавицю, в припущенні нормальності розподілу ординат швидкостей хитавиці визначаються на основі відомих залежностей для перетворення законів розподілу функцій випадкових величин за формулою:

$$\varphi_K(K) = \frac{1}{\sqrt{2\pi K\bar{K}}} \exp\left(-\frac{K}{2\bar{K}}\right); \bar{K} = \frac{J_X + \lambda_\theta}{2} D_\theta;$$

$$P_K(K) = \int_K^\infty \varphi_K(K) dK = 1 - 2\Phi\left(\sqrt{\frac{K}{\bar{K}}}\right); \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx,$$

де D_θ – дисперсія швидкості бортової хитавиці; J_X , λ_θ – власний і приєднаний моменти інерції маси судна.

Ймовірність перекидання судна $P_O = P_{O1}$ і функція ризику λ_O розраховуються у функції коефіцієнта κ , який визначає запас динамічної остійності судна. Тоді:

$$P_{O1}(\kappa) = 1 - \sqrt{\frac{2}{\pi D_\theta}} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{\theta_\Sigma^2}{2D_\theta}\right) \mathfrak{Z}(\kappa, \theta, M_d) f_M(M_d) d\theta dM_d;$$

$$\mathfrak{Z}(\kappa, \theta, M_d) = \Phi\left(\sqrt{\kappa - \mathfrak{g}_\theta(\theta, M_d)}\right); \kappa - \mathfrak{g}_\theta(\theta, M_d) \geq 0; \kappa = \frac{\Pi(\theta)}{\bar{K}};$$

$$\mathfrak{Z}(\kappa, \theta, M_d) = 0; \kappa - \mathfrak{g}_\theta(\theta, M_d) < 0; \mathfrak{g}_\theta(\theta, M_d) = \frac{\Delta d_\theta(\theta) + \Delta\Pi_1 + \Delta\Pi_2}{\bar{K}};$$

$$\Delta\Pi_1 \approx \Delta d_\theta(\theta_C) + M_{ст}(\theta_3 - \theta_C); \Delta\Pi_2 = M_d(\theta_3 - \theta_C + \theta);$$

$$\lambda_O = \lambda_O(\kappa) = \frac{\tilde{\omega}_\theta}{\pi} \aleph_O(\kappa) = \frac{2}{\tilde{\tau}_\theta} \aleph_O(\kappa); \tilde{\omega}_\theta = \sqrt{\frac{D_{\ddot{\theta}}}{D_{\dot{\theta}}}}; \tilde{\tau}_\theta = \frac{2\pi}{\tilde{\omega}_\theta};$$

$$\aleph_O(\kappa) = \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathfrak{R}_K(\kappa, \theta, M_d) f_M(M_d) \varphi_\theta(\theta_\Sigma) d\theta dM_d;$$

$$\mathfrak{R}_K(\kappa, \theta, M_d) = 2\bar{K} \varphi_K(x) = \sqrt{\frac{2\bar{K}}{\pi \cdot x_2}} \exp\left(-\frac{x}{2\bar{K}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \bar{x}}} \exp(-\bar{x});$$

$$\bar{x} = \bar{x}(\kappa, \theta, M_d) = \frac{x}{2\bar{K}} = \frac{\kappa - \mathfrak{g}_\theta(\theta, M_d)}{2}; \kappa - \mathfrak{g}_\theta(\theta, M_d) \geq 0;$$

$$\bar{x} = \bar{x}(\kappa, \theta, M_d) = 0; \kappa - \mathfrak{g}_\theta(\theta) \leq 0.$$

Середній час життя судна на стаціонарному вітро-хвильовому режимі:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\lambda_O} = \frac{\tilde{\tau}_\theta}{2\aleph_O},$$

де θ_3 – кут заочування діаграми статичної остійності; $M_{ст}$, θ_C – статичний вітровий кренувальний момент, пов'язаний з постійною складовою швидкості вітру, і кут статичного нахилу відповідно; M_d , $f_M(M_d)$ – випадковий динамічний вітровий кренувальний момент і щільність ймовірності його ординат.

Для використання наведених вище залежностей необхідно знайти щільність ймовірності динамічного вітрового кренувального моменту $f_M(M_d)$. Для визначення цієї величини в роботі розглянуто розподіл пульсаційної складової швидкості вітру відповідно до розподілів Релея і Релея-Райса, та на підставі формул для

перетворення функцій випадкових величин отримано залежності для щільності ймовірності $f_M(M_D)$ і виконано необхідні порівняльні розрахунки.

Зрозуміло, що залежність $P_{O1} = P_{O1}(\kappa)$ є знижувальною і для підвищення безпеки плавання судна коефіцієнт запасу остійності κ , який пов'язаний з введеним раніше параметром m_θ як $m_\theta = \sqrt{\kappa}$, слід збільшувати. З іншого боку, зростання коефіцієнта запасу пов'язано з економічними втратами. Тому в перспективі можна, по аналогії з нормами міцності, ставити і вирішувати оптимізаційну задачу в частині техніко-економічного обґрунтування вибору параметрів m_θ і κ . У даній же роботі на підставі отриманих залежностей виду $P_{O1} = P_{O1}(\kappa)$ виконано наближену оптимізацію за методом критичних точок. Застосувавши до залежності $P_{O1} = P_{O1}(\kappa)$ відому побудову Ван-Ламмерена, можна знайти значення κ і m_θ такі, що подальше їх збільшення вже не призводить до значного зниження ймовірності перекидання. В рамках методу критичних точок такі значення κ і m_θ визнаються наближено оптимальними.

Чисельний приклад було виконано для контейнеровоза з наступними характеристиками: довжина між перпендикулярами $L_{\text{ПП}} = 126,80$ м; ширина по КВЛ $B = 19,40$ м; осадка $d = 7,435$ м; водотоннажність $\Delta = 12279$ т, довжина і ширина скулових кілів відповідно 35 м і 0,3 м. В розрахунках було прийнято співвідношення між початковою метacentричною висотою h_0 и шириною B у вигляді $h_0/B = 0,05$ і 0,07. Результати розрахунку наведено на рис. 3а. Для розглянутого випадку $\kappa_{01} \approx 6,3$ і відповідно $m_{\theta 1} \approx 2,51$.

Визначена за наведеними вище залежностям ймовірність $P_{O1} = P_{O1}(\kappa)$ є ймовірністю перекидання судна в будь-який момент протягом кінцевого випадкового інтервалу часу, який відраховується з моменту початку дії стаціонарного вітро-хвильового режиму в межах часу дії цього режиму.

Розглянута додатково аналогічна залежність $P_{O2} = P_{O2}(\kappa)$ для ймовірності перекидання судна за детерміновано заданий інтервал часу T , $T \leq T_{\text{СТ}}$, де $T_{\text{СТ}}$ – час існування стаціонарного вітро-хвильового режиму. Ця ймовірність знайдеться в загальному випадку як:

$$P_{O2} = \int_0^T f_{Ot}(t) dt,$$

де $f_{Ot}(t)$ – щільність ймовірності часу неперекидання судна.

Оскільки процес перекидань в модельному або чисельному експерименті може розглядатися як найпростіший пуассоновський потік подій, то $f_{Ot}(t) = \lambda_o \exp(-\lambda_o t)$, тоді після очевидних перетворень:

$$P_{O2} = 1 - \exp(-\lambda_o T),$$

а, оскільки зазвичай $\lambda_o T \ll 1$, а при $x \ll 1$ маємо $\exp(-x) \approx 1 - x$, то $P_{O2} \approx \lambda_o T$, причому $\lambda_o = \lambda_o(\kappa)$, тоді як $T \neq T(\kappa)$.

Результати чисельного розрахунку за цією формулою для судна контейнеровоза представлено на рис. 3б. Далі за методом критичних точок було знайдено оптимальне значення $\kappa_{02} \approx 4,8$. Це відповідає оптимальному значенню параметра $m_{\theta 2} \approx 2,19$.

В силу того, що закон розподілу ординат кінетичної енергії, яка спричиняє бортову хитавицю судна, відрізняється від нормального закону (він являє собою χ^2 – розподіл з одним ступенем свободи), результати застосування методу критичних точок стосовно ймовірності загибелі судна протягом кінцевого випадковим чином заданого інтервалу часу і протягом детерміновано заданого інтервалу часу виходять дещо різними. Втім, зазначене розходження невелике.

У даний час є пропозиції грецького фахівця К. Спіро, а також групи південнокорейських фахівців в частині заміни в нормах остійності методу перевірки остійності, оснований на енергетичному критерії (критерії погоди – резолюція ІМО – А.562) на метод, оснований на теорії катастроф. У такому випадку передбачається, що перекидання може наступити, якщо зовнішнє збурення перевищить ту межу, за якою починається межа ерозії русла процесу бортових коливань, і з'являються хаотичні бортові коливання. Для визначення вказаної межі в сучасних роботах застосовуються метод В.К. Мельникова, а також метод характеристичних показників А.М. Ляпунова. Практичне визначення межі ерозії русла виконується або методом статистичного моделювання, або – на основі методу В.К. Мельникова для регулярного хвилювання – аналітично.

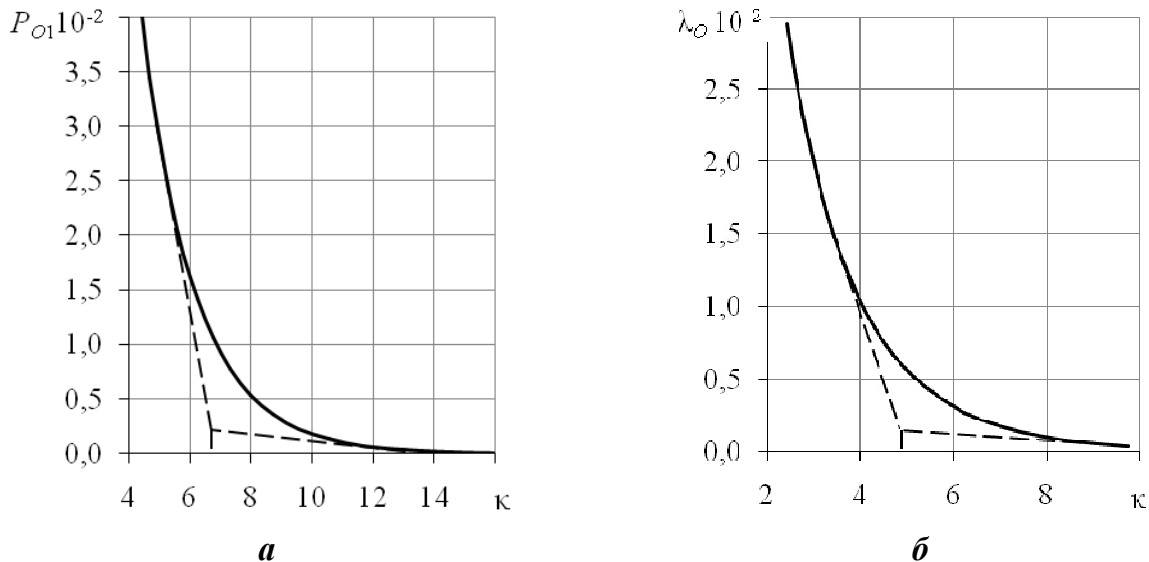


Рисунок 3 – До визначення оптимальної забезпеченості амплітуди бортової хитавиці з урахуванням вітру по ймовірності перекидання

Оскільки при використанні методу статистичного моделювання не виключено накопичення похибки, отримані аналітично за методом В.К. Мельникова значення граничного збурюючого моменту на регулярному хвилюванні узагальнено в дисертаційній роботі на випадок нерегулярного хвилювання. Це дозволило визначити ймовірність виникнення ерозії русла і хаотичних бортових коливань. З аналізу отриманих результатів випливає, що ймовірність появи хаотичних коливань набагато вище ймовірності перекидання з енергетичного критерію. Це означає, що саме по собі виникнення хаотичних (неперіодичних) коливань не обов'язково веде до зміни положення рівноваги судна від прямого положення до положення вгору кілем, як це має місце при порушенні відповідного енергетичного співвідношення. Тому рекомендації робіт у частині заміни енергетичного критерію критерієм,

заснованим на тому, що поява хаотичних коливань однозначно означає перекидання, слід до виконання додаткових досліджень вважати передчасними.

У **третьому розділі** розглянуто питання морехідності судна на зустрічному хвилюванні, пов'язані з зариванням у воду та днищовим слемінгом, і алгоритми визначення коефіцієнтів природних і вимушених втрат швидкості. При цьому, якщо на стадії початкового наближення ми враховували залежність коефіцієнта загальної повноти тільки від природних втрат швидкості (через додатковий опір при хвилюванні), то в математичній моделі судна при оптимізації його головних елементів виконано аналіз також і вимушених втрат швидкості на хвилюванні.

Для отримання критерію вимушеного зниження швидкості, пов'язаного з надмірним зариванням, була введена вимога до максимальної частоти заривання $n_3 < [n_3]$, де $[n_3] = 30$ 1/час є нормативна частота заривання.

Додатково нормативна частота заривання була уточнена за даними модельних експериментів в частині оцінок заливання судна згідно із візуальним визначенням ступеня заливання. Відповідні експерименти були виконані в 1960 р. Р. Ньютоном і Д. Муром. Потім аналогічні експерименти були повторені в 1967 р. російськими фахівцями. У всіх цих випадках розглядалося регулярне хвилювання.

Для узагальнення цих даних на нерегулярні хвилі було розглянуто систему координат $h-\lambda$, де h, λ – висота і довжина нерегулярної хвилі, $0 < h < +\infty$ і $0 < \lambda < +\infty$. Потім в цій системі координат на підставі зазначених вище експериментів було визначено функціональну залежність виду $h_{3-\lambda} = h_{3-\lambda}(\lambda)$, яка являє собою аналітичний вираз межі області $D(h, \lambda)$, вище від якої небезпечне заривання судна має місце, а нижче від якої – ні.

Нехай $f(h, \lambda)$ є спільний короткостроковий закон розподілу висот і довжин хвиль на нерегулярному хвилюванні. Тоді нормативна ймовірність заривання у хвилі $[P_3]$, пов'язана з нормативною частотою заривання $[n_3]$ як $[n_3] = 573 \tilde{\omega}_\zeta [P_3]$, визначається відповідно до формули повної ймовірності як:

$$[P_3] = \int_0^\infty \int_0^\infty f(h, \lambda) P_3(h, \lambda) dh d\lambda.$$

В цих формулах $\tilde{\tau}_\zeta$ і $\tilde{\omega}_\zeta$ – середні період і частота відносних переміщень при поздовжній хитавиці, вимірювані в сек і в 1/сек відповідно, а P_3 – ймовірність заривання при висоті хвилі h і її довжині λ .

На регулярному хвилюванні величина P_3 є булева змінна, що приймає тільки два значення (0 або 1), і яка визначається на основі зазначених вище експериментів. Це дозволяє шукати нормативну ймовірність заривання в вигляді:

$$[P_3] = \int_{(D)} \int_0^\infty \int_0^\infty f(h, \lambda) dh d\lambda,$$

Нехай тепер величини h та λ статистично незалежні, так що $f(h, \lambda) = f_h(h) f_\lambda(\lambda)$, а $f_h(h)$ і $f_\lambda(\lambda)$ являють собою розподіл Релея. Тоді:

$$[P_3] = \frac{\pi}{2\lambda^2} \int_0^\infty \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{h_{3-\lambda}(\lambda)}{\bar{h}} \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\bar{\lambda}} \right)^2 \right] \right\} \lambda d\lambda,$$

де $\bar{h}$, $\bar{\lambda}$ – середня висота і середня довжина нерегулярних хвиль.

В цьому випадку величина $[n_3]$ вже не буде постійною, а виявляється, відповідно до зазначених вище експериментів, функцією числа Фруда і висоти хвилі 3%-забезпеченості. Співставлення результатів по першому і по другому способам виконано на рис. 4. Видно, що норматив виду $[n_3] = 30$ (1/час) може бути отриманий шляхом усереднення визначеної на основі візуального визначення залежності $[n_3] = [n_3](Fr, h_3)$.

Для отримання критерію вимушеного зниження швидкості, пов'язаного з днищовим слемінгом, у роботі було застосовано:

- частотний критерій виду $n_c \leq [n_c]$, де n_c , $[n_c]$ – фактична і нормативна частоти днищового слемінгу, $[n_c] = 20$ (1/час),

- силовий критерій у формі $a_{уд} \leq [a_{уд}]$, де $a_{уд}$, $[a_{уд}]$ – фактичні і нормативні значення ударних прискорень судна як твердого тіла під час днищового слемінгу.

При цьому зі спільного рішення ізольованих диференціальних рівнянь для вертикального зсуву і диференту судна під дією короткочасного ударного навантаження випливає, що:

$$a_{уд} = \frac{F_{уд}}{M + \lambda_{\zeta}} \left[1 + \frac{(x - x_g)(x_F - x_g)}{r_y^2} \right],$$

де $F_{уд}$ – випадкова сила удару; M , λ_{ζ} – маса судна і приєднана маса при вертикальних коливаннях, що відповідає нескінченно великій їх частоті; r_y – поперечний радіус інерції мас судна, визначений з урахуванням приєднаних мас; x_F – абсциса рівнодіючої сили удару; x – абсциса точки, в якій визначається ударне прискорення; x_g – абсциса центра ваги судна.

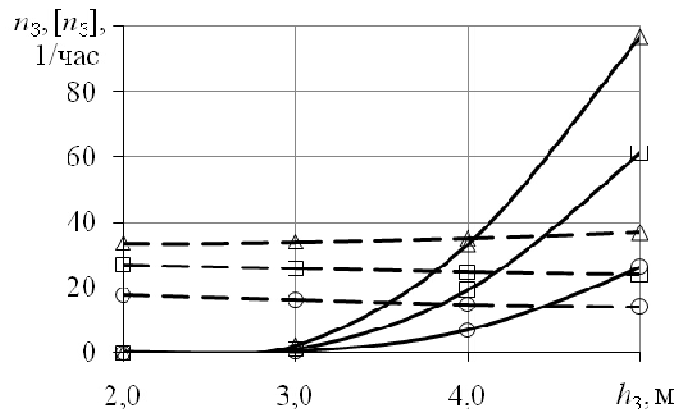


Рисунок 4 – До визначення вимушених втрат швидкості через заривання:
суцільні – фактичні частоти заривання; пунктирні – нормативні частоти заривання;
 Δ – $Fr = 0,25$; $\square$ – $Fr = 0,20$; $\circ$ – $Fr = 0,15$

Виходить, що $a_{уд} = C_a F_{уд}$, де визначення не випадкового коефіцієнта C_a не викликає ніяких труднощів, тоді як випадкова сила удару $F_{уд} = p_{уд} S_{уд}$, де $p_{уд}$, $S_{уд}$ – випадкові ударні тиски і випадкова площа удару.

В основу урахування випадковості сили удару було покладено концепцію умовного плоского днища, запропоновану Е.А. Павліною в 1969 р. Для імовірнісних оцінок було прийнято за основу залежність, відповідно до якої сила

удару визначалася достатньо складним чином (через функції Макдональда). Далі цю залежність було спрощено, і закон розподілу випадкової сили удару вдалося апроксимувати розподілом Вейбула. Забезпеченість сили удару $P_F(F_{уд})$ отримано в наступному вигляді:

$$P_F(F_{уд}) = \exp \left[- \left(\frac{F_{уд}}{a_F} \right)^{n_F} \right];$$

$$a_F = \frac{\bar{F}_{уд}}{C_F^{n_F}}; \bar{F}_{уд} = C_{уд} \kappa_F \bar{p}_{уд} \tilde{s}_{уд}^2; \tilde{s}_{уд} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\bar{\lambda} \cdot \Phi_{\zeta}(u)}{L}; \bar{p}_{уд} = K_P \rho D_{\zeta};$$

$$\Phi_{\zeta}(u_1) = [0,5 - \bar{\Phi}(u_1)] \exp \left(\frac{u_1^2}{2} \right); \bar{\Phi}(u_1) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{u_1} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx; u_1 = \frac{d}{\sqrt{D_{\zeta}}},$$

де $\bar{F}_{уд}$ – середня сила удару; a_F , n_F – параметри масштабу і форми закону Вейбула, при цьому було отримано $C_F = 1,278$ і $n_F = 0,615$; $C_{уд}$ – не випадковий коефіцієнт, що визначається за наведеними в роботі залежностями; ρ – щільність води; $\bar{p}_{уд}$ – середні в статистичному сенсі ударні тиски при днищовому слемінгу; D_{ζ} , D_{ζ} – дисперсії відносних переміщень і швидкостей відносних переміщень від повздовжньої хитамиці в розрахунковому перерізі; d – осадка носом; κ_F – коефіцієнт, що враховує кривизну поверхні удару в поздовжньому напрямку.

У роботі виконано необхідні дослідження й отримано напівемпіричні залежності для коефіцієнта κ_F .

Задля аналізу впливу ступеня впорядкованості нерегулярного хвилювання на силу удару при слемінгу було введено новий критерій, який характеризує ступінь впорядкованості морських хвиль E_r , $0 \leq E_r \leq 1$:

$$E_r = \frac{\alpha_{Br} - \alpha_{Br}^{\min}}{\alpha_{Br}^{\max} - \alpha_{Br}^{\min}}; \alpha_{Br}^{\min} \leq \alpha_{Br} \leq \alpha_{Br}^{\max},$$

де α_{Br} – фактичний параметр емпіричного спектра морського хвилювання, а $\alpha_{Br}^{\min}$, $\alpha_{Br}^{\max}$ – мінімальне і максимальне при даній інтенсивності нерегулярного хвилювання значення цього параметра.

З ростом параметра E_r , що відповідає зменшенню ступеня впорядкованості хвилювання, дисперсії відносних переміщень і їх швидкостей зменшуються.

Четвертий розділ присвячено оптимізації головних елементів СЗРП і обґрунтуванню метода оптимізації.

У розробленій моделі функціонування судна було враховано навігаційно-географічні умови – як обмеження за умовами навігації на річкових ділянках рейсу, так і вплив морехідних якостей на ефективність СЗРП на морській ділянці рейсу в районі експлуатації. Незалежними змінними (вектор $\bar{X}$) приймаються: довжина L , ширина B , висота борту D , осадка d , коефіцієнт загальної повноти C_B і швидкість у вузлах V_s .

Для вантажного судна критерієм оптимізації приймається максимальний прибуток, який визначається за формулою:

$$F = E - S,$$

де E – виражений в грошових одиницях дохід від експлуатації судна за весь термін його служби, а S – вартість життєвого циклу судна.

Величини E і S , віднесені до всього терміну служби судна, визначено у вигляді:

$$E = \kappa_B \eta_B \eta_{BM} P_B N_P T_{\text{СЛ}}; \quad S = K_B + C_E T_{\text{СЛ}};$$

$$N_P = \frac{350(1 - Q_h[h_{3\Pi}])}{T_X + T_{\text{СТ}}}; \quad Q_h([h_{3\Pi}]) = \int_0^{[h_{3\Pi}]} q_h(x) dx;$$

$$T_X = \frac{1}{12} \left(\sum_{i=1}^{N_R} \frac{L_{Ri}}{\eta_{Pi} V_S} + \sum_{j=1}^{N_S} \frac{L_{Mj}}{\eta_{Vj} V_S} \right); \quad T_{\text{СТ}} = \frac{1}{12} P_B \sum_{i=1}^{I_{\Pi}} \left(\frac{1}{M_{B1i}} + \frac{1}{M_{B2i}} \right),$$

де κ_B – вартість перевезення одиниці маси вантажу для заданої відстані між портами; P_B – вантажопідйомність судна, т; η_B – коефіцієнт використання вантажопідйомності; η_{BM} – коефіцієнт використання вантажомісткості; N_P – кількість кругових рейсів протягом року; $T_{\text{СЛ}}$ – термін служби судна, роки; K_B – капітальні витрати по судну; C_E – річні експлуатаційні витрати; T_X , $T_{\text{СТ}}$ – ходовий і стояночний час судна в одному круговому рейсі (кількість діб); L_{Ri} – протяжність i -ї річкової ділянки шляху, милі; L_{Mj} – протяжність j -ої морської ділянки шляху, милі; η_{Pi} – коефіцієнт зниження швидкості під час руху на i -й річковій ділянці шляху внаслідок обмеженої глибини; η_{Vj} – коефіцієнт зниження швидкості під час руху на j -й морській ділянці шляху внаслідок впливу вітру та хвиль; M_{B1i} – норма вантажних робіт судна під час його розвантаження в i -му порту, т/год; M_{B2i} – то ж під час навантаження судна, т/год.

Далі в роботі наведено опис ММ вантажного СЗРП. Ця модель являє собою систему логічних і математичних залежностей, що пов'язують між собою вимоги завдання на проектування, вихідні дані та проектні параметри, з одного боку, і незалежні змінні (головні невідомі) – з іншого боку.

Далі виконано аналіз адекватності розробленої ММ. Адекватність ММ включає необхідну умову коректності математичної моделі і дві достатніх умови – точності (достовірності) і корисності. Для оцінювання адекватності ММ було проведено перевірочні розрахунки. За результатами цих розрахунків виявилось, що похибка визначення водотоннажності $\epsilon_{\Delta} = 4,15\%$, похибка економічних показників $\epsilon_{\text{ЭК}} = 5,0\%$, похибка параметрів остійності $\epsilon_{\text{ост}} = 5,0\%$.

Задача оптимізації сформулюється таким чином:

$$\begin{aligned} \min F(\bar{X}); \\ h_i(\bar{X}) &= 0, \quad i = 1, \dots, k; \\ g_j(\bar{X}) &< 0, \quad j = 1, \dots, m, \end{aligned}$$

де $F(\bar{X})$ – цільова функція; $h_i(\bar{X})$ і $g_j(\bar{X})$ – обмеження у вигляді рівностей і нерівностей; $\bar{X}, \{\bar{X}\} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор незалежних змінних.

При цьому задача максимізації прибутку судна вирішується мінімізацією його зворотної за знаком цільової функції.

Для переходу від задачі з обмеженнями до задачі без обмежень використано метод бар'єрних функцій і метод модифікованих коефіцієнтів Лагранжа. Після

переходу до задачі без обмежень (до безумовної задачі) застосовано умову Куна-Таккера і методом Ньютона знаходиться оптимальний вектор змінних.

Задля реалізації цього алгоритму було розроблено програму оптимізації головних елементів судна "RSAVShip". Укрупнену блок-схему програми оптимізації представлено на рис. 5.

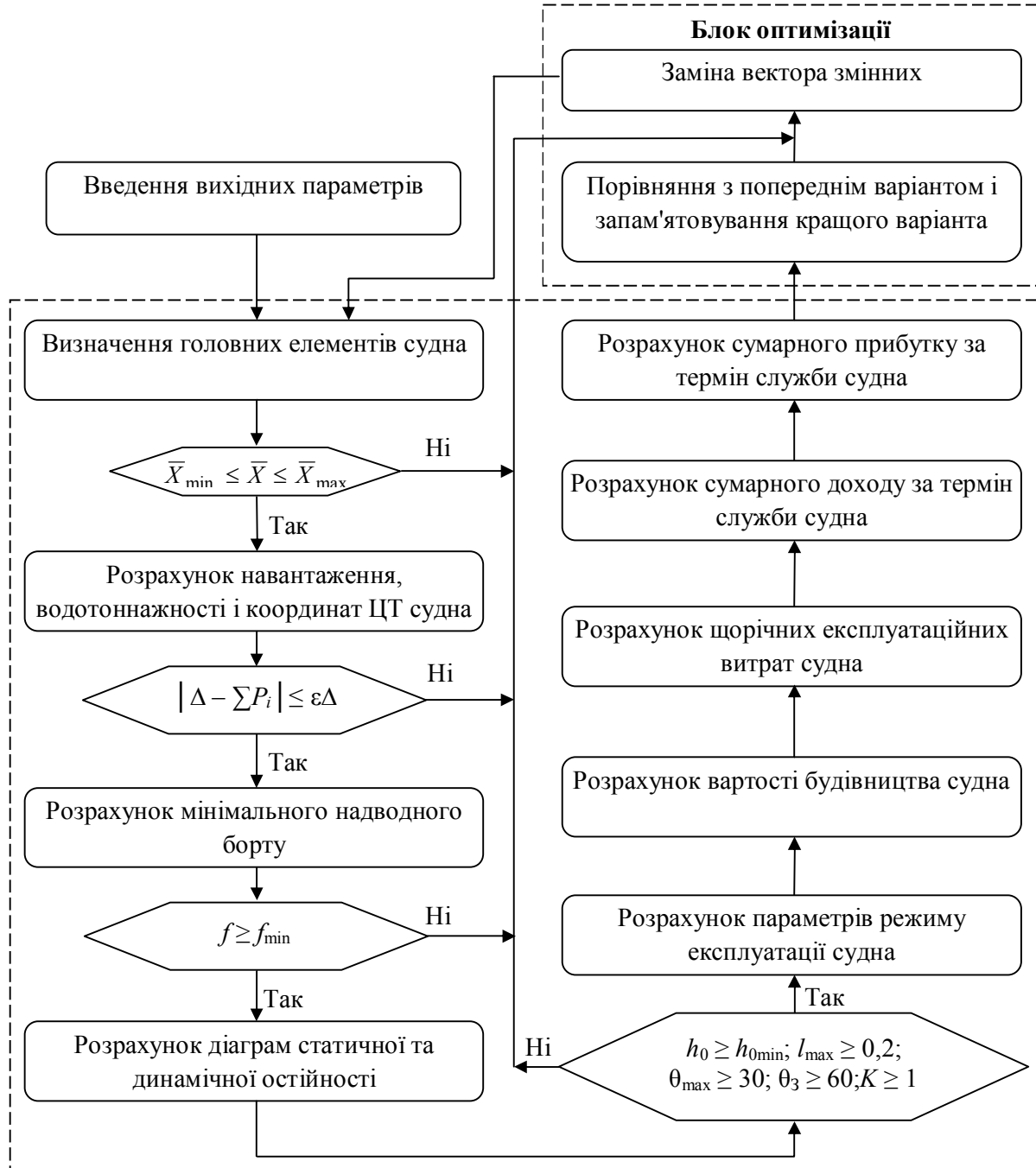


Рисунок 5 – Укрупнена блок-схема програми оптимізації

У п'ятому розділі наведено приклади розрахунку оптимізації вантажного судна дедвейтом 6500 т з різними обмеженнями за максимальною осадкою і швидкістю

судна. Проаналізовано вплив навігаційно-географічних умов В'єтнаму на вигляд вантажного СЗРП.

У таблиці 2, варіанти №1, №2 є оптимальні морські судна І обмеженого району плавання з обмеженням осадки не більше 6,9 м і без обмеження осадки для Південно-Китайського моря з обмеженням швидкості не менш 12 вузлів. Варіант №3 є оптимальне судно змішаного плавання з обмеженням швидкості не менш 9 вузлів. Це ж судно мало обмеження осадки не більше 4,2 м і приведений стандарт висоти хвилі 3%-забезпеченості $S_h = 1,0$ м. Тут внаслідок малого (приблизно 0,13) числа Фруда практично відсутній хвильовий опір. Крім того, внаслідок значної величини відношення довжини до ширини, що дорівнювало 8,4, невеликим був і опір форми. Це й призвело до того, що оптимальний коефіцієнт загальної повноти наблизився у варіанта №3 до 0,9. Цим результатом підтверджується можливість практичного застосування дуже великих значень коефіцієнта загальної повноти (0,9 – 0,93) для СЗП з м'яким хвильовим режимом, що прийняті в проектах Морського Інженерного Бюро, Одеса.

Таблиця 2 – Результат оптимізації вантажного судна дедвейтом 6500 т

Параметри	Прототип	Оптимальні варіанти		
		№1 (СОП)	№2 (СОП)	№3 (ССП)
Довжина між ПП L , м	95,900	106,83	104,325	135,00
Ширина B , м	17,000	15,261	14,904	16,070
Висота борту D , м	8,800	8,601	9,509	5,553
Осадка d , м	6,900	6,900	7,452	4,200
Коефіцієнт загальної повноти C_B	0,740	0,761	0,699	0,890
Експлуатаційна швидкість V_s , уз	12,0	12,0	12,0	9,0
Водотоннажність Δ , т	8532,4	8776,7	8300,4	8312
Розрахункова потужність ГД, кВт	2114,6	2187,0	1842,3	690,5
Число кругових рейсів на рік	19,071	19,700	19,086	17,03
Ходовий час в одному круговому рейсі, дн.	6,652	6,192	6,638	8,855
Стояночний час в одному круговому рейсі, дн.	11,70	11,70	11,70	11,70
Вартість побудови судна, млн.\$	6,057	6,192	5,808	4,990
Щорічні експлуатаційні витрати, млн.\$	2,288	2,328	2,201	1,716
Сумарний прибуток на весь термін служби, млн.\$	1,732	2,650	3,764	8,501

Було проаналізовано вплив вітро-хвильового режиму району плавання, параметром якого є зведений стандарт висоти хвиль 3%-забезпеченості S_h , на характеристики оптимального судна. На рис. 6а наведено значення коефіцієнта загальної повноти оптимального судна з обмеженням відношення довжини до ширини $L/B \leq 7,0$ коли число Фруда оптимального судна $Fr \approx 0,165$, а на рис. 6б – втрати прибутку (y %) в залежності від S_h .

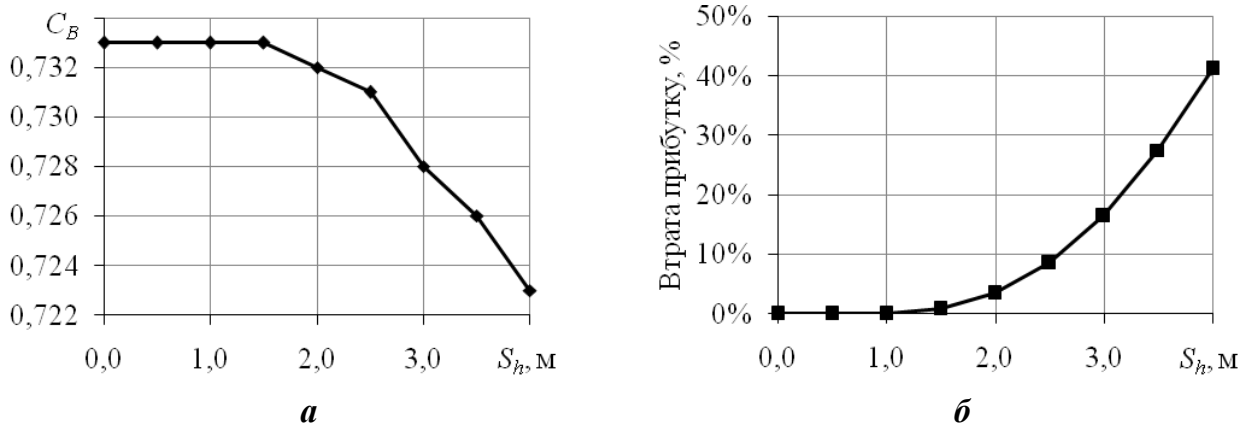


Рисунок 6 – Вплив приведенного стандарту висоти хвиль 3%-забезпеченості S_h на оптимальний коефіцієнт загальної повноти C_B (а) і на втрату прибутку y % (б)

Як відомо з теорії опору води рухові судна, із зростанням L/B збільшується та відносна швидкість судна, із перевищенням якої при заданому коефіцієнті загальної повноти починається швидке зростання опору. Тому із зростанням L/B при одній і тій самій швидкості оптимальне значення коефіцієнта загальної повноти буде збільшуватися. На рис. 7а показано результати аналізу впливу граничного відношення L/B на коефіцієнт загальної повноти C_B оптимального судна дедвейтом $DW = 6500$ т, у якого $Fr \approx 0,165$. При цьому вплив приведенного стандарту висот хвиль 3%-забезпеченості S_h на величину C_B тим менший, чим більший L/B . Як видно з рис. 7б, при одній й тій самій експлуатаційній швидкості судна, але при збільшеному відношенні L/B може бути обраний більший коефіцієнт загальної повноти C_B .

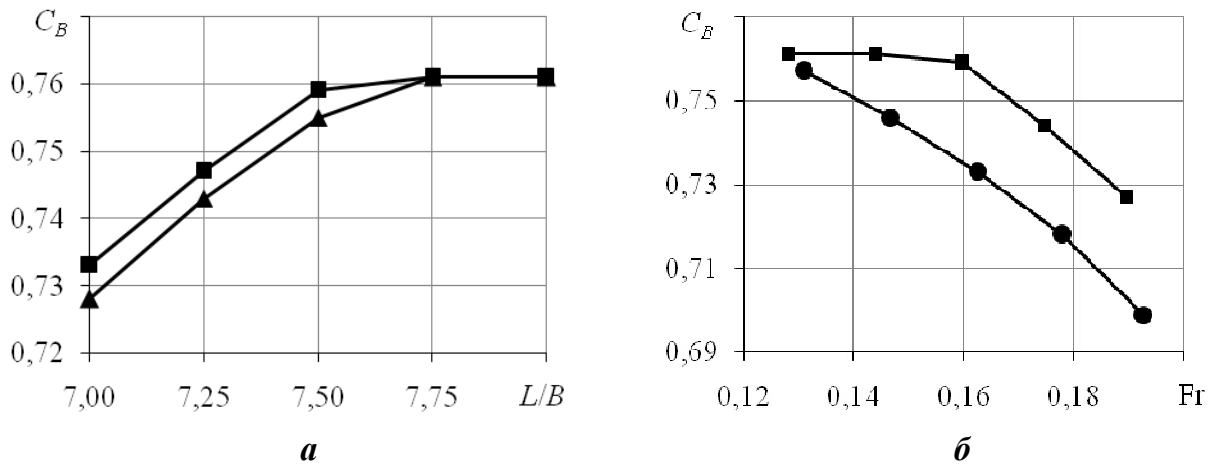


Рисунок 7а – Залежність оптимального коефіцієнту загальної повноти C_B :

а) від граничного співвідношення L/B : ■ – $S_h = 1,0$ м; ▲ – $S_h = 3,0$ м;

б) від числа Фруда: ● – $L/B = 7,0$ м; ■ – $L/B = 7,5$ м;

Далі проведено аналіз стійкості ММ, який полягає у дослідженні впливу дальності плавання, ціни палива, норми вантажних робіт на значення незалежних змінних. У результаті перевірки виявлено, що ММ є стійкою.

В розділі виконано також аналіз ММ на чутливість до відхилень незалежних змінних від їх оптимальних значень. За результатами розрахунків видно, що

максимальний вплив на приріст критерію оптимізації має місце при відхиленні від оптимальних значень коефіцієнта загальної повноти та експлуатаційної швидкості судна.

ВИСНОВКИ

В дисертації було досліджено різні аспекти проектування вантажного судна змішаного району плавання (СЗРП) з урахуванням навігаційно-географічних умов. Розроблено методику визначення головних елементів СЗРП на початкових стадіях проектування.

Головні наукові і практичні результати роботи.

Удосконалено для початкової стадії проектування метод проектування суден змішаного району плавання з урахуванням навігаційно-географічних умов (співвідношення між частинами річкової та морської ділянок шляху, гідрометеорологічних умов та даних метеорологічних прогнозів).

Створено базу даних суховантажних СЗРП В'єтнаму, що побудовані з 2000 р. по 2014 р. На основі статистичного аналізу було отримано залежності для визначення головних розмірів судна на початкових стадіях проектування. Крім того, було запропоновано формулу для вибору коефіцієнта загальної повноти для вантажних суден з урахуванням району плавання.

Створено математичну модель суховантажного СЗРП з урахуванням умов експлуатації. Дана модель може бути застосована для проектування таких СЗРП, які залежно від інтенсивності хвилювання на морській ділянці шляху і частки річкових ділянок шляху у загальному балансі шляху судна можуть бути віднесені до морських суден необмеженого району плавання, до морських обмежених районів плавання або до суден змішаного плавання. Досліджено та удосконалено методи оцінювання морехідності судна, застосування яких дозволяє підвищити безпеку та ефективність експлуатації СЗРП.

Крім того, в результаті виконаних досліджень:

- вперше розроблено метод визначення забезпеченості розрахункової висоти хвилі з урахуванням помилки прогнозу;

- вперше надано пропозиції щодо обґрунтування наближено оптимальної забезпеченості амплітуди бортової хитами судна в нормах остійності;

- вперше розроблено схему розрахунку вимушеного зниження швидкості судна на хвилюванні, яка включає оцінки заливання на підставі візуального визначення ступеня заливання в модельному експерименті, а також оцінювання днищового слемінгу за ударними прискореннями;

- вперше при розрахункових оцінках ударних прискорень і сили удару в умовах днищового слемінгу показано можливість опису випадкової сили удару на стаціонарному хвильовому режимі розподілом Вейбула, отримано прості наближені залежності урахування впливу поздовжньої кривизни поверхні удару на силу удару, а також розглянуто вплив ступеня впорядкованості хвиль на силу удару.

Сформульовано задачу оптимізації головних елементів СЗРП як умовну оптимізаційну задачу нелінійного програмування. Застосовано метод внутрішньої точки і метод модифікованих функцій Лагранжа з подальшим застосуванням

оптимізаційного методу другого порядку (методу Ньютона) при вирішенні задачі оптимізації.

Розроблено комплекс програм "RSAVShip", який може бути застосований для автоматизованого проектування та оптимізації головних елементів СЗРП. Перевірочні розрахунки оптимізації СЗРП підтвердили працездатність комплексу програм "RSAVShip" при пошуку оптимальної точки.

Проведений аналіз адекватності підтвердив, що розроблена ММ СЗРП є в достатній мірі точною і стійкою до можливих відхилень вихідних даних від початкових їх значень.

Достовірність теоретичних і прикладних результатів, висновків дисертаційної роботи забезпечена коректною постановкою задачі, адекватністю математичної моделі, використанням вдосконаленого методу оцінки морехідності і застосуванням нових методів вирішення оптимізаційної задачі.

Наукові та практичні результати роботи впроваджено у ПАТ "Чорноморсуднопроект", та у конструкторському бюро Інституту науки і технології суднобудування (SSTI, м. Ханой, В'єтнам).

Результати роботи також впроваджено в навчальному процесі кафедри автоматизованого проектування суден В'єтнамського морського університету і в навчальному процесі кафедри теорії та проектування суден Національного університету кораблебудування.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Соломенцев, О.И. Вынужденное снижение скорости судна в результате чрезмерного интенсивного зарывания [Текст] / О.И. Соломенцев, Ли Т.Б. // Збірник наукових праць НУК, 2012. – № 3–4. – С. 4–8.

2. Соломенцев, О.И. О влиянии продольной кривизны поверхности удара на силу удара при днищевом слеминге [Текст] / О.И. Соломенцев, Ли Т.Б. // Збірник наукових праць НУК, 2012. – № 5–6. – С. 11–16.

3. Соломенцев, О.И. Выбор коэффициента общей полноты проектируемого судна с учётом района и условий плавания [Текст] / О.И. Соломенцев, Ли Т.Б. // Збірник наукових праць НУК, 2013. – № 1. – С. 16–21.

4. Ли, Т.Б. Определение главных элементов грузовых судов ограниченного района плавания в начальном приближении [Текст] / Ли Т.Б. // Збірник наукових праць НУК, 2013. – № 2. – С. 18–22.

5. Соломенцев, О.И. Определение экстремальных амплитуд волн с учетом метеопрогноза [Текст] / О.И. Соломенцев, Ли Т.Б. // Збірник наукових праць НУК, 2013. – № 3. – С. 9–13.

6. Соломенцев, О.И. О влиянии степени упорядоченности волнения на силу удара при днищевом слеминге [Електронний ресурс] / О.И. Соломенцев, Ли Т.Б. // Вісник НУК, 2013. – № 2. – Режим доступу: <http://evn.nuos.edu.ua/>.

7. Solomyentsev, O.I. Về mối liên hệ giữa mức đảm bảo của biên độ chòng chành mạn và xác suất lật định mức của tàu [Текст] / O.I. Solomyentsev, Le Thanh Binh // ĐННН – Tạp chí Khoa học công nghệ hàng hải 04–2014, Số 38 (Соломенцев, О.І. Про взаємозв'язок забезпеченості умовної розрахункової амплітуди бортової хитавиці і нормативної ймовірності перекидання судна / О.І. Соломенцев, Лі Т.Б. // Збірник морської технології В'єтнамського морського університету, 2014. – № 38. – С. 25–28).

Опубліковані праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

8. Соломенцев, О.И. Определение вынужденных потерь скорости судна, связанных с зарыванием [Текст] / О.И. Соломенцев, Ли Т.Б. // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю “Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд”, 23-25 травня 2012 р., м. Миколаїв: НУК, 2012. – С. 78–81.

9. Ли, Т.Б. Приближённое определение главных размерений и коэффициента общей полноты судна ограниченного района плавания [Текст] / Ли Тхань Бин // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю “Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд”, 22–24 травня 2013 р., м. Миколаїв: НУК, 2013. – С. 144–148.

10. Соломенцев, О.И. Вероятность отказа и функция риска в задаче технико-экономического обоснования уровня остойчивости судна [Текст] / О.И. Соломенцев, Нгуен Вьет Хоан, Ли Тхань Бин // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції “Інновації в суднобудуванні та океанотехніці”, 9–11 жовтня 2013 р., м. Миколаїв: НУК, 2013. – С. 108–110.

11. Ли, Т.Б. Модель функционирования и ресурсная модель грузового судна ограниченного района плавания [Електронний ресурс] / Ли Тхань Бин // Тези доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд”. – Миколаїв, 2014 – Режим доступу: <http://conference.nuos.edu.ua/catalog>.

12. Ли, Т.Б. Применение метода внутренней точки и метода безусловной минимизации второго порядка для оптимизации главных элементов судна ограниченного района плавания [Текст] / Ли Тхань Бин // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції “Інновації в суднобудуванні та океанотехніці”, 8–10 жовтня 2014 р., м. Миколаїв: НУК, 2014. – С. 120–122.

АНОТАЦІЯ

Лі Тхань Бін. Удосконалення методу проектування суден змішаного району плавання з урахуванням навігаційно-географічних умов. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 – конструювання та будування суден. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2015.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення методу проектування суден змішаного району плавання (СЗРП) з урахуванням навігаційно-географічних умов.

Розроблено математичну модель (ММ) функціонування вантажного СЗРП і методи визначення його економічних показників.

Досліджено та вдосконалено методи оцінювання морехідності СЗРП для підвищення безпеки експлуатації судна.

Розроблено ММ СЗРП, алгоритми і комплекс програм "RSAVShip" для оптимізації головних елементів СЗРП з урахуванням навігаційно-географічних умов.

Ключові слова: судно змішаного району плавання, забезпеченість, ймовірність перекидання, функція ризику, заривання у хвилі, слемінг, оптимізація

АННОТАЦИЯ

Ли Тхань Бин. Усовершенствование метода проектирования судов смешанного района плавания с учётом навигационно-географических условий. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 – конструирование и постройка судов. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2015.

Целью диссертационной работы является усовершенствование метода проектирования судов смешанного района плавания (ССРП) с учётом навигационно-географических условий.

Разработано математическую модель (ММ) функционирования грузового ССРП и методы определения его экономических показателей. Даная ММ учитывает характеристики ветро-волновых режимов в районе плавания при оценке эффективности и безопасности эксплуатации ССРП.

Предложен метод учёта ошибок метеопрогноза при проектировании судна с введением понятия ошибки прогноза первого и второго рода. Получены формулы для определения обеспеченности расчётной амплитуды волнения с учётом метеопрогноза путём применения для ординат волнения закона Пирсона типа I и формул полной вероятности.

С целью повышения безопасности и эффективности эксплуатации ССРП выполнено совершенствование методов определения вынужденного снижения скорости судна по критериям зарывания и днищевого слеминга. Путём обработки экспериментальных данных в части визуального определения степени зарывания, разработан соответствующий критерий для вынужденного снижения скорости.

Предложен также критерий вынужденного снижения скорости с учётом ударных ускорений и силы удара при днищевом слеминге. В этом критерии учитываются случайность длины удара, влияния продольной кривизны плоскости соударения и степень упорядоченности морского волнения.

В диссертации были исследованы и разработаны методы определения оптимального запаса остойчивости судна на основе расчёта вероятности опрокидывания и среднего времени жизни судна на стационарном режиме волнения. Предложена схема определения обеспеченности расчётной амплитуды бортовой качки в задаче нормирования остойчивости судна.

Разработаны ММ ССРП, алгоритмы и комплекс программ "RSAVShip" для оптимизации главных элементов ССРП с учётом навигационно-географических условий. Задача оптимизации решена методом второго порядка – методом Ньютона и методом внутренней точки.

Ключевые слова: судно смешанного района плавания, обеспеченность, вероятность опрокидывания, функция риска, зарывание, слеминг, оптимизация

SUMMARY

Le Thanh Binh. Improvement of method for the design of combined navigation area ships taking into account navigation and geographic conditions. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific of the candidate of technical sciences on a specialty 05.08.03 – design and construction of ships. – National University of Shipbuilding named after admiral Makarov, Nikolaev, 2015.

The purpose of this dissertation is to improve method for the design of combined navigation area ships taking into account navigation and geographic conditions.

Developed a mathematical model of operating of ship and methods of determining its economic performance.

Investigated and improved methods for assessing the seakeeping characteristics to improve safety of the vessel in operation.

Developed a mathematical model of ship of restricted navigation area, algorithms and software "RSAVShip" for optimization of main elements of ship, taking into account navigation and geographic conditions.

Keywords: combined navigation area ship, safety, probability of capsizing, risk function, green-water, slamming, optimization

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовників та розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 2506 від

Підписано до друку р. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Друк офсетний. Гарнітура “Таймс”. Ум. друк. арк. 0,9. Обл. – вид. арк. 1,0.
Тираж 100 прим. Зам. № .

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5.