

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ястреба Олексій Петрович

УДК 629.5.012

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ
ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ**

Спеціальність 05.08.03 – Конструювання та будування суден

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О. П. Ястреба

Науковий керівник: Некрасов Валерій Олександрович, д-р. техн. наук, професор

Миколаїв 2021

АНОТАЦІЯ

Ястреба О.П. Визначення оптимальних головних розмірів ескортних буксирів. – Кваліфікаційна наукова праця 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, МОН України, Миколаїв, 2021.

В дисертаційній роботі розв'язано низку задач, які забезпечили досягнення поставленої мети наукового дослідження – створення методу визначення оптимальних головних розмірів і характеристик ескортних буксирів на етапі їх концептуального проектування.

Розглянуто сучасні тенденції розвитку світового буксирного флоту, визначені шляхи підвищення ефективності та надійності ескортних буксирів. Проаналізовані особливості експлуатації цих суден з урахуванням зацікавленості судновласників отримання найбільшого прибутку з одного боку та власників буксирних компаній або керівництва порту з іншого боку.

Виконано аналіз сучасного стану буксирного флоту України та оцінку його за кількісним та якісним показниками. Більша частина буксирів країни – застарілі (66% мають вік більше 30 років) та не можуть ефективно працювати і бути конкурентоспроможними з новими суднами. Потужність енергетичної установки менше 1000 к.с. (42% буксирів) не дає їм можливості обслуговувати великотоннажні судна. Надано рекомендації зміни складу буксирного флоту та потужності буксирів в залежності від кількості та дедвейту суден, які відвідують порт.

Розглянуто найбільш відомі світові виробники ескортних буксирів, особливості їх роботи та перспективи розвитку.

Виконано аналіз існуючих методів оптимізації визначення головних розмірів ескортних буксирів, розглянуті недоліки і переваги кожного методу.

На основі аналізу основних елементів і характеристик 50 ескортних буксирів, які були побудовані з 2000 до 2020 року на провідних підприємствах всього світу, та створеної бази даних цих суден отримані регресійні рівняння.

Ці рівняння можуть бути використані як для визначення основних елементів та характеристик ескортного буксира в першому наближенні при грубій оцінці його елементів, так і для формування початкової точки пошуку оптимальних значень елементів судна цього типу в оптимізаційній задачі проектування.

Вперше розроблено модель інженерних та навігаційних якостей ескортного буксира, в якій на основі даних буксирувальних випробувань таких буксирів в дослідному басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова розроблено метод визначення діючих на корпус буксира гідродинамічних сил, встановлено залежність цих сил від орієнтації буксира щодо набігаючого потоку рідини, швидкості потоку і характеристик форми корпусу, що необхідно для складання і розв'язання рівнянь руху буксира в задачах його функціонування і проектування.

Вперше сформульовано задачу функціонування ескортного буксира, в якій основною функціональною операцією обрано обслуговування буксиром сукупності суден різних типів і водотоннажності, які прибувають в морський порт, що дозволяє ескортному буксиру певної потужності ефективно обслуговувати судна певних діапазонів водотоннажності. В якості методу розв'язання трансцендентних рівнянь руху ескортного буксира в цій операції обрано метод нелінійного програмування задачі пошуку безумовного мінімуму.

Вперше як критерій ефективності обрано комплексний критерій економічної ефективності і надійності виконання буксиром основних

функціональних операцій, що також враховує вимоги класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій, обумовлених необхідністю компенсації обмеженої керованості супроводжуваних суден при малих швидкостях їх ескортування розвиненою керуючою силою ескортного буксира.

Вперше на основі включення в оптимізаційну задачу вибору головних розмірів і характеристик ескортного буксира задачі його функціонування, запропонованих методів визначення діючих на корпус буксира гідродинамічних сил і рішення трансцендентних рівнянь його руху, а також вимог класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій, отримано метод концептуального проектування ескортних буксирів.

Практичне значення одержаних результатів

Виконані чисельні розрахунки розв'язання трансцендентних рівнянь руху ескортного буксира під час виконання ескортних операцій та порівнянні результати цих розрахунків з результатами натурних випробувань ескортних буксирів. На основі цих розрахунків і порівнянь розроблено методiku присвоєння проектуваному буксиру ескортного класу без проведення натурних випробувань, яка рекомендована Регістром судноплавства до практичного використання. Ця методика та багаточисельні розрахунки оптимізаційної задачі вибору головних розмірів свідчать про можливість використання створеного методу при проведенні дослідження ефективності ескортного буксира та визначення його характеристик на концептуальній стадії проектування в проектно-конструкторських і науково-дослідних організаціях.

Розроблено комплекс прикладних програм “EscortTug”, який забезпечує проведення досліджень ефективності і надійності ескортного буксира та отримання рішення задачі вибору основних характеристик на стадії концептуального проектування.

Результати дослідження використані в навчальному процесі Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при читанні лекцій з курсу ходовості та керованості суден.

Розроблені методи визначення зусиль, діючих на корпус буксира під час ескортування, знайшли застосування в проектній організації «АСАБА ДИЗАЙН ЦЕНТР».

Ключові слова: ескортний буксир, ескортна операція, буксирувальні випробування, керуюче зусилля, оптимальне проектування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, в яких викладено основні наукові результати дисертації

1. Некрасов В.А., Поздеев В.А., Ястреба А.П. Метод определения гидродинамических сил, действующих на буксир, в режимах эскортных операций. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. Миколаїв, 2010. № 6. С. 41–46.
2. Некрасов В.А., Дробот Д.А., Череватенко С.А., Ястреба А.П. Определение характеристик эскортных буксиров на основе данных модельных испытаний в опытовом бассейне Национального университета кораблестроения. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2013. № 1 (37). С. 8–17.
3. Бондаренко А.В., Некрасов В.А., Ястреба А.П. Концепция выбора оптимального состава буксирного флота порта. Водный транспорт: *Збірник наукових праць КДАВТ*. Київ, 2015. № 2 (23). С. 7–14.
4. Бондаренко А.В., Некрасов В.А., Ястреба А.П. Расчетные и нормативные методы повышения эффективности буксирного обеспечения морских портов Украины. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2015. № 3. С. 42–57.

5. Бондаренко А.В., Некрасов В.А., Ястреба А.П. Методика выбора оптимального состава обеспечения порта. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. СПб., 2015. Вып. 4 (32). С. 43–52.
6. Bondarenko O., Nekrasov V., Yastreba O. Effectives harbor tug fleet: problem formulation and methodology of its solution. Brodogradnja. Shipbuilding. 2016. № 2. P. 34–46.
7. Bondarenko O., Nekrasov V., Yastreba O. Effectives and optimization of harbor tug fleet. Transport and Telecommunication Institute. Latvia, 2018. №2. P. 140–150.
8. Yastreba O. Method for determination of escort tugs main dimensions characteristics at conceptual designs stage. Shipbuilding & marine infrastructure. 2018. № 2 (10). P. 27–35.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

9. Дробот Д.А., Череватенко С.А., Некрасов В.А., Ястреба А.П. Оборудование для экспериментального определения характеристик эскортных буксиров и методика пересчета результатов модельных испытаний на натуре. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Другої міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 20-річчю незалежності України (Миколаїв, 5–7 жовтня 2011 р.).* Миколаїв: НУК, 2011 р. С. 88–90.
10. Ястреба А.П. Определение сил, действующих на эскортный буксир, в режиме стационарных эскортных операций. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 23–25 травня 2012 р.).* Миколаїв: НУК, 2012 р. С. 74–76.

11. Дробот Д.А., Череватенко С.А., Некрасов В.А., Ястреба А.П. Совершенствование оборудования опытового бассейна НУК им. адмирала С.О. Макарова. *Экспериментальные методы теории корабля. Тезисы докладов II международной научно-технической конференции* (Киев, 20 сентября 2013 г.). Киев: ИГ НАН Украины, 2013 г. С. 19.
12. Некрасов В.А., Бондаренко А.В., Ястреба А.П. Модель функционирования флота портовых буксиров. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали V міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 8–10 жовтня 2014 р.). Миколаїв: НУК, 2014 р. С. 85–87.
13. Некрасов В.А., Ястреба А.П. Формулировка оптимизационной задачи выбора главных размерений эскортного буксира. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 20–22 травня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 46–47.
14. Некрасов В.А., Бондаренко А.В., Ястреба А.П. Современные методы определения эффективности, оптимизации состава и формирования требований к буксирным флотам морских портов Украины. *Морська інфраструктура України: проблеми та перспективи розвитку*: матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції (Миколаїв, 3–4 грудня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 13–24.
15. Некрасов В.А., Демидов Е.Д., Бондаренко А.В., Ястреба А.П. Создание программного обеспечения для определения усилий, действующих на буксир в режимах стационарных эскортных операций. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 12–14 жовтня 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016 р. С. 14–17.
16. Некрасов В.А., Бондаренко А.В., Ястреба А.П. Определение оптимальных главных размерений эскортных буксиров морских портов

України. *Сучасні технології проектування , побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю* (Миколаїв, 23–24 травня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018 р. С. 9–7.

17. Ястреба А.П. Основные зависимости характеристик корпуса эскадрных буксиров. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю* (Миколаїв, 20–21 травня 2020 р.). Миколаїв: НУК, 2020 р. С. 85–89.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

18. Некрасов В.О., Бондаренко О.В., Ястреба О.П. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 68522 Державної служби інтелектуальної власності України. Комп'ютерна програма «EscortTug». Авторське право і суміжні права, № 43, 2016. Дата реєстрації 08.11.2016.

ABSTRACT

Oleksii P. Yastreba Determination of escort tugs optimal main dimensions. – Qualifying research paper as the manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences on speciality 05.08.03. – «Design and building of ships». Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2021.

A number of problems are solved in the thesis that allows reaching the study goal – to develop a method for determination of escort tugs optimal main dimensions and characteristics at conceptual design stage.

The current trends in the world tug fleet development are reviewed, ways of improvement of escort tugs efficiency and reliability are determined. The specifics of these vessels operation are analysed, taking into account the interest of shipowners to obtain the most profit on the one hand and the owners of tug companies or port management on the other hand.

The analysis of the current state of Ukrainian tug fleet and its assessment in terms of quantity and quality is performed. Most tugs in the country are obsolete (66% are over 30 years old), and unable to operate efficiently and compete with new vessels. Propulsion power of less than 1000 hp (42% of tugs) does not allow them to service large vessels. Recommendations to change the composition of the tug fleet and the tugs power based on the number and deadweight of vessels visiting the port are given.

The most famous world manufacturers of escort tugs, specifics of their work and development prospects are reviewed.

The analysis of the existing methods for the optimization of determination of escort tugs main dimensions is performed, advantages and disadvantages of each method are reviewed.

Based on the analysis of main elements and characteristics of 50 escort tugs built from 2000 to 2020 by world leading manufacturers and composed database of these vessels, regression equations are obtained. These equations can be used as for determination of escort tugs main elements and characteristics in the first approximation in the rough assessment of its elements, as for definition of starting point for determination of optimal values of elements of this type of vessel in the design optimization problem.

For the first time, model of escort tug engineering and navigation qualities was developed, method for determination of hydrodynamic forces acting on the tug hull was developed based on the towing tests of performance and manoeuvrability of escort tug projects in the towing tank of Admiral Makarov National University of Shipbuilding. This method establishes dependence of the acting hydrodynamic forces on the orientation of the tug relative to the inflow and characteristics of the hull shape, that is required for compiling and solving of the equations of tug motion based on its operational purpose.

For the first time, the problem of escort tug operation is defined, where servicing the group of vessels of various types and displacements is chosen as main functional operation. For the purpose of solving of the transcendental equations of tug motion during escort operation, a method is chosen similar to the method for solving of the optimization problem of determination of its main dimensions.

For the first time, comprehensive criteria of economic efficiency and reliability of the tug main functional operations performance is chosen as the efficiency criteria, the requirements of classification societies to safety of escort operations are included.

For the first time, the following problems are included in the optimization problem of determination of tug main dimensions and characteristics: the problems of its engineering and navigation qualities, hydrodynamic forces acting on the tug hull and solving of the transcendental equations, and the requirements of

classification societies to safety of escort operations are taken into account. The method for solving of the optimization problem of determination of escort tug optimal dimensions at conceptual design stage is chosen.

The practical value of the obtained results

Numerous calculations for solving of the transcendental equations of escort tug motion during escort operations are performed and calculations results are compared with the results of escort tugs full-scale tests. Based on these calculations and comparisons, a method for assigning an escort class to a designed tug without conducting full-scale tests is developed, this method is recommended by the Register of Shipping for practical use. This method and numerous calculations for the optimization problem of determination of main dimensions indicate the possibility of using the obtained method in study of the escort tug efficiency and determination of its characteristics at conceptual design stage by design bureaus and research organizations.

"EscortTug" application software package is developed, which allows to perform the escort tugs efficiency and reliability study and to obtain a solution to the problem of determination of main characteristics at conceptual design stage.

The results of the study are used in the educative process at Admiral Makarov National University of Shipbuilding during the ship performance and manoeuvrability course.

The developed methods for determination of forces acting on the tug hull during escorting are used by the leading design bureaus "ASABA DESIGN CENTER".

Key words: escort tug, escort operation, towing tests, steering force, optimal design.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КВЛ – конструктивна ватерлінія

ДП – діаметральна площа

ПМШ – площа мідельшпагоуту

ОП – основна площа

ДСО – діаграма статичної остійності

ГД – головний двигун

ЕУ – енергетична установка

ГРК – гвинто-рульова колонка

ASD – Azimut Stern Drive

SWBS – Ship Work Breakdown Structure

ESWBS – Extended Ship Work Breakdown Structure

CER – Cost Estimation Relationships

ECER – Extended Cost Estimation Relationships

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	12
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1	
МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ	26
1.1 Операції буксирів на морі, сучасний стан флоту портових, рятувальних і ескортних буксирів	26
1.2 Аналіз основних елементів та характеристик сучасних буксирів ...	34
1.3 Огляд методів оптимізації головних елементів буксирів	42
1.3.1 Постановки задач оптимізації головних елементів буксирів.....	42
1.3.2 Моделі інженерних і навігаційних властивостей буксирів	48
1.3.2.1 Масове навантаження.....	48
1.3.2.2 Місткість.....	48
1.3.2.3 Плавучість	48
1.3.2.4 Остійність	49
1.3.2.5 Непотоплюваність та міцність	49
1.3.2.6 Ходовість	49
1.3.2.7 Керованість.....	50
1.3.2.8 Морехідність	51
1.3.3 Задачі функціонування буксирів.....	51
1.3.4 Показники ефективності і надійності буксирів	52
1.3.5 Методи розв'язку задач оптимізації головних елементів буксирів	55
Висновки з розділу 1	66
РОЗДІЛ 2	
ЗАДАЧІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ В РАЙОНАХ ОБСЛУГОВУВАННЯ	68
2.1 Задачі функціонування буксирного флоту порту	68

2.2	Задачі функціонування ескортного буксира.....	70
2.2.1	Основна задача функціонування ескортного буксира	71
2.2.2	Допоміжні задачі функціонування ескортного буксира.....	74
2.2.2.1	Супроводження судна по підхідному каналу, транспортування його до причалу, швартування/відшвартування і виведення його з порту	74
2.2.2.2	Задача зняття аварійного судна з мілини	78
2.2.2.3	Буксирування аварійного судна	80
2.2.2.4	Гасіння пожеж на аварійних суднах	82
2.2.2.5	Ліквідування аварійних розливів нафтопродуктів.....	82
	Висновки з розділу 2	84

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЬ ІНЖЕНЕРНИХ І НАВІГАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

	ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ.....	86
3.1	Визначення навантаження мас і положення центру ваги	86
3.2	Плавучість	91
3.3	Місткість.....	93
3.4	Ходовість.....	94
3.4.1	Ходовість при куті дрейфу, що дорівнюється нулю	95
3.4.2	Ходовість при різних кутах дрейфу	97
3.4.2.1	Сили, що діють на буксир під час виконання ескортної операції.....	97
3.4.2.2	Сили, що діють на буксир зі сторони ГРК.....	99
3.4.2.3	Гідродинамічні сили, що діють на буксир під час виконання ескортної операції.....	101
3.4.2.4	Сили від дії вітру та хвилювання.....	103
3.4.2.5	Рівняння руху буксира під час виконання стаціонарної ескортної операції	104
3.4.2.6	Програмний комплекс розрахунку діючих сил і кінематичних характеристик буксира в режимах	

ескортних операцій.....	105
3.5 Врахування вимог класифікаційних товариств до остійності	109
3.6 Врахування вимог класифікаційних товариств до керуючої сили	115
3.7 Врахування морехідності.....	118
Висновки з розділу 3	119

РОЗДІЛ 4

ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ І НАДІЙНОСТІ ОПЕРАЦІЙ

ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ.....	120
4.1 Визначення економічних показників	120
4.1.1 Розрахунок вартості проектування і побудови.....	120
4.1.2 Розрахунок витрат на експлуатацію та утилізацію	124
4.2 Визначення показників надійності операцій.....	127
4.3 Загальний показник ефективності і надійності	127
Висновки з розділу 4	130

РОЗДІЛ 5

ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ ГОЛОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕСКОРТНОГО

БУКСИРА	131
5.1 Вибір цільової функції задачі оптимізації	131
5.2 Формулювання оптимізаційної задачі вибору головних елементів ескортного буксира.....	136
5.3 Незалежні змінні і обмеження задачі оптимізації.....	137
5.4 Метод розв'язку задачі оптимізації головних елементів	143
5.5 Алгоритм задачі визначення головних елементів.....	143
Висновки з розділу 5	152

РОЗДІЛ 6

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ

ЕЛЕМЕНТІВ ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ.....	154
6.1 Приклад розв'язку задачі визначення головних елементів ескортного буксира на основі розробленої методики і програми	154

6.2 Перевірка достовірності результатів	158
Висновки з розділу 6	160
ВИСНОВКИ	161
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	163
Додаток А. Алгоритм методу оптимізації головних розмірів ескортних буксирів (коди).....	173
Додаток Б. База даних ескортних буксирів	225
Додаток В. Авторське свідоцтво на комп'ютерну програму «EscortTug».....	228
Додаток Г. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	230
Додаток Д. Список публікацій за темою дисертації	233

ВСТУП

Морський транспорт України є багатофункціональною структурою, яка задовольняє потребу економіки в транспортному забезпеченні. Морські порти країни мають зручне розташування для забезпечення транзитних вантажопотоків. Від ефективності роботи морських портів, рівня технічного оснащення залежить їх конкурентоспроможність серед країн чорноморського басейну.

На даний час Україна має в своєму розпорядженні 18 морських портів, 13 з яких знаходяться на континентальній частині. Основну частину вантажів, що перевозяться, складають зерно, руда, вугілля. В останні роки спостерігається значне збільшення обсягу контейнерних перевезень.

Тенденція розвитку сучасного морського транспорту полягає в збільшенні тоннажу суден та їх швидкості з метою зменшення собівартості транспортування вантажів. Збільшення глибин в підхідних каналах і акваторіях портів забезпечує можливість обслуговування суден з водотоннажністю понад 100 тисяч тон. Збільшення тоннажу призводить до збільшення ризиків, які виникають при русі суден підхідними каналами і в акваторіях портів, особливо з точки зору екологічної безпеки.

Великі розміри суден не дозволяють їм вільно маневрувати в умовах складного фарватеру. Зниження швидкості їх руху призводить до істотного погіршення керованості, яке посилюється впливом гідрометеорологічних умов у районі порту. Для зменшення ризиків, які виникають при русі великотоннажних суден, що транспортують небезпечні вантажі (танкери, газовози, хімовози), застосовується буксирний супровід. Реалізується він за допомогою ескортних буксирів.

Ескортні буксири представляють новий тип буксирів, який з'явився порівняно недавно, але вже набув широкого застосування у великих портах усього світу. Ескортний буксир має відмінності в архітектурі та конструкції в порівнянні з традиційними портовими буксирами. Наявність розвиненого днищового скега, повноповоротних гвинто-рульових колонок і носове

розташування потужної ескортної лебідки дозволяє йому супроводжувати великотоннажне судно, яке рухається зі швидкістю до 10 вузлів, перебуваючи у нього за кормою. У разі відмови у супроводжуваного судна рульової машини, ескортний буксир здатний здійснити не тільки керування аварійним судном, але і його гальмування. Ефективна робота сучасного морського порту без ескортних буксирів неможлива.

Буксирний флот морських портів України має велику кількість буксирів, проте більшість з них має вік більше 30 років та застаріли і морально і технічно. Потужність цих буксирів не дозволяє їм обслуговувати великотоннажні судна. Для забезпечення досягнення необхідних зусиль при виконанні різних операцій в порту, таких, як супроводження, кантування, швартування, доводиться збільшувати кількість буксирів, що економічно недоцільно.

Аналіз досліджень з проектування сучасних буксирів усіх типів показав, що зараз існує невелика кількість робіт, які присвячені проектуванню буксирів. Що стосується оптимального проектування буксирів, то має місце лише декілька робіт [1–6], в яких розглядається проектування портових буксирів неескортного типу. Більшість опублікованих робіт присвячено визначенню необхідної кількості буксирів для обслуговування суден заданого дедвейту [2], [7–16]. Стосовно ескортних буксирів, більшість робіт була присвячена визначенню зусиль, які виникають на корпусі буксира під час ескортування суден [17–20]. Між тим кількість ескортних буксирів, які придбаються морськими портами для поповнення своїх буксирних флотів, щороку зростала. Але цей процес не супроводжувався використанням теоретично обґрунтованих рекомендацій щодо оптимального вибору ескортних буксирів для усієї низки небезпечних суден, які заходять у морські порти. Необхідна для цього оптимізаційна задача вибору головних елементів ескортних буксирів вперше за участю автора цієї дисертації сформульована та вирішена в роботах [21–22]. Подальший розвиток та узагальнення цієї теми наведено в роботі автора [23].

Актуальність теми дисертації визначається:

- необхідністю поповнення існуючого флоту морських портів України багатоцільовими ескортними буксирами;
- відсутністю систематичних досліджень з формулювання та розв’язання концептуальних задач оптимального вибору головних розмірів ескортних буксирів;
- відсутністю програмних комплексів, які дозволяють виконати розрахунок основних елементів ескортних буксирів на етапах дослідницького проектування;
- необхідністю оцінки ефективності ескортного буксира не тільки з точки зору економіки його функціонування, але й з урахуванням рівня надійності виконання ним своїх функціональних зобов’язань.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження пов’язано з виконанням прикладної держбюджетної науково-дослідницької роботи «Розробка методу визначення головних розмірів та характеристик кораблів берегової охорони для захисту морських кордонів держави» (№ теми 1994, 2015–2016 рр., номер державної реєстрації 0115U00305), держбюджетної науково-дослідницької роботи «Розробка методології підвищення ефективності та безпеки річкової транспортної системи України» (№ теми 2085, 2017–2019 рр., номер державної реєстрації 0117U000347), науково-дослідницької роботи «Буксировочные испытания моделей судов TUG55PA и TUG70» (№ теми 1830, 2011 р., номер державної реєстрації 0111U008655), науково-дослідницької роботи «Визначення необхідної кількості і потужності існуючих портових буксирів для обслуговування ДП МТП «Південний» і терміналів (№ теми 1954, 2014 р., номер державної реєстрації 0114U003764), які виконувались кафедрою теорії та проектування суден Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова та в яких здобувач брав участь як виконавець. Напрямок дослідження відповідає Закону України № 3715–VI (редакція від 05.12.2012)

«Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», «Морській доктрині України на період до 2035 року», які затверджені постановою Кабінету Міністрів України № 137–209–п (редакція від 28.12.2018) та «Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року», затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 430–2018–р (від 30 травня 2018).

Мета і задачі дослідження.

Метою дослідження є розробка методу вибору оптимальних головних розмірів ескортних буксирів на стадіях їх концептуального проектування, який забезпечує найвищий рівень показників їх функціональної та економічної ефективності.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

1. Виконати аналіз методів визначення оптимальних головних розмірів буксирів.
2. Створити математичну модель інженерних та навігаційних якостей ескортного буксира.
3. Сформулювати задачу функціонування ескортного буксира у заданому районі експлуатації і підібрати метод вирішення задачі функціонування.
4. Визначити сукупність показників економічної ефективності та надійності виконання буксиром основних функціональних операцій.
5. Сформулювати та вирішити оптимізаційну задачу визначення оптимальних головних розмірів ескортного буксира.
6. Надати рекомендації використання розробленого методу для вибору параметрів ескортних буксирів у проблемі поповнення флоту буксирів морського порту.

Об'єкт дослідження – процес концептуального проектування ескортних буксирів, призначених для супроводу великотоннажних суден, які транспортують небезпечні вантажі, на підходах до морських портів, при русі підхідними каналами та в акваторіях морських портів.

Предмет дослідження – метод вибору головних елементів ескортних буксирів.

Методи дослідження. Представлений у дисертаційній роботі метод – метод концептуального проектування ескортних буксирів із застосуванням методів теорії корабля та теорії проектування суден. Регресійні залежності відношень головних розмірів, які формують початкову точку оптимізаційного процесу, отримані за допомогою статистичних методів обробки даних. При формулюванні і розв'язанні задач функціонування і визначенні показників ефективності та надійності ескортного буксира використані інструменти дослідження складних динамічних систем з випадковими характеристиками, які знаходяться в умовах випадкових впливів, теорія випадкових функцій і теорія імітаційного моделювання. Для пошуку екстремуму показника ефективності і надійності ескортного буксира застосовані методи нелінійного програмування. При цьому система обмежень оптимізаційної задачі пошуку екстремуму цільової функції сформована за допомогою методу штрафних функцій. Теоретичну базу дисертаційної роботи становлять праці вітчизняних та закордонних вчених в області теорії корабля та проектування суден, оптимізації суден. Із загальної теорії проектування та оптимізації найбільше значення мають роботи А. В. Броннікова, В. В. Ашика, В. О. Некрасова, В. М. Пашина, О. І. Гайковича, Н. Б. Севастьянова та інших. Дослідження з проблем проектування буксирних суден, суден внутрішнього плавання, викладені в роботах Б. В. Богданова, А. Н. Гуровича, А. К. Осмоловського, А. В. Слуцького, М. І. Спітковского, А. П. Страхова, А. А. Родіонова. Дослідження функціонування ескортних буксирів викладені в роботах М.Б. Сліжевського, R. G. Allan, H. Hensen, L. Carral Couce, J.C. Carral Couce, J. Artyszuk.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в створенні методу визначення головних розмірів і характеристик ескортних буксирів на етапі їх концептуального проектування, в якому:

– **вперше** розроблено модель інженерних та навігаційних якостей ескортного буксира, в якій на основі даних буксирувальних випробувань таких

буксирів в дослідному басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) розроблено метод визначення діючих на корпус буксира гідродинамічних сил, встановлено залежність цих сил від орієнтації буксира щодо набігаючого потоку рідини, швидкості потоку і характеристик форми корпусу, необхідних для складання і розв'язання рівнянь руху буксира в задачі його функціонування;

– **вперше** сформульовано задачу функціонування ескортного буксира, в якій основною функціональною операцією обрано обслуговування буксиром сукупності суден різних типів і водотоннажності, які прибувають в морський порт, що дозволяє ескортному буксиру певної потужності ефективно обслуговувати судна певних діапазонів водотоннажності. В якості методу вирішення трансцендентних рівнянь руху ескортного буксира в цій операції обрано метод, аналогічний методу рішення оптимізаційної задачі визначення його головних розмірів;

– **вперше** як критерій ефективності обрано комплексний критерій економічної ефективності і надійності виконання буксиром основних функціональних операцій, що також враховує вимоги класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій, обумовлених необхідністю компенсації обмеженої керованості супроводжуваних суден при малих швидкостях їх ескортування розвиненою керуючою силою ескортного буксира;

– **вперше** на основі включення в оптимізаційну задачу вибору головних розмірів і характеристик ескортного буксира задачі його функціонування, запропонованих методів визначення діючих на корпус буксира гідродинамічних сил і рішення трансцендентних рівнянь його руху, а також вимог класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій, отримано метод концептуального проектування ескортних буксирів.

Теоретичне значення дослідження полягає у розробці математичних моделей інженерних та навігаційних якостей ескортних буксирів, моделей їх функціонування, критеріїв ефективності та надійності функціонування та

узагальненого методу вибору оптимальних головних розмірів ескортних буксирів на концептуальній (дослідницької) стадії їх проектування.

Практичне значення отриманих результатів визначається наступним:

- розроблений комплекс прикладних програм "EscortTug" забезпечує проведення дослідження ефективності і надійності ескортного буксира та отримання розв'язку задачі вибору основних його характеристик на концептуальній стадії проектування;

- результати розрахунків, виконаних на цій стадії можуть бути використані в проектно-конструкторських і науково-дослідних організаціях для обґрунтування вибору характеристик найбільш ефективного варіанту проектного судна;

- цей комплекс програм також може бути використаний на етапах розробки техніко-експлуатаційних вимог та техніко-експлуатаційного обґрунтування сучасних ескортних буксирів.

Впровадження результатів.

Результати дослідження використані в навчальному процесі Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при читанні лекцій з курсу ходовості та керованості суден. Розроблений метод визначення зусиль, що діють на ескортний буксир під час ескортування суден, та метод вибору оптимальних головних розмірів ескортних буксирів знайшли застосування в проектній організації «АСАБА ДИЗАЙН ЦЕНТР».

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є закінченим комплексним дослідженням. Усі теоретичні та практичні результати дисертації були отримані здобувачем особисто.

Конкретна особиста участь автора в одержанні наведених у дисертації наукових результатів полягає у виведенні структурних залежностей діючих на буксир сил в режимах ескортних операцій, розробці обладнання для визначення характеристик моделі при проведенні буксирувальних випробувань в дослідовому басейні, формуванні моделей інженерних та навігаційних якостей ескортного буксира, формуванні комплексного критерію

ефективності та надійності ескортного буксира з урахуванням вимог класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій, формулюванні оптимізаційної проблеми вибору головних розмірів і характеристик ескортного буксира на стадії концептуального проектування з включенням в неї запропонованих структурних залежностей діючих на корпус буксира гідродинамічних сил, методу розв'язання трансцендентних рівнянь його руху в задачі функціонування та вимог класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій при виконанні оцінки ефективності та надійності ескортних операцій.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались і отримали позитивну оцінку на II Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (5–7 жовтня 2011 р.), на науково-технічній конференції «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (23–25 травня 2012 р.), на II науково-технічній конференції «Экспериментальные методы теории корабля» (20 вересня 2013 р.), на V Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (8–10 жовтня 2014 р.), на науково-технічній конференції «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (20–22 травня 2015 р.), на науково-технічній конференції «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (23–24 травня 2018 р.), на науково-технічній конференції «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (23–24 травня 2018 р.), на науково-технічній конференції «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (20–21 травня 2020 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 8 наукових робіт, а саме: 5 статей у збірниках наукових праць, які включені до переліку

наукових фахових видань України (1 без співавторів), 3 статті в періодичних виданнях іноземних держав, 2 з яких входять до наукометричної бази Scopus, 9 тезах доповідей.

Отримано авторське право (в співавторстві) на комп'ютерну програму «EscortTug». Розроблено програму «EscortTugForces», яка рекомендована Регістром судноплавства до практичного використання при призначенні ескортного класу для проектованого буксира без проведення натурних випробувань після його побудови.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Дисертація містить 162 сторінки основного матеріалу, 53 рисунка, 9 таблиць, 101 найменування літературних джерел. Обсяг додатків – 64 сторінки.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ ТА ПЕРСПЕКТИВА ЇХ РОЗВИТКУ

1.1 Операції буксирів на морі, сучасний стан флоту портових, рятувальних та ескортних буксирів

Буксирні судна – велика категорія морських суден та суден внутрішнього плавання. Вони служать для транспортування суден та плавучих споруд, перестановок в портах несамохідних і транспортних суден, для введення суден в порти та виведення з них, проводки через канали та шлюзи, для супроводу (ескортування) великотоннажних суден, які транспортують небезпечні вантажі при русі їх по вузькому фарватеру з малими швидкостями, для надання допомоги суднам, які зазнали аварії, для гасіння пожеж та багатьох інших цілей.

Різний характер виконуваних робіт в різних умовах плавання визначив необхідність в буксирних суднах, що мають при задоволенні вимог усіх морехідних якостей різні експлуатаційно-технічні характеристики. Це привело до появи суден з різними архітектурними і конструктивними особливостями. У зв'язку з цим сучасні буксирні судна класифікуються за низкою основних ознак:

1. Належність буксирних суден до морських або внутрішнього плавання.
2. За районом плавання.
3. За загальним або спеціалізованим призначенням.
4. За типом енергетичної установки.
5. За типом рушійно-рульового комплексу.
6. За льодовим класом.

А також за деякими іншими ознаками.

Залежно від призначення та довжини лінії, на якій вони можуть працювати, буксирні судна поділяються на лінійні, рейдові та портові.

Загальне призначення визначає архітектурно-конструктивний тип буксира, співвідношення його головних розмірів, потужність силової установки, тип рушійно-рульового комплексу, кількість членів екіпажу, автономність і т.д.

Спеціалізоване призначення буксирних суден визначається необхідністю оснащення їх спеціалізованим обладнанням, вибором відповідної форми та конструкції корпусу, головних розмірів та коефіцієнтів повноти корпусу, суднових пристроїв та систем. Спеціалізовані буксирні судна – кантувальники, рятувальники, ескортні, шлюзові та інші.

Типи рушійно-рульового комплексу, які застосовуються на буксирних судах:

- гвинт фіксованого кроку з рулем,
- гвинт фіксованого кроку в насадці з рулем,
- гвинт регульованого кроку в насадці з рулем,
- гвинт регульованого кроку в поворотній насадці,
- гвинт фіксованого кроку в поворотній насадці,
- водометний рушій,
- крильчастий рушій,
- повноповоротна гвинто-рульова колонка (ASD).

Найбільшого поширення набули буксири рейдові і портові транспортно-маневреного призначення, лінійні і багатоцільові, морські буксири, рятувальники і буксири з функціями пожежних і криголамів.

Портові буксири виконують транспортно-маневрені операції і мають відносно малі розміри корпусу, мінімальний надводний борт і невелику потужність. При цьому вони повинні мати високу маневреність, вільно переміщатися між суднами, причалами і суднами, працювати в складних умовах, характерних для обмежених акваторій.

Буксири кантувальники відрізняються від портових і рейдових буксирів вищими маневреними і тяговими характеристиками, а також меншими розмірами. Вони мають гладку палубу для зручності роботи з буксирними канатами і тросами, які необхідно часто віддавати і приймати. У

кантувальника кормова частина палуби в районі буксирного гаку робиться вільною.

Багатоцільові буксири крім лінійних буксирувань виконують роботи в портах, забезпечують пожежну безпеку та проведення рятувальних операцій. У порівнянні з портовими і рейдовими буксирами, вони мають значно більшу автономність і дальність плавання. На них розміщують вантажні лебідки та вантажний трюм.

Спеціалізовані буксири рятувальники виконують:

- рятування людей з суден, що терплять аварію;
- гасіння на судах пожеж;
- зняття аварійного судна з мілини;
- буксирування аварійного судна на базу;
- рятувальне забезпечення бурових робіт.

Останнім часом великого поширення набув новий тип буксирів – ескортний буксир. Цей тип буксирів має конструктивні відмінності у формі корпусу, загальному розташуванні і в розташуванні буксирної лебідки.

Ескортування застосовується для великотоннажних танкерів, газововозів, хімовозів і інших суден, що перевозять небезпечні вантажі при їх русі по складному фарватеру, поблизу берега, при складних погодних умовах. Ескортний буксир рухається за великотоннажним судном, з корми якого подано буксирний канат на ескортну лебідку через носовий клюз буксира. При необхідності такий буксир може виконати швидку зупинку судна або забезпечити керування судном при виході з ладу у нього рульової машини.

Для ескортування буксиру необхідні спеціальні обводи корпусу, що забезпечують високу остійність і маневреність, ескортна лебідка з тяговим зусиллям, яке значно перевищує тягове зусилля лебідок портових буксирів, а також пропульсивна установка великої потужності. В якості рушія на таких буксирах застосовуються повноповоротні гвинто-рульові колонки (ГРК) або крильчастий рушій. Повноповоротні колонки часто оснащуються гвинтами регульованого кроку. Центральний скег, розміщений в діаметральній площині

в днищовій частині спільно з гвинто-рульовими колонками забезпечує можливість утримувати буксир не тільки під різними курсовими кутами, а й перпендикулярно напрямку руху супроводжуваного судна. Керуюча сила, що виникає при цьому на корпусі буксира, може мати величину, більшу за величину тяги на гаку.

На даний час спостерігається загальна тенденція в еволюції портових буксирів, яка складається в безперервному нарощуванні їх потужностей і значному поліпшенню характеристик керованості.

Розміри портових буксирів також безперервно змінюються. Більш потужні двигуни встановлюються в корпусах менших розмірів. Невеликі, дуже маневрені і потужні буксири представляють інтерес для розвитку портів, так як їх простір зі збільшенням продуктивності причалів і збільшенням розмірів обслуговуваних судів залишається обмеженим, тому буксири з більшою потужністю та поліпшеною маневреністю стають більш необхідними [8], [9].

Слідом за збільшенням потужності портових буксирів спостерігається і зменшення їх числа в обслуговуванні суден, як в розрахунку на одне судно, так і в складі буксирного флоту порту. У зв'язку з цим висловлюються припущення про те, що скорочення числа буксирів через введення більш потужних одиниць може мати в цілому негативні наслідки для портів.

Суть цих наслідків полягає в наступному [7], [10]:

- зменшена кількість буксирів може викликати проблеми у випадках виникнення суворих погодних умов або піків в русі суден;

- введення в дію більш потужних буксирів, яке приводить до скорочення числа буксирів, що використовуються на одному судні, наприклад, – від чотирьох до двох одиниць, зумовить появу додаткових ризиків, які можуть бути компенсовані лише відповідним збільшенням надійності використовуваних технічних засобів. Дійсно, в тому випадку, коли судно супроводжується чотирма буксирами і один буксир відмовляє, три буксири все ще залишаються в супроводі, який в більшості випадків виявляється достатнім

для того, щоб безпечно керувати судном. У тих же випадках, коли судно супроводжується двома потужними буксирами, і один буксир відмовляє, безпечне супроводження судна тільки одним буксиром стає проблематичним;

– буксири, до того ж, повинні бути відповідними за розмірами до розмірів судна. Це означає, що малі судна повинні супроводжуватися переважно малими буксирами. Плавне і якісне супроводження малих суден потужними буксирами стає більш важким. Кнехти і кіпові планки малих суден не настільки міцні по відношенню до сил, які може розвинути потужний буксир. Ця ж обставина є проблемою і для великих суден, які супроводжуються сучасними потужними буксирами з тяговими зусиллями 60–70 тон.

– заміна ряду малих буксирів більш потужним буксиром може дати вигоду власникові буксирного флоту завдяки скороченню загальних витрат і зменшення витрат на утримання команд буксирів. Однак введення в дію більше потужних буксирів автоматично не означає, що капітани суден при вході в порт будуть замовляти менше буксирів. Ті з них, які зазвичай використовували один або два буксири, будуть як і раніше замовляти один або два. Разом з тим капітани суден, які використовують, наприклад, чотири буксири, після прибуття в порт в загальному випадку будуть замовляти ту ж їх кількість, якщо така виявиться в наявності, хоча і в більш потужному складі.

У таких випадках буксирна компанія, яка зробила великі інвестиції в розвиток потужності свого флоту, може зазнати збитків, так як судна, що використовують ту ж кількість буксирів, можуть платити ті ж буксирні збори.

Таким чином, використання потужних портових буксирів може мати різну інтерпретацію залежно від економічних пріоритетів зацікавлених сторін.

Судновласник зазвичай бажає прискорення виконання портових операцій. Це в свою чергу приводить до використання більш потужних буксирів, порт, з іншого боку, може не мати повторного використання дуже потужних буксирів та не зможе повернути інвестиції в розвиток свого буксирного флоту [7], [10].

Буксирний флот України можна оцінювати по двом показникам – кількісному та якісному. По кількісному показнику у всіх портах України на початок 2017 року кількість морських буксирів державних підприємств складала 96 одиниць, ще 19 буксирів знаходяться в приватних компаніях [24]. Розподіл всієї кількості буксирів представлено в табл. 1.1

Таблиця 1.1 – Розподіл кількості морських буксирів в портах України

Оператор	Кількість буксирів, од.	Відсоток %
МТП	85	74
АМПУ	9	8
«Трансшип»	8	7
«Марконі»	5	4
Дніпро-Бузький порт МГЗ	4	3
Укртранснафта	2	2
Екофлот	2	2
Усього	115	100

Якісний показник – це розподіл буксирного флоту за віком та за потужністю головного двигуна, дозволяє зробити висновок про необхідність заміни застарілих суден більш ефективними і прибутковими новими буксирами. В таблиці 1.2 наведені дані про склад буксирного флоту державних підприємств України за віком.

Таблиця 1.2 – Розподіл буксирного флоту державних підприємств України за віком.

Вік	Кількість буксирів, од.	Відсоток, %
До 5 років	5	5
5–10 років	5	5
10–20 років	4	4
21–30 років	19	20
31–40 років	24	25
Більше 40 років	39	41
Усього	96	100

Аналіз даних таблиці 1.2 дозволяє зробити висновок про те, що тільки 10 буксирів мають термін експлуатації до 10 років. Це судна, які можна вважати новими, але вони складають лише 10 відсотків від загальної кількості буксирів. Старші 30 років – 63 буксира (66% від загальної кількості), 39 буксирів мають термін експлуатації більше 40 років (41% від загальної кількості). Більшість цих суден була побудована ще за часи Радянського Союзу і застаріла як в моральному, так і в технічному плані, але вони продовжують експлуатуватися. На рис. 1.1 показаний розподіл буксирного флоту України за віком.

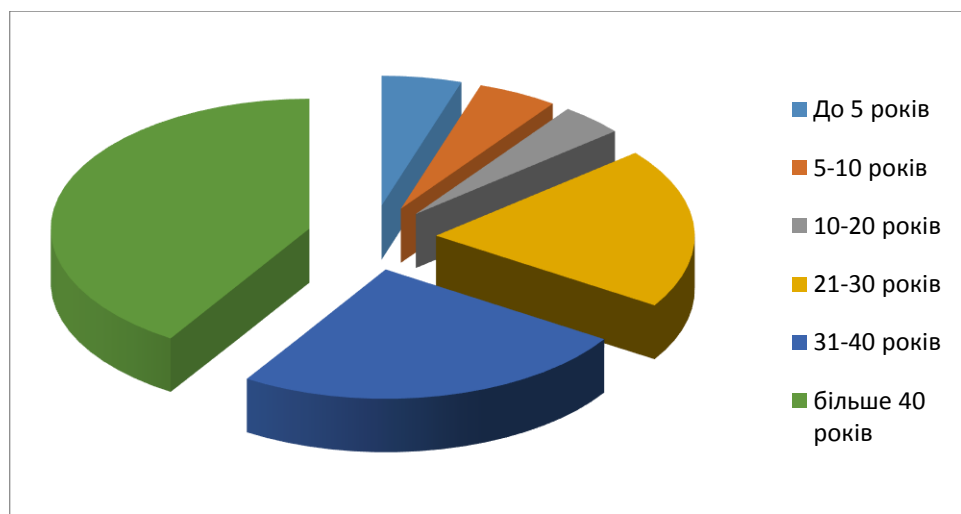


Рисунок 1.1 – Розподіл буксирного флоту України за віком.

Застарілі судна в розвинутих країнах в постійному режимі майже не експлуатуються, оскільки це недоцільно з економічної точки зору. Вони споживають більше палива, частіше виходять з ладу. Ефективність та надійність таких суден значно нижче.

Збільшення обсягів вантажопотоків приводить до збільшення тоннажу суден, які заходять до портів України. Розміри суден для перевезення різних вантажів, в тому числі і контейнерів, за останні роки значно збільшилися. В морські порти України періодично заходять судна довжиною більше 300 метрів. Буксири, більшість з яких зараз є в наявності в портах України, з труднощами справляються з проводкою, кантуванням і швартуванням суден

таких розмірів, оскільки мають недостатню потужність. Для надійного виконання операцій з великотоннажними суднами потрібно збільшувати кількість буксирів, а це призводить до збільшення експлуатаційних витрат і зменшення прибутку, який отримують порти. В табл. 1.3 представлений склад буксирного флоту державних підприємств України за потужністю головного двигуна [24].

Таблиця 1.3 – Склад буксирного флоту державних підприємств за потужністю головного двигуна

Потужність, к.с.	Кількість буксирів, од.	Відсоток %
До 1000	40	42
1000-2000	23	24
2000-3000	13	14
3000-4000	3	3
4000-5000	5	5
Більше 5000	12	12
Усього	96	100

На рис. 1.2 представлено розподіл буксирного флоту за потужністю.

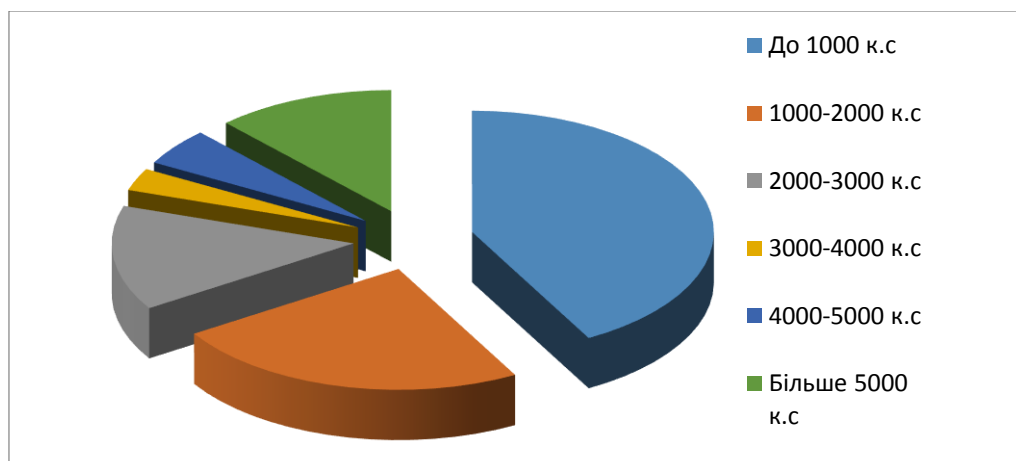


Рисунок 1.2 – Розподіл буксирного флоту України за потужністю головного двигуна

Аналізуючи розподіл буксирів за потужністю, можна бачити, що майже дві третини (66 відсотків) морських буксирів українських портів мають потужність головного двигуна, меншу за 2000 к.с., яка недостатня для

проведення операцій з великотоннажними суднами. Потужність, більшу за 3000 к.с. мають лише 20 відсотків буксирів.

Суттєве зменшення часу, необхідного для проведення швартовних операцій, потребує іншої продуктивності від сучасного буксира. Ці обставини сприяють поступовій заміні старих малопродуктивних буксирів на нові сучасні буксири. Сучасна світова тенденція розвитку буксирного флоту полягає в підвищенні потужності енергетичної установки без суттєвого збільшення головних розмірів судна. Для забезпечення високої маневреності в якості рушія все частіше застосовуються гвинто-рульові колонки, не зважаючи на те, що вартість такого типу рушія значно більша в порівнянні з традиційним для портових буксирів гвинтом в поворотній насадці.

1.2 Аналіз основних елементів і характеристик сучасних буксирів

Основою для аналізу послужили статистичні дані по ескортним і багатофункціональним портовим буксирам, які були побудовані на суднобудівних підприємствах всього світу за останні 20 років (Додаток 1). В роботі розглядаються ескортні буксири, у яких в якості рушія використовуються повноповоротні гвинто-рульові колонки. На рис. 1.3 представлений ескортний ASD буксир з двома гвинт-рульовими колонками.

Ескортні буксири, на відміну від класичних портових буксирів, мають найбільш потужну ескортну лебідку, яка розташована в носовій частині. Розвинений скег, розміщений в діаметральній площині (ДП) має велику довжину, завдяки чому буксир краще утримується під необхідними кутами дрейфу при ескорті судна. На рис 1.4 представлено загальне розташування сучасного ескортного ASD буксира підприємства «Craneship» корпорації «Transship».

Аналізуючи основні характеристики існуючих ескортних буксирів можна бачити, що їх головні розміри знаходяться в достатньо вузьких межах. Довжина їх становить від 25 до 35 метрів, найбільш поширені ескортні

Сучасні найбільш відомі іноземні виробники ескортних буксирів – «Damen» (Нідерланди), «Robert Allan» (Канада), «Пелла» (Росія). Серед вітчизняних виробників – «Краншип». На рис. 1.5 представлений ряд багатоцільових ASD буксирів корпорації «Damen» [25].

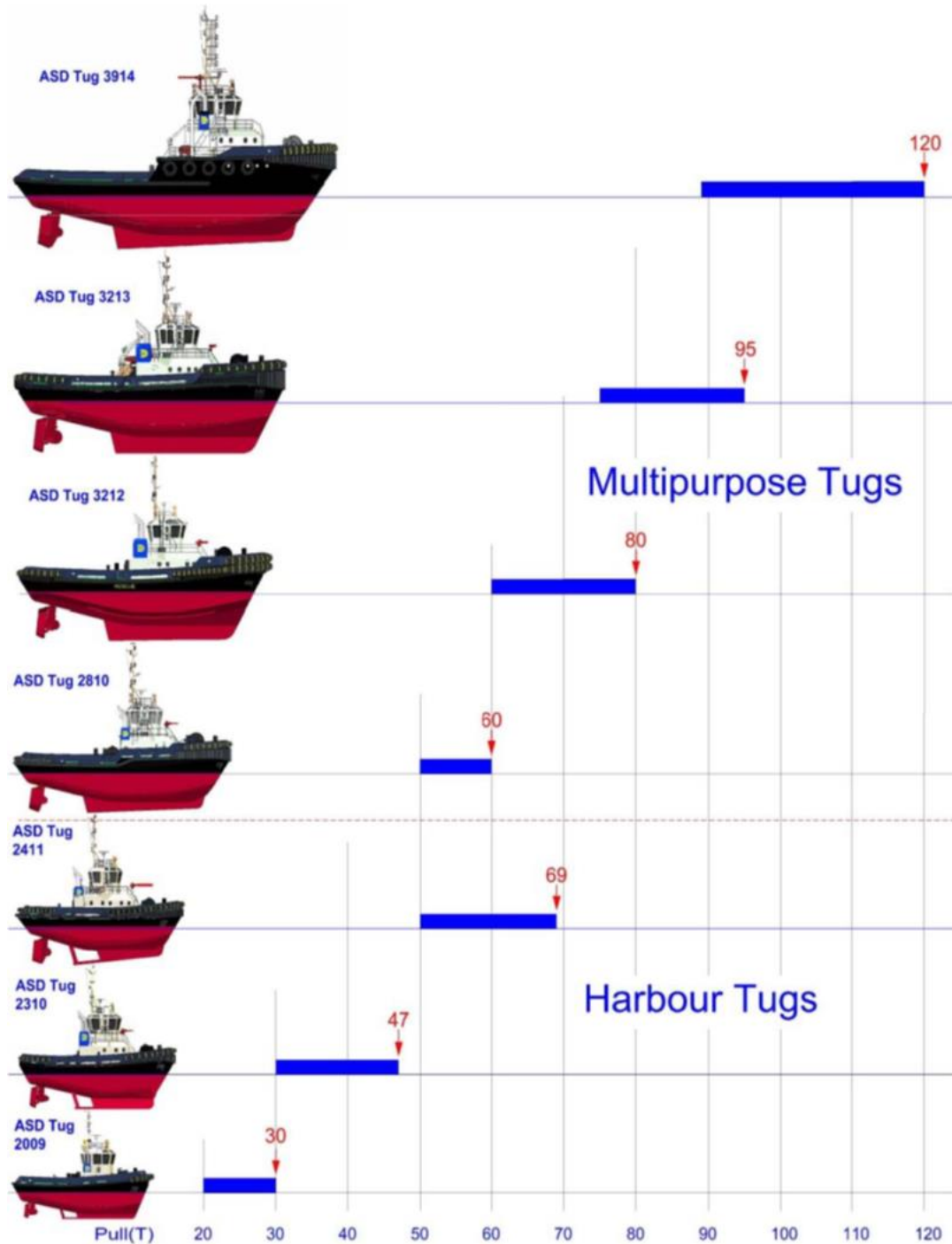


Рисунок 1.5 – Ряд багатоцільових ASD буксирів корпорації «Damen»

Обробка даних геометричних характеристик 50 ескортних буксирів дозволила отримати залежності головних розмірів, потужності енергетичної установки, керуючого зусилля, тяги на гаку.

На рис. 1.6 представлена залежність довжини між перпендикулярами ескортних буксирів L_{pp} від потужності головного двигуна N_e .

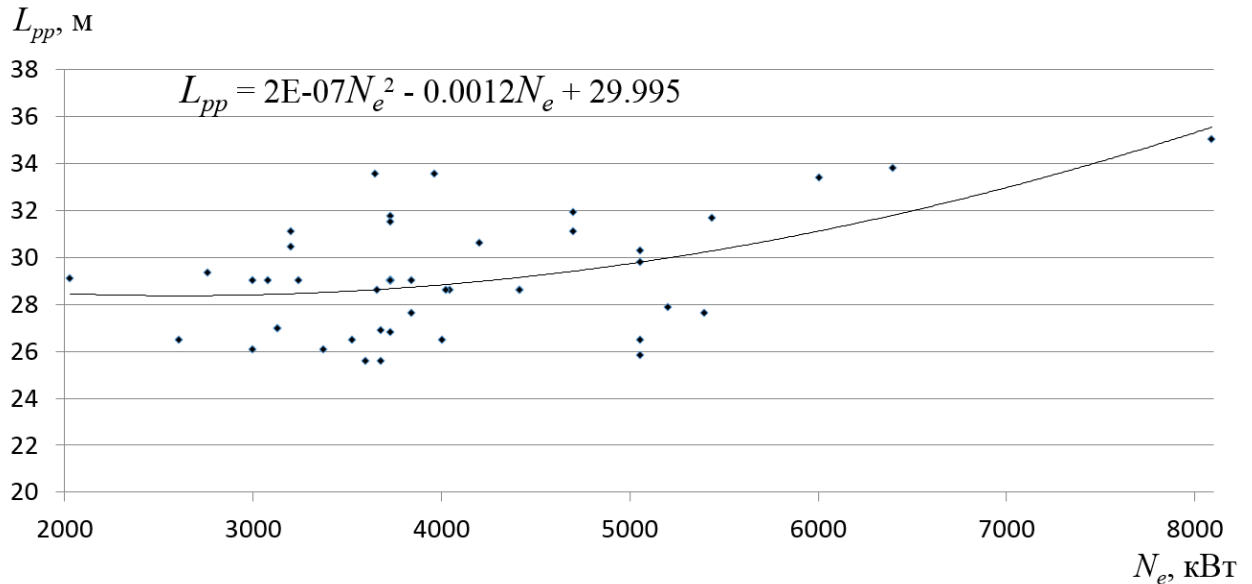


Рисунок 1.6 – Залежність довжини між перпендикулярами від потужності головного двигуна

Аналізуючи залежність довжини ескортних буксирів від потужності головного двигуна, можна бачити, що в межах довжин від 26 до 32 метрів найбільш поширене значення потужності складає 3000÷4000 кВт. Цієї потужності достатньо для створення ескортним буксиром керуючого зусилля 70÷80 тон. Такого керуючого зусилля потребують під час ескорткування судна дедвейтом 100÷130 тисяч тон. Достатня довжина буксира забезпечує необхідну величину керуючого зусилля.

Ширина має для ескортного буксира важливу роль, так як суттєво впливає на остійність і поворотність – якості, особливо важливі для буксирних суден. Величина відношення довжини судна L до ширини B , від якого залежать ходові якості, а також зручність розміщення рубки, носової ескортної лебідки,

житлових та інших приміщень, для ескортних буксирів знаходиться в межах $2,3 \div 3,2$.

Відношення L/B в середньому близько 2,7 пояснюється помірними швидкостями ходу і необхідністю підвищеної маневреності при роботі в акваторіях портів і на рейдах. На рис. 1.7 представлені залежності ширини буксира B від довжини між перпендикулярами L_{pp} .

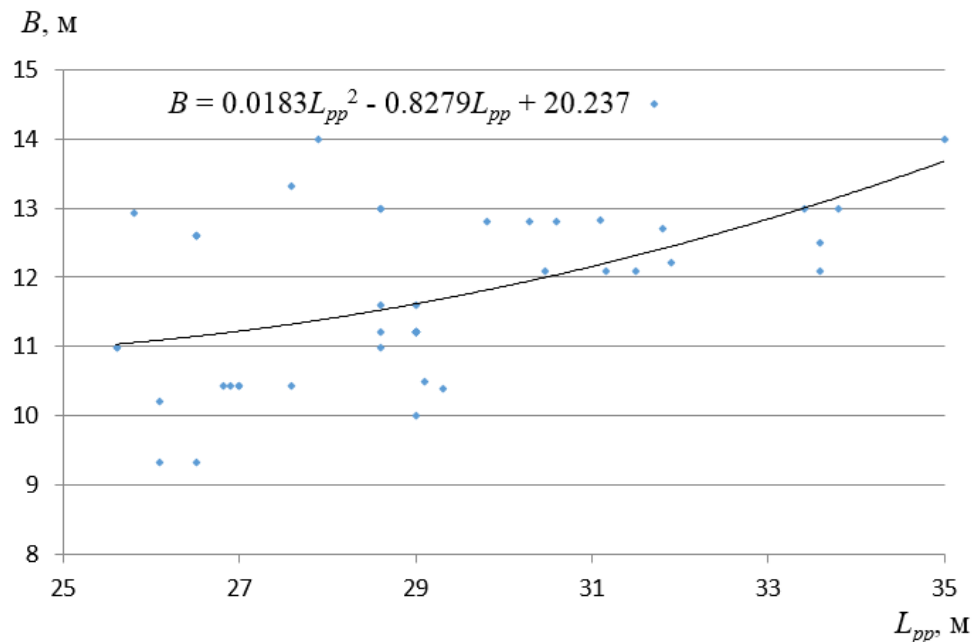


Рисунок 1.7 – Залежність ширини буксира від довжини між перпендикулярами

Відношення ширини B до осадки d характеризує остійність судна і для ескортних буксирів становить $2,3 \div 3,3$. Середнє значення B/d має величину, рівну 2,8 і визначається жорсткими вимогами Класифікаційних товариств до поперечної остійності даного класу буксирів.

При ескортування судна буксирний канат може перебувати під кутом від 30 до 90 градусів по відношенню до діаметральної площини буксира. При цьому кут дрейфу буксира може становити від 20 до 60 градусів, а в режимі, коли ескортний буксир виконує гальмування судна, може доходити до 90 градусів. Зусилля буксирного канату, прикладене через носовий клюз буксира, створює значний кренувальний момент. В цей момент буксир отримує крен,

при якому палуба може частково занурюватися в воду. На рис. 1.8 представлена залежність осадки d від ширини B .

Висота борту і відношення висоти борту буксира D до осадки d характеризують поздовжню міцність, морехідність, остійність і ефективність використання потужності судна. Відношення D/d зберігається в середньому рівним $1,3 \div 1,45$. На рис. 1.9 зображено залежність висоти борту D від осадки d .

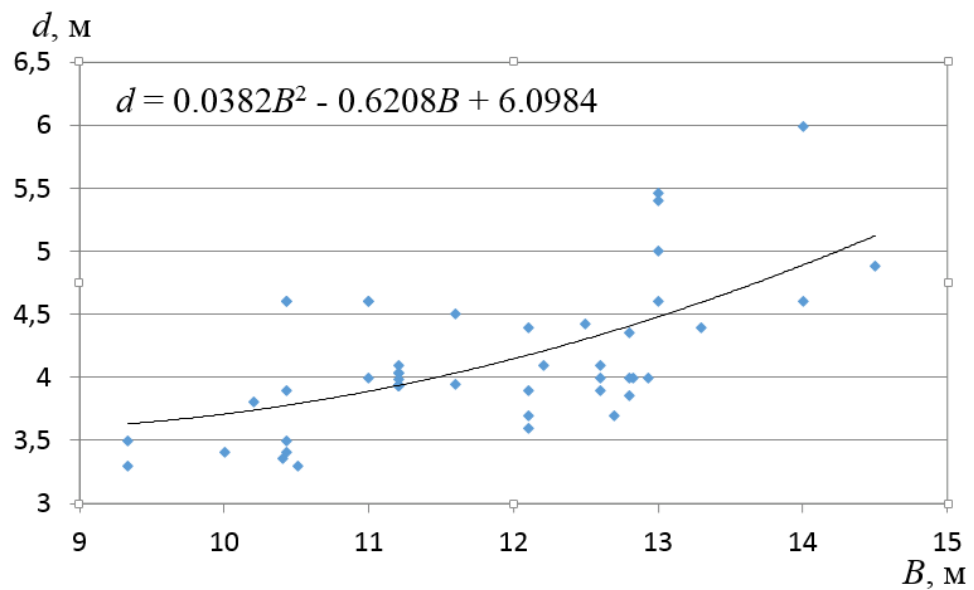


Рисунок 1.8 – Залежність осадки від ширини

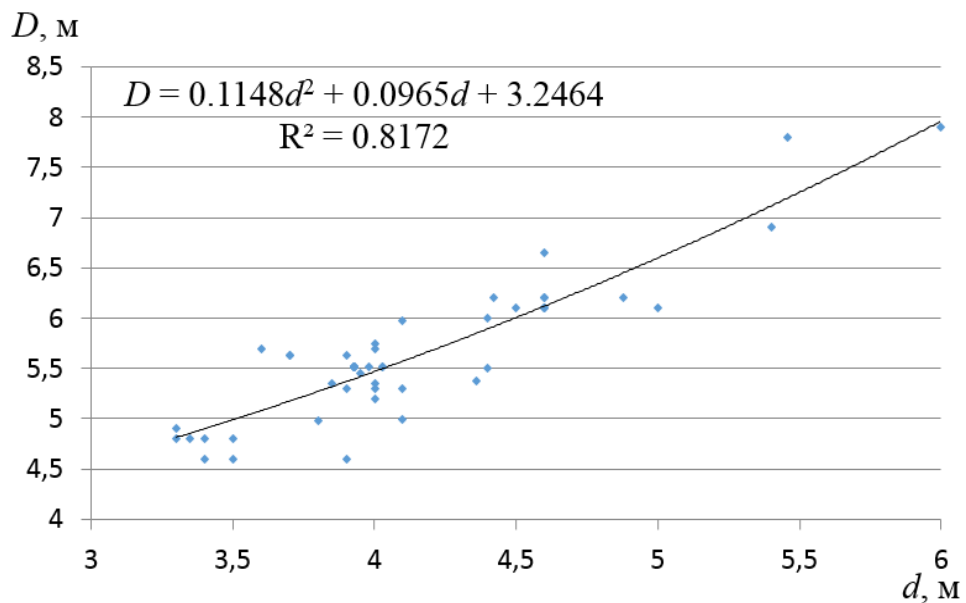


Рис. 1.9 – Залежність висоти борту ескортного буксира від осадки

Швидкості вільного ходу ескортних буксирів зазвичай становлять $12 \div 14,5$ вузлів. Числа Фруда, при яких експлуатуються буксири, знаходяться в достатньо широких межах $0,3 \div 0,55$. Відповідно і коефіцієнти загальної повноти приймаються зазвичай в межах $0,45 \div 0,55$.

Характеристикою тягових якостей буксирних суден є залежність між потужністю головного двигуна і тягою на гаку.

Якщо розглядається швартовний режим, то така залежність характеризує досконалість рушійного комплексу. Оскільки опір буксирного судна зазвичай становить невелику частку опору судна, яке буксирується, можна вважати несуттєвим відмінність між значеннями тяги в режимі буксирування судна і значенням тяги на швартовному режимі. На рис. 1.10 показана залежність тяги на гаку BP від потужності головного двигуна N_e , отримана шляхом обробки даних ескортних буксирних суден.

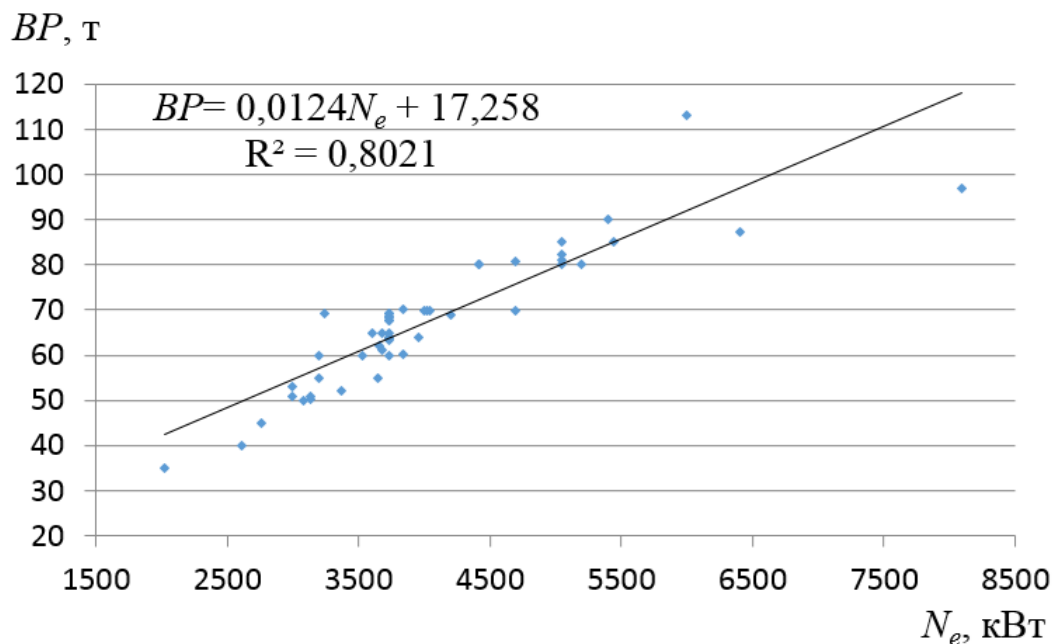


Рисунок 1.10 – Залежність тяги на гаку від потужності головного двигуна

Показником, що характеризує ефективність рушійного комплексу буксира, є коефіцієнт питомої потужності

$$K = \frac{N_e}{BP}, \quad (1.1)$$

де BP – тяга на гаку на швартовному режимі, т; N_e – потужність головного двигуна (ГД), кВт.

Рис. 1.10 показує, що тяга на гаку має майже лінійну залежність від потужності головного двигуна. Значення коефіцієнта питомої потужності K на швартовному режимі для сучасних буксирів знаходяться в межах $53 \div 65$ кВт/т.

Якщо розглядається режим ескортування при заданій швидкості, а ця швидкість може мати значення до 10 вузлів, то показником ефективної роботи ескортного буксира є величина керуючої сили FS . На рис. 1.11 представлена залежність керуючої сили FS при швидкості буксирування 10 вузлів від потужності головного двигуна N_e ескортного буксира.

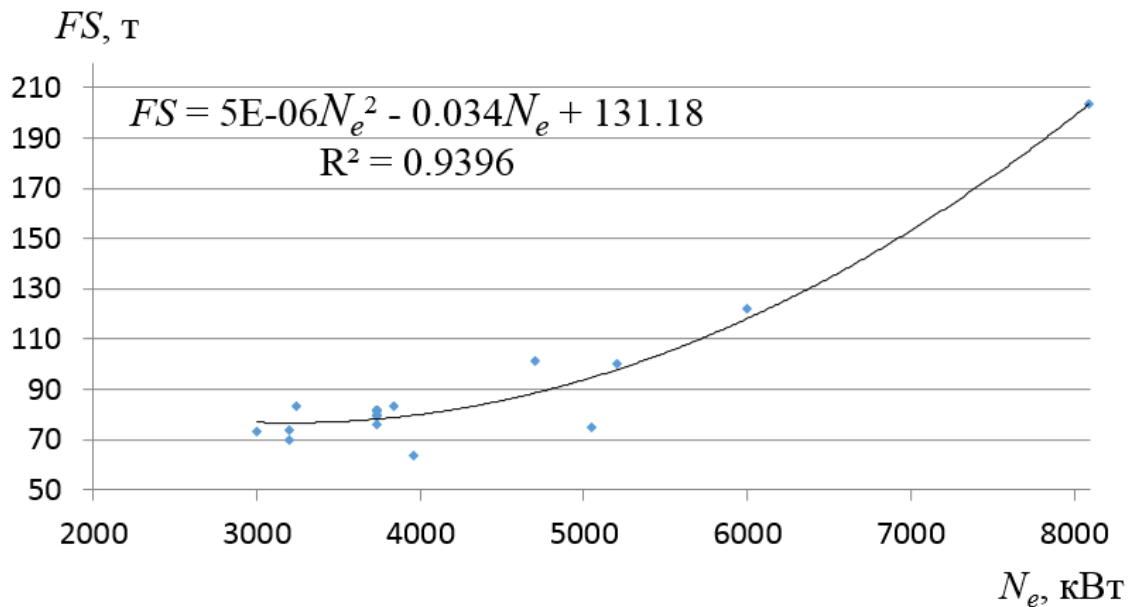


Рисунок 1.11 – Залежність керуючої сили від потужності головного двигуна

Виконаний аналіз залежностей головних розмірів та характеристик ескортних буксирів, результати яких представлені на рис. 1.6–1.11 надав можливість отримати наступні формули [26]:

$$L_{pp} = 2e^{-0,7N_e^2} - 0,0012N_e + 29,995; \quad (1.2)$$

$$B = 0,0183L_{pp}^2 - 0,829L_{pp} + 20,237; \quad (1.3)$$

$$d = 0,0382B^2 - 0,6208B + 6,0984; \quad (1.4)$$

$$D = 0,114d^2 - 0,0965d + 3,2464; \quad (1.5)$$

$$FS = 5e^{-0,6N_e} - 0,034N_e - 131,18; \quad (1.6)$$

$$BP = 0,00124N_e + 17,258. \quad (1.7)$$

Ці формули можуть бути використані для наближеного визначення головних елементів ескортного буксира на початкових етапах його проектування та для формування початкової точки пошуку їх значень в оптимізаційній задачі визначення головних елементів ескортного судна.

1.3 Огляд методів оптимізації головних елементів буксирів

1.3.1 Постановка задач оптимізації головних елементів буксирів

Створення методів визначення головних розмірів судна є однією з основних задач теорії проектування суден. Після визначення головних елементів, коефіцієнтів форми корпусу, форми обводів, розробки схеми загального розташування, конструкції, розміщення спеціального обладнання, а також показників його морехідних якостей, частина роботи, що залишається, буде складатися з деталізації прийнятих рішень.

Подальша частина проекту буде визначатися рішенням питань теорії корабля, будівельної механіки та технології суднобудування. Питання теорії корабля, такі як остійність, ходовість, керованість, морехідність, а також питання міцності та інших якостей судна будуть мати перевірочний характер.

Існуючі сучасні системи автоматичного проектування суден – “Tribon”, “Nupras”, “Aveva”, дозволяють вирішувати задачі останніх етапів проектування, починаючи з технічного проекту. Ці програми дозволяють вносити коректування в початкові етапи проектування, але найбільш важливий перший етап – вибір головних розмірів та інших характеристик судна вони визначити не можуть [27].

При визначенні головних розмірів доводиться стикатися з певними труднощами, так як необхідно задоволення великої кількості вимог, які висуваються до проєктованого судна. Складний взаємозв'язок між цими

вимогами, а також обмежена кількість рівнянь, які встановлюють зв'язок між характеристиками та елементами проектного судна, потребують знаходження раціональних залежностей, які б задовольняли ці вимоги.

В даній дисертаційній роботі в якості початкової системи обрано ескортний буксир. Ця система містить певну кількість підсистем, які входять до неї і розширюється до представлення у вигляді елемента більш складної системи, до складу якої входять: ескортний буксир, середовище діяльності, задане районом обслуговування, сукупність суден, які потребують ескортного супроводу і т.д.

Розглядаючи ескортний буксир як складну систему, необхідно приймати до уваги, що вона складається з взаємопов'язаних підсистем, до яких входить корпус, скег, енергетична установка, гвинто-рульовий комплекс, ескортна лебідка. Крім того, кожна з цих підсистем може бути поділена на менш складні елементи [27], [28].

Головною задачею системного підходу в проектуванні є комплексне дослідження системи. Кожен елемент зі складу системи потрібно розглядати в зв'язку та взаємодії з іншими елементами. Тому оптимізацію головних елементів та характеристик ескортного буксира неможливо виконувати без урахування систем більш високого рівня, які для нього стають зовнішньою середою. Кожний ескортний буксир повинен розглядатися як елемент такої системи, а не як окрема самостійна одиниця. При цьому на перший план висуваються проблеми взаємодії ескортного буксира з навколишнім середовищем та множенням суден, які потребують ескортного супроводу. Наступним кроком буде розглядання його в якості елемента системи базування, потім елемента допоміжного флоту [27].

Розглядаючи взаємодію ескортного буксира з навколишнім середовищем та ескортованим судном, він стає динамічною системою, стан якої постійно змінюється за часом. Але визначити стан судна в кожний момент часу неможливо через неповну інформацію про майбутні умови експлуатації та невизначеність початкових даних процесу проектування. До цих даних

можна віднести невизначеність характеристик та кількості суден, які потребують ескортного супроводу, ціни на паливо, ремонт. Тому питання невизначеності інформації займає важливе місце в постановці задачі проектування. Вирішується ця задача за допомогою використання теорії випадкових функцій, яка враховує різні події процесу побудови та експлуатації судна, а також значення цих характеристик.

При постановці задачі проектування судна її зручно поділити на зовнішню та внутрішню задачі проектування [29], [30]. Рішення зовнішньої задачі проектування зазвичай полягає в складанні технічного завдання на проектування, в якому викладено вимоги до майбутнього судна. До цих вимог належать такі основні техніко-експлуатаційні характеристики, як тип та потужність головного двигуна, район обслуговування, дальність плавання та автономність, кількість екіпажу, склад спеціального обладнання [29]. Рішення зовнішньої задачі проектування ескортного буксира потребує визначення району обслуговування, розглядання умов його використання, взаємодія з різними типами суден, які необхідно супроводжувати. Особливістю ескортного буксира є його постійна готовність для виходу в море при різних погодних умовах, різноманітні режими роботи в порту при відсутності ескортування, експлуатація не по визначеному розкладу – ярко визначений стохастичний характер умов експлуатації. Ці обставини приводять до того, що задачі функціонування ескортного буксира повинні бути сформульовані та вирішені як випадкові функції.

При цьому в зовнішній задачі проектування на дослідження функціонування ескортного буксира та рішення загальної задачі ескортування великотоннажних суден потрібно сформувати як цільову функцію процесу пошуку оптимального варіанту проектного рішення з великої кількості альтернатив, так і сукупність обмежень, які обумовлені висунутими вимогами до функціонування системи.

Рішення внутрішньої задачі проектування – визначення головних розмірів судна. Виконати цю задачу необхідно так, щоб задовільнити усі

вимоги технічного завдання при найкращих економічних показниках. При цьому усі характеристики і техніко-експлуатаційні показники з технічного завдання стають елементами проектної документації. Завдяки досягненням в таких областях, як математичні методи оптимізації, дослідження операцій, кораблебудування, усі задачі дослідницького проектування стало можливим вирішувати за допомогою багатоваріантних розрахунків по більш точним математичним моделям. Це дозволило врахувати всі етапи проектування судна від технічного опрацювання варіантів до оптимізації його головних елементів за критеріями ефективності [27–36].

Вивчаючи публікації, присвячені ескортним буксирам, слід відзначити, що їх кількість достатньо мала. Пов'язано це з тим, що ескортний буксир це достатньо новий та молодий клас буксирів. Супроводження великотоннажних суден виконувалося достатньо давно, але тільки останнім часом суттєве посилення вимог екологічних організацій до безпеки суден, які транспортують небезпечні вантажі та підвищення штрафів за забруднення навколишнього середовища під час аварій нафтоналивних суден, хімовозів, газовозів, та інших небезпечних суден, сприяло появі буксирів такого класу, як ескортний [8], [9]. Крім того, тільки в останні десятиріччя набув широкого розповсюдження такий тип рушіїв, як повноповоротна гвинто-рульова колонка з гвинтом регульованого кроку завдяки широкому застосуванню гідравлічних систем разом з сучасними електронними засобами керування та датчиками контролю. Такий тип рушіїв отримав велике розповсюдження не тільки серед ескортного класу буксирів, але і серед багатофункціональних буксирів, які будують провідні суднобудівні підприємства всього світу. Цей тип рушіїв забезпечує високу маневреність, поєднуючи її з надійністю.

Більша кількість публікацій, яка стосується морських буксирів, присвячена портовим і рятувальним буксирам, що представляють основну частину світового буксирного флоту. Найбільш відомі роботи були присвячені визначенню оптимальних головних елементів [1], оптимального типу і кількості буксирів порту [2], визначенню головних розмірів буксирних суден

і рятувальних буксирів [3–5], обґрунтуванню проектних характеристик портових буксирів для В'єтнаму [6], роботи, в яких виконано аналіз операцій буксирів всіх типів при їх використанні в найбільшій кількості морських портів світу [8], [9].

В даній дисертаційній роботі системний підхід в відношенні ескортного буксира визначається наступними параметрами [23]:

- ефективністю виконання буксиром задачі ескортування з врахуванням погодних умов і заданого розподілу суден, які відвідують морський порт;
- сучасними технічними можливостями, включаючи заміну традиційного гвинто-рульового комплексу повноповоротними гвинто-рульовими колонками;
- взаємозв'язком окремих підсистем між собою;
- застосуванням принципу ієрархічної оптимізації при отриманні проектного рішення.

Методи, які застосовуються в теперішній час при постановці задачі визначення головних розмірів буксирів, мають, як правило, детермінований характер і не враховують випадковість таких характеристик, як нерегулярність тривалості та режиму експлуатації, нестабільність цін на паливо та обладнання і т.д. Тому використання детермінованих методів є першим, і в ряді випадків, недостатнім наближенням. Час проведення ескортного супроводження може змінюватися в залежності від погодних умов, розмірів судна, стану його завантаження. В цьому випадку час ескортування слід вважати випадковою величиною і характеристики цієї випадкової величини визначати за допомогою закону розподілу за статистичними даними заходу суден в заданому районі обслуговування.

Стохастичний характер явищ при проектуванні та експлуатації ескортних буксирів можна врахувати, якщо в якості цільової функції оптимізаційної задачі вибору елементів судна буде використані ймовірнісні характеристики критерію «вартість – ефективність», який представлений в роботах [4], [5], [34–35]. Формулювання оптимізаційної задачі

концептуального проектування суден різних типів на основі цього критерію в найбільш загальному вигляді сформульовано в роботах В. О. Некрасова [4], [35].

Реалізація формулювання аналогічної задачі для ескортного буксира як проблеми нелінійного програмування наведена в роботах [21–24]. В цих роботах на основі створених моделей інженерних і навігаційних якостей ескортного буксира, моделей його функціонування, критеріїв ефективності та надійності наведено наступне формулювання оптимізаційної задачі вибору головних елементів:

Необхідно знайти мінімум цільової функції

$$\text{ЦФ}(U, X) = \frac{M[C(U, X)]}{P(U, X)} \rightarrow \min,$$

$$\begin{aligned} \text{при обмеженнях} \quad E_n(X) &\geq 0 & n = 1, 2, 3; \\ F_k(X) &\geq [F_k] & k = 1, 2, \dots, K; \\ PC_l[P_t] &\leq [PC_l] & l = 1, 2, \dots, L, \\ X &\leq X_q & q = 1, 2, \dots, Q, \end{aligned}$$

де $E_n(X) \geq 0$ – обмеження, які забезпечують необхідний рівень ефективності функціонування (обмеження плавучості, місткості, ходовості, значення керуючого зусилля на ескортоване судно);

$F_k(X) \geq [F_k]$ – обмеження, які забезпечують необхідний рівень безпеки при експлуатації судна: ймовірності виконання буксиром своїх функціональних операцій (пов'язані з такими морехідними та інженерними якостями, як остійність, непотоплюваність, керованість, морехідність, конструкційна міцність, надійність роботи механізмів, систем, обладнання);

$PC_l[P_t] \leq [PC_l]$ – функціональні обмеження фінансових коштів на забезпечення проектування, побудови та експлуатації буксира, а також компенсацію спричинених ним збитків;

$[F_k]$ – нормативні значення цих показників, які регламентуються класифікаційними товариствами і стандартами.

Більш докладніше розглядання цієї оптимізаційної задачі приведено в п'ятому розділі.

1.3.2 Моделі інженерних і навігаційних властивостей буксирів

Модель інженерних і навігаційних властивостей буксирів являє собою систему математичних виразів, які відображають властивості ескортного буксира у взаємозв'язку з його основними елементами і характеристиками.

1.3.2.1 Масове навантаження. Для створення моделі в першу чергу необхідно визначити масове навантаження буксира, яке можна отримати після того, як виконаний повний набір корпусу за Правилами класифікаційного товариства і зроблено типову розбивку за розділами навантаження. До цього часу вже потрібно мати відомості про повний склад деталей корпусу, механізмів, устаткування, силової установки і т.д. На стадії дослідницького проектування масове навантаження повинно бути визначено з максимально можливою точністю.

Повна водотоннажність складається з водотоннажності порожнем та дедвейту

$$\Delta = \Delta_{\Pi} + W_{DW}.$$

Водотоннажність порожнем визначається сума складових навантаження мас корпусу, надбудови, пристроїв, обладнання, систем, постачання та інших.

В практиці світового суднобудування в залежності від етапу проектування судна зараз використовується схема структурного розбиття судна на частини SWBS (Ship Works Breakdown Struktur), або ESWBS (Extended Ship Work Breakdown Struktur) [35–38].

В результаті обробки статистичних даних масового навантаження існуючих ескортних буксирів отримані залежності вимірників маси розділів навантаження, які визначаються залежностями (3.1–3.12).

1.3.2.2 Місткість. Для ескортних буксирів нерівності місткості формуються за допомогою відомих підходів теорії проектування суден [30].

1.3.2.3 Плавучість. Після визначення складових навантаження та форми

корпусу буксирів, формується рівняння їх плавучості. До складу цього рівняння входять головні розміри буксира та коефіцієнти форми його корпусу. Взаємовідношення головних розмірів ескортних буксирів та залежності їх від потужності головного двигуна були отримані при виконанні цієї роботи шляхом обробки бази даних, складеної за даними 50 буксирів, які були побудовані за останні 20 років на провідних суднобудівних підприємствах всього світу. Результати цієї обробки представлені на рис. 1.6–1.11. Це надало можливість отримати формули (1.2–1.7).

1.3.2.4 Остійність. Ця якість ескортних буксирів визначається за вимогами класифікаційних товариств [39–41].

1.3.2.5 Непотоплюваність та міцність. При використанні регресійних залежностей системи SWBS ці морехідні та інженерні якості суден не визначаються на стадії концептуального проектування, тому що регресійні залежності будуються на основі даних по суднам, які вже задовольняють вимогам класифікаційних товариств до міцності та непотоплюваності [35].

1.3.2.6 Ходовість. Для визначення буксирувального опору суден при їх русі без кутів дрейфу в проектних організаціях широке застосування отримали метод Ван Уртмерсена (Van Oortmerssen's method) [42] і метод Холтропа і Меннена (Holtrop and Mennen's Method) [43–46]. Ці методи базуються на регресійних залежностях, отриманих в результаті обробки даних випробувань моделей і натурних суден. Найбільше розповсюдження ці методи отримали для визначення опору транспортних суден з середніми значеннями коефіцієнту загальної повноти, але мають деякі обмеження на використання по параметрах форми корпусу судна. В дослідовому басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за останні двадцять років були проведені буксирувальні випробування моделей 6 багатоцільових та 10 ескортних буксирів на замовлення проектних організацій при різних кутах дрейфу [20]. Порівнюючи дані розрахунку опору за цими методами з даними модельних випробувань ескортних буксирів без кутів дрейфу було встановлено, що метод Холтропа і Меннена у порівнянні з методом Ван

Уртмерсена дає кращі результати в діапазоні швидкостей до 13 вузлів. Для ескортних буксирів середньоквадратична похибка розрахунку опору за методом Холтропа і Меннена не перевищує значення $3\div 5\%$. Після визначення буксирувального опору буксира при русі без кутів дрейфу за допомогою методу Холтропа і Меннена може бути також знайдено буксирувальну потужність буксира, потужність гвинто-рульових колонок та головних двигунів. В якості останніх на ескортних буксирах зазвичай використовуються високооборотні дизельні двигуни Caterpillar (95% буксирів Damen), Volvo–Penta, Scania та інші.

Однак ескортні буксири виконують свої операції не тільки без кутів дрейфу, а й у всьому їх діапазоні від 0 до 90 градусів. Це потребує розробки принципово нового методу визначення характеристик ходовості ескортних буксирів. Такий метод було створено в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова на основі обробки даних вищевказаних модельних випробувань, що отримані в його дослідному басейні, і створенні регресійних залежностей для сил дрейфу та опору руху ескортних буксирів [19], [20], [23]. На цій основі розроблено методику визначення цих сил, яка схвалена класифікаційним товариством для надання буксиру ескортного класу без проведення натурних випробувань, яка включає методику визначення потрібних характеристик гвинто-рульових колонок і потужностей двигунів [47]. Детальний опис створеного методу розрахунку ходовості ескортних буксирів наведено у розділі 3.

1.3.2.7 Керованість. Отримані регресійні залежності сил дрейфу та опору руху ескортних буксирів визначають так звані позиційні характеристики їх керованості, які характеризують цю властивість самих буксирів. Для визначення значень сил, що необхідні для безпечного супроводу буксиром суден різних дедвейтів, в роботі використані рекомендації Міжнародної морської організації, які отримані на основі розрахунків характеристик маневрів Зіг-Заг цих суден [48], [49].

1.3.2.8 Морехідність. Характеристики морехідності ескортних буксирів також зазвичай визначаються за допомогою залежностей теорії проектування суден [28], [50]. Більш детально це питання розглянуто в розділі 3.

1.3.3 Задачі функціонування буксирів

Основними операціями функціонування ескортних і багатоцільових ескортних буксирів є операції супроводження спеціалізованих суден, які перевозять небезпечні вантажі, при русі цих суден з відносно малими швидкостями в прибережних водах в умовах вітру та хвилювання [39–41]. До цих суден відносяться танкери, хімовози, газовози, а також судна з великою площею парусності – контейнеровози, накатні судна та деякі інші.

Під час виконання буксиром ескортних операцій змінюються не тільки погодні умови в районі обслуговування, а також і водотоннажність суден, які ескортуються. Основна операція функціонування складається з ескортування судна на підходах до морського порту, супроводження по підхідному каналу. Багатоцільові ескортні буксири можуть бути задіяні при виконанні допоміжних операцій – швартування/відшвартування, рятівних, зняття суден з мілини, буксирування, гасіння пожеж та інших.

В основу визначення характеристик ескортування судна покладено вищевказаний розроблений в НУК метод визначення сил, які діють на буксир в режимі ескортної операції [19], [20].

Схеми діючих на буксир сил в режимах стаціонарних ескортних операцій обумовлені вимогами Bureau Veritas (BV) [39], Регістру судноплавства України [40] та Російського морського реєстру судноплавства [41]. В цих схемах використовуються системи координат, зазвичай прийняті в теорії керованості суден [49]. При цьому початок координат системи, жорстко пов'язаної з буксиром, розташовується в площині ватерлінії на перетині діаметральної площини (ДП) та площини мідельшпангоуту (ПМШ).

Визначення потрібних діючих на буксир сил і моментів виконується у відповідності з вимогами класифікаційного товариства [40]. В Україні ці сили та моменти визначаються за допомогою розробленого в НУК методу

визначення ходовості. При цьому характеристики ходовості стаціонарного руху ескортного буксира за судном, що ескортується, визначаються на основі рішення системи рівнянь [18–20]:

$$\begin{aligned} R_{\sigma} \cos(\beta + \alpha) + X_c(\beta) + X_{\text{зрк}}(\beta - \delta) &= 0; \\ -R_{\sigma} \cos(\beta + \alpha) + Y_c(\beta) + Y_{\text{зрк}}(\delta - \beta) &= 0; \\ -R_{\sigma} \sin(\beta + \alpha) x_{\sigma} + M_c(\beta) + Y_{\text{зрк}}(\beta - \delta) x_{\text{зрк}} &= 0. \end{aligned}$$

Невідомі в цих рівняннях є натяг буксирного канату R_{σ} , кут дрейфу буксира β , та кут перекидання гвинто-рульових колонок δ .

Особливості рішення системи рівнянь наведено у розділі 2.

1.3.4 Показники ефективності і надійності буксирів

На відміну від транспортного судна, у якого основною споживчою властивістю є провозоспроможність, ескортний буксир має властивості, які визначають його здатність виконання задач ескортного супроводу великотоннажних суден з небезпечними вантажами при їх русі з малими швидкостями в складних метеорологічних умовах. До цих задач входить своєчасний підхід буксира до ескортованого судна, ескортування його по підхідному каналу, супроводження або виконання маневрових операцій самостійно або разом з іншими буксирами в акваторії порту, проведення операцій швартування/відшвартування. Цей комплекс операцій виконується в прибережних водах конкретного порту при визначених варіаціях погодних умов та множення великотоннажних суден. Призначення ескортного буксира носить як службовий, так і комерційний характер [8], [9].

Ступінь відповідності результатів виконання цих операцій визначає їх ефективність. Оскільки результати виконання операцій залежать від характеристик буксира, то сукупна ефективність операцій визначає і ефективність буксира. Кількісні міри відповідності результатів операцій поставленим цілям визначаються їх показниками ефективності та надійності.

При оцінці діяльності буксира за службовим призначенням характеристикою надійності діяльності ескортного буксира є імовірність виконання ескортних та інших операцій в районі обслуговування. Показником ефективності є кількість коштів, витрачених на створення і експлуатацію ескортного буксира в цьому районі на протязі його життєвого періоду. Але найбільш загальним показником ефективності ескортного буксира є відношення кількості вкладених коштів до імовірності виконання буксиром своїх функціональних операцій [34], [21–23]

$$F(U, X) = \frac{M[C(U, X)]}{P(U, X)}.$$

Чим менше буде значення цього відношення, тим менше буде вартість виконання ескортних операцій і тим вище буде рівень ефективності вкладених коштів. Цим показником визначається так званий мінімальний рівень технічної досконалості ескортного буксира. Подальше підвищення рівня технічної досконалості можливо лише за рахунок підвищення вкладених коштів.

При комерційному використанні ескортного буксира основним показником його ефективності є прибуток $P = I - R$, який може бути отриманий від доходів I і витрат R при експлуатації буксира на певному проміжку часу.

При дослідницькому проектуванні судна розглядаються витрати різного роду ресурсів, пов'язані зі створенням і експлуатацією судна. Кількісно ці витрати характеризуються ресурсними показниками, які разом з іншими показниками ефективності використовуються для побудови критеріїв оптимізації головних елементів проектного судна. До ресурсних показників відносять вартість проектування, побудови, експлуатації, реновації та утилізації судна.

На даний час питання визначення таких показників досліджені ще недостатньо. Найбільш часто ресурсні показники розглядаються як детерміновані величини. Проте, як і багато інших показників ефективності, ресурсні показники є випадковими величинами. Випадковість ресурсних

показників, як це було зазначено, в основному пов'язана з нестабільністю цін на паливо, імовірнісним характером функціональних операцій судна, недосконалістю розрахункових методів, застосовуваних при проектуванні і т.д. Найбільш значимий вид ресурсних показників буксирів – економічний. Узагальненим економічним показником ескортного буксира є вартість створення, експлуатації, реновації та утилізації судна.

Вартість створення ескортного буксира включає в себе вартість проектно-конструкторських робіт і вартість побудови судна. В дисертаційній роботі вартість створення ескортного буксира вперше оцінюється на основі запропонованого В. О. Некрасовим методу використання співвідношень оцінки вартості CER (Cost Estimation Relationships), в якому на основі отриманої системи розбиття маси буксира на складові SWBS використовуються регресійні залежності CER вартості сучасних матеріалів і вартості праці при побудові суден на Європейських верфях [35], [36].

Будь які кошти, що витрачаються на проектування буксира, його побудову і експлуатацію, внаслідок варіацій поточних цін, є випадковими величинами. Найбільш повними характеристиками цих величин є відповідні закони розподілу. До їх імовірнісних характеристик відносять статистичні моменти, зокрема – математичне сподівання (середнє значення). У вартість експлуатації ескортного буксира включають всі витрати на його утримання – поточні експлуатаційні витрати, витрати на поточні і капітальні ремонти. Утилізація судна також вимагає витрат ресурсів. На даний час такі витрати можна визначати і прогнозувати за допомогою даних по експлуатації буксирів.

У зв'язку з викладеним в якості загального ресурсного показника ефективності ескортного буксира вводиться математичне сподівання вартості витрат на здійснення його життєвого циклу, або інша ймовірнісна характеристика затрат на проектування, будівництво, експлуатацію, включаючи відновлення і утилізацію [21–23]. Спосіб визначення економічних показників ескортних буксирів більш детально обговорюється в розділі 4.

Експлуатаційною надійністю ескортних буксирів є потрібне виконання

буксиром функціональних операцій, пов'язаних з реалізацією таких морехідних якостей, як остійність, керованість, морехідність, конструктивна міцність, що забезпечують роботу судна за призначення, його систем, обладнання, механізмів. Нормативні значення показників цих якостей регламентуються класифікаційними товариствами та стандартами у вигляді відповідних вимог. Це нормативні вимоги нижньої границі відносної поперечної метацентричної висоти, критерію остійності при ривку буксирного тросу, обмеження параметрів діаграми статичної остійності ДСО, обмеження, викликані недоліками керованості супроводжуваного судна, плавності процесів хитаючи на хвилюванні.

1.3.5 Методи розв'язку задач оптимізації головних елементів буксирів

Розглядаючи особливості стохастичної моделі оптимізації головних елементів ескортних буксирів, можна побачити, що недостатньо визначеними або невизначеними є:

- інформація про закони розподілу суден, які приходять до порту;
- дані експлуатаційного характеру ескортних буксирів (тривалість та інтенсивність робіт, час простоїв, тривалість і вартість ремонту та інші.);
- вартість побудови ескортного буксира – відповідність фактичної вартості і розрахункової.

З цього можна зробити висновок про те, що значення цільових функцій (функцій надійності та ефективності) оптимізаційної задачі суден є випадковими величинами. Розглянемо деякі практичні методи розв'язання такого типу задач.

В постановці, де цільова функція є випадковою величиною, оптимізаційна задача не може бути розв'язана аналітично. Потрібно використовувати або метод безпосереднього визначення розподілів, або апарат теорії ігор, або імітаційне моделювання [51–53]. При цьому застосування того чи іншого методу для розв'язання задачі в стохастичній постановці обумовлено її специфікою.

Перший з методів – метод отримання розподілів, який передбачає відновлення необхідного розподілу по оцінках перших чотирьох моментів цього розподілу. При цьому, для розрахунку моментів або їх оцінок не обов'язково визначати сам розподіл цільової функції. Для цього можна використати дельта-метод або метод розподілу статистичної помилки [54–56].

Звертаючись до системного підходу, припустимо, що співвідношення між необхідною характеристикою z системи і випадковими величинами $x_1, x_2, \dots, x_n$, які представляють її окремі компоненти, задано функцією $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, а через $E(x_i)$ – математичне сподівання та $\mu_k(x_i)$ – k -й центральний момент випадкової величини i -го компонента системи.

Розглянутий метод визначення характеристик величини z полягає в розкладанні функції $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в багатомірний ряд Тейлора до членів другого порядку включно відносно $[E(x_1), E(x_2), \dots, E(x_n)]$, тобто відносно точки, в якій кожна випадкова величина приймає значення, рівне його математичному сподіванню. В цьому випадку характеристика системи представлена виразом

$$z = f[E(x_1), E(x_2), \dots, E(x_n)] + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} [x_i - E(x_i)] + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} [x_i - E(x_i)]^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} [x_i - E(x_i)][x_j - E(x_j)],$$

в якому перший член розкладення і всі похідні визначаються при значеннях змінних, рівних математичним сподіванням величин x_k ($k = 1, 2, \dots, n$).

Якщо випадковою величиною z є цільова функція завдання оптимізації головних елементів ескортного буксира, то для відновлення розподілу ймовірностей такої цільової функції, також як і відновлення розподілів ймовірностей випадкових величин $x_1, x_2, \dots, x_n$ можливо застосування трьох способів:

- використання сімейства кривих Пірсона;
- представлення розшукуваної щільності розподілу у вигляді ряду по похідних від нормального закону;

– вибір такого перетворення випадкової величини, розподіл якої можна описати відомим законом, наприклад – перетворенням Джонсона.

Оскільки розподіл Пірсона має різні форми, він дозволяє отримати точну апроксимацію розподілу імовірностей необхідної випадкової величини. Сімейство кривих Пірсона (криві типу I – VII) дозволяє описати всі відомі типи законів розподілу [49]. Щільність імовірності розподілу Пірсона є рішенням диференційного рівняння

$$\frac{dy}{y} = \frac{x + b}{c_0 + c_1 x + c_2 x^2} dx,$$

де $y = f(x)$; b, c_0, c_1, c_2 – параметр розподілу.

Криві Пірсона повністю визначаються за допомогою перших чотирьох моментів, в залежності від їх значень вибираються ті або інші криві.

Вибір здійснюється за допомогою критерію

$$\chi = \frac{r_3^2 (r_4 + 3)^2}{4(4r_4 - 3r_3^2)(2r_4 - 3r_3^2 - 6)}$$

та основних моментів $r_3 = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$, $r_4 = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$.

Так:

- тип I має місце при $\chi < 0$;
- тип II – при $\chi = 0$; $r_3 = 0$; $r_4 < 0$;
- тип III – при $\chi = \pm \infty$;
- тип IV – при $0 < \chi < 1$;
- тип V – при $\chi = 0$; $r_3 = 0$; $r_4 < 0$;
- тип VI – при $1 < \chi < \infty$;
- тип VII – при: $\chi = 0$; $r_3 = 0$; $r_4 > 3$.

Вирази для щільностей імовірностей різних розподілів можна знайти в роботах [54–57].

Серед розкладень щільності імовірності в ряди по похідним від нормального закону найчастіше зустрічаються ряди Грама–Шарльє типу А. Обмежуючись розглядом членів ряду Грама–Шарльє типу А, які залежать

тільки від перших чотирьох моментів, можна визначити щільність імовірності цільової функції ескортного буксира і випадкових величин $x_1, x_2, \dots, x_n$. В цьому випадку щільність розподілу імовірностей має вид [47]

$$f_A(x) = \alpha(x) - \frac{r_3}{6} \alpha^3(x) + \frac{r_4 - 3}{24} \alpha^4(x),$$

де $\alpha(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$ – щільність нормованого нормального розподілу випадкової величини x ; $\alpha^3(x)$, $\alpha^4(x)$ – похідні цієї щільності, рівні $\alpha^3(x) = (x^3 - 3x)\alpha(x)$; $\alpha^4(x) = (x^4 - 6x^2 + 3)\alpha(x)$.

Для перетворення однієї випадкової величини на другу краще підходить перетворення Джонсона [48]. В загальному випадку це перетворення має вид

$$\xi = \gamma + \eta \tau\left(\frac{x - \mu}{\lambda}\right),$$

де μ , γ , λ , η – параметри розподілу; τ – довільна функція; ξ – нормована випадкова величина, розподілена за нормальним законом. Джонсоном запропоновано три типи системи функцій τ [48, 53]:

– система S_L , або логарифмічно нормальна:

$$\tau(x, \mu, \lambda) = \ln\left(\frac{x - \mu}{\lambda}\right), \quad x \geq \mu,$$

– система S_B :

$$\tau(x, \mu, \lambda) = \ln\left(\frac{x - \mu}{\lambda + \mu - x}\right), \quad \mu \leq x \leq \mu + \lambda,$$

– система S_U :

$$\tau(x, \mu, \lambda) = \operatorname{arsh}\left(\frac{x - \mu}{\lambda}\right), \quad -\infty < x < +\infty.$$

Вирази для щільностей розподілу Джонсона можна знайти в роботі [54]. Переваги розподілу Джонсона в тому, що розподіл випадкової величини можна відновити за допомогою квантилей, децилей і процентилей, які дуже добре описують випадкові величини. Недоліки цього методу полягають в необхідності достатньо великих затратах машинного часу.

Розгляд випадкової величини в якості цільової функції оптимізаційної задачі визначення головних розмірів судна значно розширює можливості опису та представлення розглянутого явища. У зв'язку з цим, при виборі оптимізованої змінної не обмежуються набором традиційних характеристик випадкової величини, додатково вводять так звані функції переваг.

До числа функцій-переваг відносять:

- мінімум (максимум) імовірності перевищення деякого контрольного рівня показника економічної ефективності;
- максимум (мінімум) імовірності отримання показника економічної ефективності із заданим рівнем забезпеченості;
- мінімум суми (максимум різниці) математичного сподівання і середньоквадратичного відхилення показника економічної ефективності, і т.д.

Після представлення всіх випадкових величин, які входять до оптимізаційної задачі, їх імовірнісними характеристиками, сама задача перетворюється в детерміновану і розв'язується звичайними методами нелінійного програмування.

Для того, щоб здійснити таке представлення, необхідно мати наступну сукупність методів:

- метод визначення статистичних моментів (начальних, центральних $\mu_k(X_i)$, кореляційних $R_{ij}^{k,l}$ і т.д.) початкових випадкових величин, що входять в оптимізаційну задачу, на основі обробки вибірових даних по цим випадковим величинам;
- метод функціональних перетворень випадкових величин, які дають можливість по моментах розподілу початкових випадкових величин визначити моменти розподілу цільових функцій;
- метод встановлення щільностей розподілу функцій випадкових величин по перших чотирьох моментах;

– метод побудови функцій-переваг для вибору оптимального варіанту проектного рішення на основі розглядання закону розподілу критерію ефективності судна.

В практиці суднобудування спосіб, заснований на використанні вище розглянутих методів, не знайшов широкого застосування, так як він потребує для всіх даних, які мають стохастичний характер побудови імовірнісних характеристик. Такі дані можна отримати лише на статистичній обробці великої кількості даних.

Другий спосіб розв'язання задачі оптимізації в стохастичній постановці є застосування апарата теорії ігор. Це теорія прийняття оптимальних рішень в умовах конфлікту. Під конфліктом розуміється явище, в якому задіяні різні сторони, наділені різними інтересами і можливістю вибирати доступні для них дії у відповідності з цим інтересами. Невизначеність при прийнятті рішень (при недостатніх даних по майбутній експлуатації) можна розглядати як конфлікт приймаючого рішення з природою. Теорія ігор розглядається як теорія прийняття оптимальних рішень в умовах невизначеності.

Загальна схема рішення задач проектування суден методами теорії ігор передбачає:

- відбір кінцевої кількості варіантів початкових даних або стану експлуатації;
- знаходження оптимальних характеристик судна (варіантів розвитку системи) для будь якого стану експлуатації шляхом вирішення детермінованої оптимізаційної задачі;
- складання платіжної матриці, елементи якої показують економічний ризик, пов'язаний з проектом, котрий відповідає оптимальному варіанту судна для даного стану експлуатації;
- обробка платіжної матриці за допомогою критеріїв Вальда, Севіджа та інших критеріїв, виявлення раціональних, з позиції цих критеріїв, варіантів або груп варіантів проекту судна.

Недоліки даного способу:

- припущення про можливість реалізації тільки явно розглянутих станів експлуатації;
- компромісні рішення вибираються із заданої множини допустимих планів;
- спосіб не знімає проблему невизначеності і прийняття рішень, не вказує за якими критеріями (Вальда, Севіджа) необхідно призводити вибір оптимального варіанту.

Третім способом рішення оптимізаційної задачі в стохастичній постановці є методи імітаційного моделювання. Ці методи дуже гнучкі та потужні в застосуванні. Вони крок за кроком відтворюють процес функціонування системи. Сама система може включати значну кількість стохастичних змінних. Переваги цих методів є те, що [60]:

- більшість складних реальних систем з стохастичним характером не можуть бути точно описані за допомогою математичних моделей, представлених в аналітичному вигляді;
- моделювання дозволяє оцінити експлуатаційні показники існуючої системи при всіх проектних умовах експлуатації;
- шляхом моделювання можна порівнювати пропоновані варіанти проекту системи з тим, щоб визначити, які з них більше відповідають висунутим вимогам;
- моделювання дозволяє вивчити за короткий термін функціонування системи на тривалому інтервалі часу.

Метод імітаційного моделювання дає можливість використовувати в практиці проектування активний експеримент з математичною моделлю судна.

За характером відображення процесу експлуатації судна імітація на ЕОМ схожа на натурний експеримент, але виконується за короткий термін та з мінімальними затратами. В порівнянні з детермінованою, імітаційна модель може більш адекватно відображати процес функціонування судна,

враховувати випадковий характер явищ, які супроводжують його побудову і експлуатацію.

До недоліків слід віднести те, що при розробці моделей виникають великі труднощі в їх побудові, що будь який результат, отриманий на імітаційному моделюванні, повинен проходити попереднє тестування для визначення необхідної точності.

Але не зважаючи на ці недоліки, імітаційне моделювання є одним з найбільш ефективних дослідницьких засобів аналізу і синтезу складних стохастичних систем.

Оскільки метод імітаційного моделювання був застосований для визначення характеристик ескортних буксирів, зупинимось на більш докладному аналізі цього методу.

Для побудови і реалізації моделей функціонування систем на етапах їх дослідження і проектування, широко використовуються методи імітаційного моделювання [59–64].

Попередником сучасного методу імітаційного моделювання є метод Монте–Карло [65–66]. Цей метод базується на використанні можливих значень деякої випадкової величини із заданим розподілом імовірності і являє собою спосіб отримання за допомогою ЕОМ статистичних даних про процеси, які проходять в моделюючій системі. Для отримання оцінки характеристик цієї системи S з урахуванням впливу зовнішнього середовища E , статистичні дані на вході в систему і на її виході обробляються і класифікуються з використанням методів математичної статистики.

Для процесу функціонування досліджуваної системи S суть імітаційного моделювання зводиться до побудови деякого моделюючого алгоритму, який імітує поведінку і взаємодію з урахуванням випадкових вхідних впливів і впливів зовнішньої середовища E .

Існують дві області застосування методів імітаційного моделювання.:

- для вивчення стохастичних систем;
- для рішення детермінованих задач.

При цьому основною ідеєю, яка використовується для рішення детермінованих задач, є заміна детермінованої задачі еквівалентною схемою деякої стохастичної системи, вихідні характеристики якої співпадають з результатом рішення детермінованої задачі. При такій заміні похибка результату рішення задачі зменшується з підвищенням кількості випробувань N .

При імітаційному моделюванні систем, одним з питань є врахування стохастичних впливів. Кількість випадкових чисел, які використовуються для отримання статистично стійкої оцінки характеристики процесу функціонування системи S при реалізації моделюючого алгоритму на ЕОМ, коливається в достатньо широких межах в залежності від класу об'єкту моделювання, виду оцінюваних характеристик, необхідної точності і достовірності результатів моделювання. Крім того, результати моделювання суттєво залежать від якості початкових послідовностей випадкових чисел.

При рішенні поставленої задачі за допомогою імітаційного моделювання типовою задачею для ЕОМ є отримання послідовності вибірових значень випадкової величини із заданим розподілом. Такий процес прийнято називати моделюванням випадкової величини. Випадкові величини зазвичай моделюються за допомогою перетворення одного або кількох незалежних значень випадкової величини a , рівномірно розподіленої в інтервалі $(0, 1)$. Спочатку базовим датчиком задається випадкова величина $\alpha \in (0, 1)$, рівномірно розподілена в інтервалі $(0, 1)$, потім виконується її відображення типу $\omega = \varphi(x)$, $x \in (0, 1)$ і отримується нова випадкова величина ξ з розподілом, визначеним завданням. В загальному випадку вид відображення $\varphi(x)$ може бути достатньо складним. Тому далі іде отримання характеристик, які залежать від суті перетворення.

При параметричних оцінках визначається деяка функція $\xi(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$. При непараметричному завданні функціональної залежності зазвичай обчислюється щільність імовірності або функція розподілу випадкової величини. Частіше за все знаходять оцінку її математичного сподівання.

Похибка оцінки визначається дисперсією за числом експериментів N .

В результаті можна виділити наступні етапи технологічного процесу імітаційного моделювання:

- підготовка вхідних даних;
- генерування рівномірно розподілених випадкових величин;
- перетворення їх для отримання заданих законів розподілу в сукупності вхідних випадкових величин;
- виконання додаткових перетворень в відповідності з проблемною областю;
- статистична обробка результатів.

В цілому імітація складної системи включає наступні функціональні етапи:

- імітація вхідних процесів;
- імітація правил переробки вхідної інформації досліджуваної системи;
- накопичення інформації в результаті моделювання;
- керування системою.

На першому етапі знаходять найбільш відповідні методи і алгоритми для описання аналітичних функцій розподілу і проводять обчислення для визначення початкових даних. На другому і третьому етапах виконуються генерування випадкових чисел з рівномірним розподілом ξ , і зовнішніх випадкових процесів ζ . Четвертий етап імітує роботу досліджуваної системи. Результати роботи системи накопичуються для наступної статистичної обробки. На останньому, п'ятому етапі, здійснюється статистична обробка отриманих результатів.

Задачі імітаційного моделювання складаються з того, щоб за допомогою ЕОМ відтворювати поведінку систем за допомогою їх моделей:

- за допомогою спеціальних методів виробляти програми реалізації випадкових чисел;
- за допомогою цих чисел отримати реалізацію випадкових величин або випадкових процесів з більш складними законами розподілу;

– за допомогою отриманих реалізацій обчислювати значення величин, які характеризують модель і виконувати обробку результатів експериментів.

Висновки з розділу 1

1. В розділі розглянуто сучасний стан буксирних флотів портів України, який показав на значний вік більшості буксирів, що знаходяться в експлуатації. Буксири з великою потужністю та маневреністю складають тільки 10–15% від загальної їх кількості. Це обумовлює необхідність наукового втручання в розв’язок задач оновлення цього флоту на основі так званого оптимізаційного підходу до проблем його модернізації.
2. Шляхом обробки створеної бази даних 50 буксирів, що побудовані за останні 20 років на провідних суднобудівних підприємствах світу і України включно, отримано регресійні залежності головних розмірів і їх співвідношень від потужності головного двигуна (ГД), значення тяги і керуючої сили, що виникають при ескортних операціях.
3. На основі виконаного аналізу основних задач функціонування ескортних буксирів і способів визначення показників їх ефективності, а також аналізу методів формулювання і розв’язку задач оптимізації основних характеристик, які враховують стохастичний характер побудови та експлуатації буксирів, можна зробити такі висновки:
 - на даний час існують три підходи до пошуку оптимальних характеристик ескортних буксирів: перший передбачає зведення стохастичної задачі до детермінованої за допомогою спеціальних прийомів і вирішення її методами нелінійного програмування; другий – використовує методи теорії ігор і третій – методи імітаційного моделювання;
 - кожен з підходів має свої недоліки і переваги, при цьому відсутні загальні рекомендації щодо вибору того чи іншого підходу для вирішення задачі оптимізації головних елементів ескортних буксирів;
 - для формулювання і рішення задачі проектування ескортного буксира перспективним напрямом є використання моделей функціонування судна і алгоритмів перетворення випадкових подій та функцій, які можуть бути

розроблені на основі комбінованого використання методів теорії марківських процесів і імітаційного моделювання;

– обраним напрямком наукових досліджень є застосування цих методів, завдяки яким оптимізаційна задача проектування ескортного буксира зводиться до визначення відношень для його імовірнісних характеристик і вирішується методами нелінійного програмування.

РОЗДІЛ 2

ЗАДАЧІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ В РАЙОНАХ ОБСЛУГОВУВАННЯ

2.1 Задачі функціонування буксирного флоту порту

Характеристики флоту сучасних буксирів, які обслуговують комплекс причалів морського порту, їх необхідна кількість і потужність отримані за допомогою створення моделі функціонування буксирного флоту порту та розв'язку задач функціонування цього флоту [10–16].

В основу реалізації найбільш ефективної моделі функціонування морського порту покладені методи теорії масового обслуговування [67]. При цьому підхідний канал, причали і буксири розглядаються як обслуговуючі пристрої, які можуть бути в двох станах: вільний або зайнятий. Прибуття суден у порт представляється у вигляді заявок, які розподіляються по причалах.

В цій моделі сукупність причалів порту стає багатоканальною системою масового обслуговування, яка знаходиться в змінних (випадкових) погодних умовах експлуатації при випадковому потоці заявок. Для реалізації потоку заявок кожному причалу призначається свій суднопотік – кількість суден, що причалює за одиницю часу (один рік), диференційованих за типом суден і їх дедвейтом. Випадкова величина дедвейту визначається законом розподілу і його параметрами – середнім значенням випадкової величини, дисперсією і т.д. Характеристики закону розподілу суднопотоку визначаються на основі обробки статистичних даних по кількості та дедвейту суден, що заходять в порт за рік.

При реалізації моделі функціонування портового флоту буксирів для кожного причалу генерується час появи чергового судна – заявки на обслуговування. Для отриманої заявки в залежності від типу судна, його дедвейту і погодних умов на час проведення ескортної операції визначається необхідне значення керуючої сили, підбирається потрібний ескортний буксир,

визначається сумарний необхідний упор портових буксирів і підбирається їх кількість з існуючого складу буксирного флоту порту з урахуванням необхідного значення тяги при швартуванні судна до причалу, а також зайнятості буксирів на операціях з іншими суднами. Перевіряється можливість входу судна в порт. Для цього повинні виконуватися наступні умови: причал повинен бути вільний, канал – вільний, є достатня кількість буксирів необхідної тяги [13].

При виконанні зазначених умов моделюється проведення наступних етапів буксирувальної операції: ескортування або супроводу судна по підхідному каналу, транспортування його до причалу і причалювання/швартування. При цьому для обраного буксира змінюється статус з вільного на зайнятий і визначаються проміжки часу етапів виконання буксирувальних операцій. Операція ескортування судна до входу в порт зазвичай здійснюється одним буксиром, при супроводі по підхідному каналу – двома, а при транспортуванні до причалу и швартуванні, в залежності від водотоннажності судна та конфігурації акваторії порту, – двома, трьома або чотирма. Випадкові величини проміжків часу виконання етапів буксирувальних операцій визначаються відповідними законами розподілу часу ескортування або супроводу, транспортування до причалу і причалювання (швартування), а також параметрами цих законів розподілу, такими як середнє значення проміжку часу, його дисперсія і т.д.

Час стоянки судна при виконанні вантажно-розвантажувальних робіт біля причалу моделюється в залежності від продуктивності устаткування причалу. Випадкова величина продуктивності кожного причалу визначається відповідним законом розподілу продуктивності і його параметрами.

Після завершення операції з завантаження-розвантаження перевіряється можливість відходу судна від причалу (наявність вільних буксирів, незайнятості підхідного каналу). При невиконанні цих умов судно залишається біля причалу і чекає своєї черги на обслуговування. Якщо умови, необхідні для виведення судна з порту, виконуються, то з числа незайнятих

буксирів вибираються необхідні буксири (їх статус стає зайнятим), визначаються проміжки часу операцій по відчалування і доставки судна до виходу з порту (відшвартування) і проходження каналу (ескортування або супроводу), канал переводиться в статус зайнятий, моделюється виконання буксирувальних операцій[13].

У разі невиконання умов входу судна в порт, заявка ставиться в чергу, а судно – на якірну стоянку. Після виконання буксирувальних операцій по ескортуванню та доставці судна до причалу, буксири, зайняті ескортуванням, супроводом по підхідному каналу, транспортуванням та швартуванням, звільняються. Також звільняються ті буксири, які закінчують операції ескортування при виході судна з порту.

Випадкові величини проміжків часу виконання етапів буксирувальних операцій також визначаються відповідними законами розподілу часу відчалування і транспортування до виходу з порту, проходу підхідного каналу, а також параметрами цих законів розподілу.

2.2 Задачі функціонування ескортного буксира

Основними операціями функціонування ескортних буксирів в моделі функціонування флоту портових буксирів є операції супроводження спеціалізованих суден, які перевозять небезпечні вантажі, при їх русі з відносно малими швидкостями в складних погодних умовах прибережних вод або в умовах обмеженого фарватеру, які ведуть до зменшеній керованості суден [39–41]. До таких суден відносяться танкери, хімовози, газовози, а також судна з великою площею парусності – контейнеровози, накатні судна та деякі інші. Ескортні буксири також можуть супроводжати ці судна по підхідному каналу, акваторії порту, брати участь у швартовних операціях, протипожежних операціях, операціях по стягуванню суден з мілини та інших.

Аналізуючи розподіл суден, які заходять в порти України за дедвейтом, категоріями вантажів та іншими показниками, можна зробити висновок, що значну частину часу ескортні буксири в ескортних операціях не задіяні. Для підвищення ефективності роботи ескортного буксира в порту його залучають

до інших операцій, притаманних портовим буксирам: супроводження суден, операції з швартування/відшвартування, буксирування, зняття з мілини, гасіння пожеж, як самостійно, так і разом з іншими портовими буксирами. Найчастіше з цих операцій буксир виконує буксирування, супроводження, швартування/відшвартування, чергування біля газовозів під час їх стоянки у причалу.

Тому усі операції, які можуть здійснювати ескортні і багатоцільові ескортні буксири та відповідні задачі їх функціонування, можна поділити на основну та допоміжні.

2.2.1 Основна задача функціонування ескортного буксира. Основною функціональною операцією ескортного буксира є ескортування небезпечного судна на підходах до морського порту. Тому відповідною задачею функціонування ескортного буксира є задача визначення потрібних характеристик його ходовості за судном, що супроводжується, яка складається з формулювання та розв'язку систем диференціальних або трансцендентних рівнянь руху буксира за судном [22], [23]:

$$\sum_{i=1}^n F_{ji}(x_1, x_2, \dots, x_m, t) = 0, \quad (2.1)$$

де n – кількість врахованих типів діючих сил; m – кількість рівнянь системи; x_j – характеристики руху буксира.

Потрібний для цієї задачі метод визначення характеристик ходовості ескортного буксира, в розробці якого прийняв участь автор цієї роботи, наведено у розділі 3 як метод визначення характеристик відповідної морехідної якості ескортного буксира [19], [20]. Цей метод використовує розв'язок стаціонарних рівнянь руху буксира (2.1) за допомогою пошуку глобального мінімуму (нуля) в задачі безумовної оптимізації цільової функції $F(x_1, x_2, \dots, x_m)$ незалежних змінних $x_1, x_2, \dots, x_m$ наступного вигляду:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_m) = \left(\sum_{i=1}^n X_{1i} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n X_{2i} \right)^2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n X_{mi} \right)^2 \quad (2.2)$$

одним з методів нелінійного програмування – методом Пауелла. У представленому виразу для цільової функції (2.2) компоненти суми є квадратами лівих частин рівнянь (2.1).

Важливою характеристикою ескортної операції є характеристика її надійності [21], [69]. Надійність ескортної операції це ймовірність її виконання в комплексі гідрометеорологічних умов міста розташування порту. Дозвіл на вхід до порту та його функціонування звичайно обумовлюється діапазоном середніх швидкостей вітру V від 0 до $V_{\max}$. Для визначення цього діапазону використовуються довідкові дані про довготривалі режимні характеристики вітру в районі розташування порту [69].

Довготривалий закон розподілу швидкостей вітру в Південно-Західному районі географічного розташування морських портів України представлено на рис. 2.1 і на рис. 2.2 [69]. Цій розподіл швидкостей вітру апроксимується законом Вейбула з параметрами $\alpha = 2,22$ і $\beta = 9,58$. Він показує, що відповідно до обов'язкових постанов по морським портам цього регіону, наприклад – порту «Южний» [70], які обмежують умови проведення швартових операцій середньою швидкістю вітру $V_{\max} = 14$ м/с, ці операції не проводяться в середньому протягом 3,3% річного часу.

На рис. 2.3 представлений довготривалий розподіл швидкостей вітру, перетворений для задач функціонування ескортного буксира. Завдяки цьому розподілу ймовірність виконання основної – ескортної операції p_0 може бути здійснено за формулою

$$p_0 = \int_0^{V_{\max}} f(V) dV. \quad (2.2)$$

Закон розподілу інтенсивностей хвилювання на підходах до порту залежить від інтенсивності вітру. При цьому допустимий рівень інтенсивності хвилювання зазвичай також обумовлюється обов'язковими постановами порту. Зазвичай він визначається висотою значної хвилі $H_{1/3} = 1,5$ м [70].

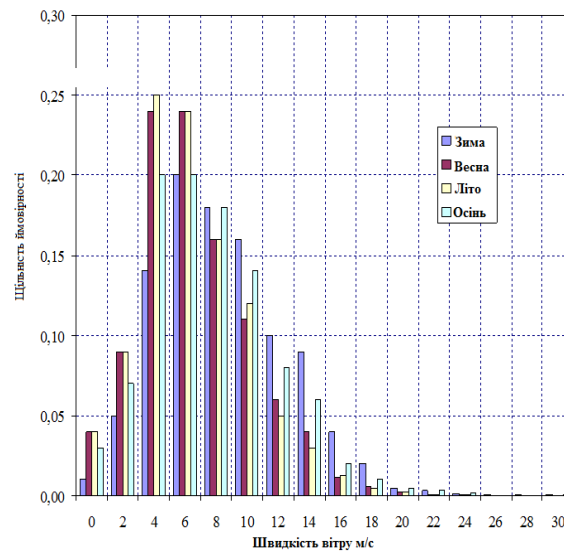


Рисунок 2.1 – Щільність ймовірності швидкостей вітру в акваторіях Південно-Західного району розташування морських портів України

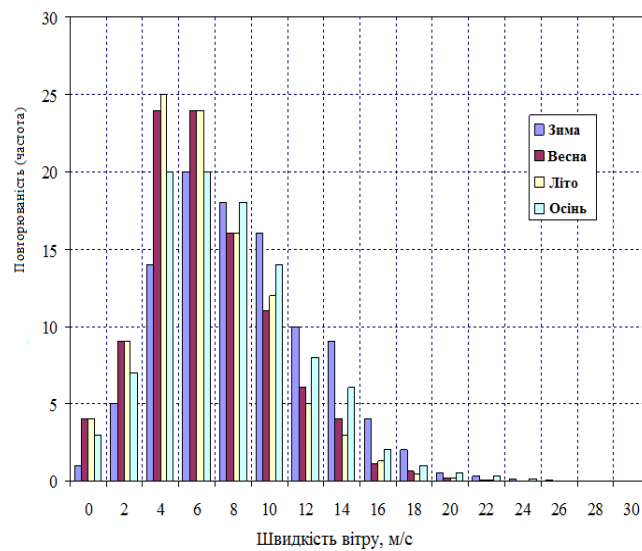


Рисунок 2.2 – Повторюваність швидкостей вітру в акваторіях Південно-Західного району розташування морських портів України

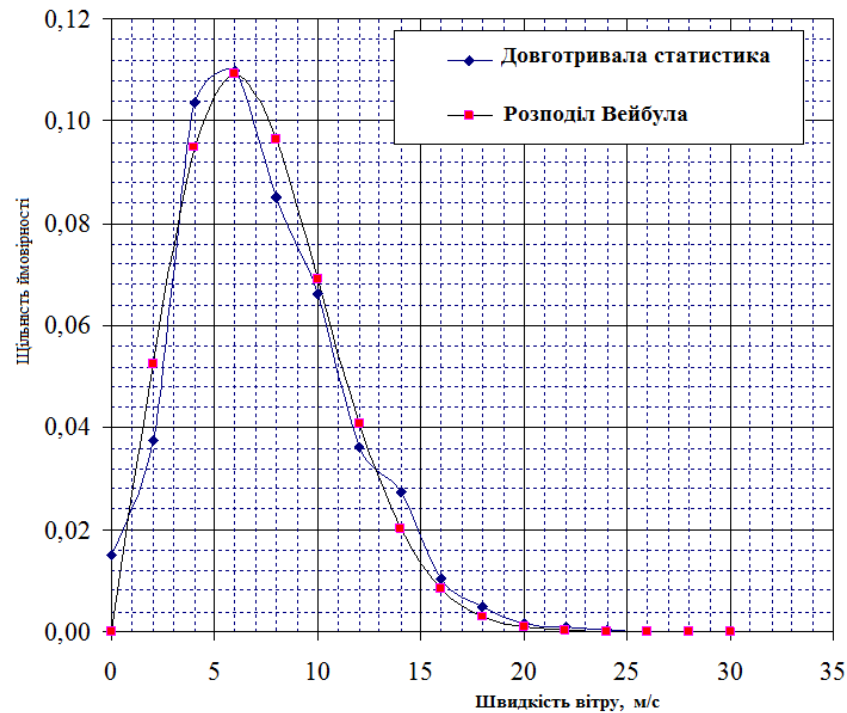


Рисунок 2.3 – Апроксимація довготривалого розподілу швидкостей вітру в акваторіях Південно-Західному району розташування морських портів України

Перетворення характеристик вітру і хвилювання в сили і моменти, що діють на ескортний буксир, може здійснюватися по алгоритмам теорії багатовимірних марковських процесів, запропонованим В.О. Некрасовим [50]. При цьому задача ескортного супроводу формується і вирішується в рамках кореляційної теорії випадкових функцій, яка оперує статистичними моментами першого і другого порядку (математичними сподіваннями і середньоквадратичними відхиленнями). При цьому екстремальні значення діючих сил і моментів оцінюються за правилом «трьох сигм» [50].

2.2.2 Допоміжні задачі функціонування ескортного буксира

2.2.2.1 Супроводження судна по підхідному каналу, транспортування його до причалу, швартування/відшвартування і виведення його з порту.

Допоміжною задачею функціонування ескортного буксира є задача супроводження судна по підхідному каналу, транспортування його до причалу в акваторії порту, а також участі в маневрових операціях

швартування/відшвартування і виведення судна з порту. В цій задачі ескортний буксир виконує роль звичайного портового буксира.

Маневрові операції, які виконуються портовими буксирами, в різних країнах визначаються за різними вимогами. Це стосується необхідного складу буксирного флоту порту, який залежить від кількості суден, що обслуговуються портом, та їх дедвейту, географічного положення порту, а також технічного оснащення причалів.

Підхід, прийнятий в Україні та Росії, заснований на застосуванні керуючих документів [71], [72], які визначають необхідну кількість та потужність головних двигунів буксирів в залежності від типу судна та його дедвейту.

Підхід, прийнятий в багатьох портах світу, заснований на використанні наближених залежностей та різних таблиць і графіків для оцінки потрібних характеристик буксирів. В роботі [9] наведені дані різних портів світу і запропоновані графіки вибору кількості буксирів та їх тяги в залежності від дедвейту суден (див. рис. 2.4). Деякі залежності з оцінки потрібної тяги буксирів наведені в роботах [73–76].

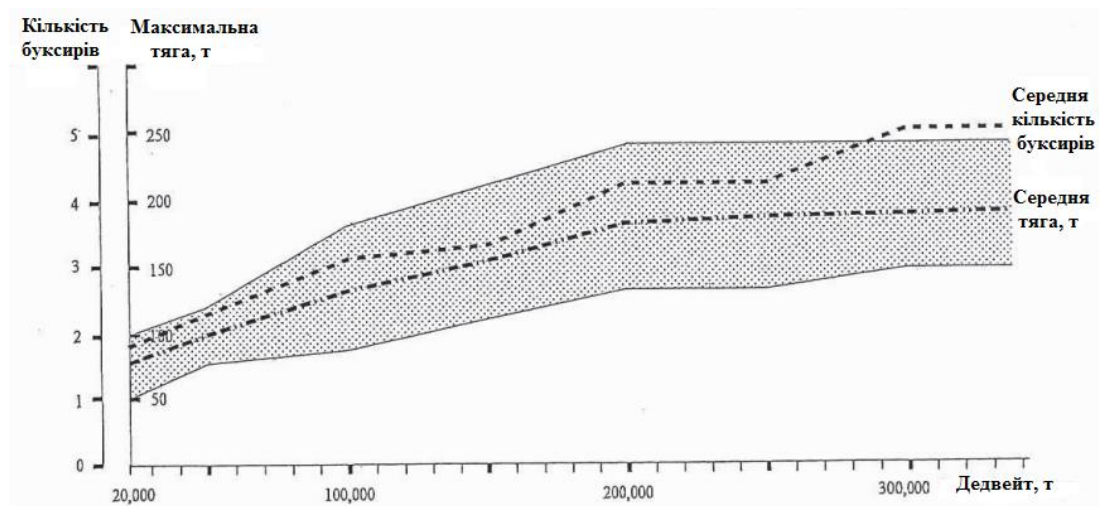


Рисунок 2.4 – Залежність необхідної тяги та кількості буксирів від дедвейту суден

Основні фактори, які впливають на сумарну величину потрібної тяги буксирів [77]:

- розмір супроводжуваного судна;
- аеродинамічні сили, діючі на його надводну частину;
- гідродинамічні сили, які діють на занурену в воду частину корпусу;
- інерційні сили, які викликані зміною швидкості під час переміщень судна в акваторії порту.

Для визначення необхідної кількості буксирів, які забезпечують необхідне значення тяги, необхідно виконання наступних умов [2]:

- потрібна загальна тяга буксирів, задіяних в маневровій операції, повинна бути не більше фактичної тяги вибраних буксирів;
- кількість буксирів, задіяних в маневровій операції, повинна бути не менше двох та не більше п'яти;
- в одній маневровій операції дозволяється використання буксирів тільки з суміжних груп (обмеження по тязі).

Таким чином, ескортний буксир може бути задіяний в маневрових операціях з великотоннажними суднами і виконувати кантування, швартування/відшвартування як самотійно, так і в складі ордеру.

При обчисленнях сил і моментів, що діють на буксир або декілька буксирів, які супроводжують судно в режимі цієї буксирної операції, враховуються не тільки хвильові гідродинамічні і вітрові аеродинамічні сили, що діють безпосереднє на кожен буксир, але й сили такої ж природи, що діють на супроводжуване судно, а також додаткові інерційні сили, що виникають при нестационарному русі судна в умовах швартування/відшвартування. При цьому сумарне додаткове силове навантаження, що передається від судна на буксири, враховується за формулою [7], [10]:

$$F = S_f (F_1 + F_2 + F_3 + F_4), \quad (2.3)$$

де S_f – коефіцієнт запасу; F_1 – зусилля від дії вітру на судно, т.; F_2 – гідродинамічна сила судна, т.; F_3 – зусилля від дії хвилювання на судно, т.; F_4 – інерційна сила судна, т.

Сила від дії вітру визначається за формулою [7], [10]:

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho_1 V_1 A_1 C_1}{g 10^3}, \quad (2.4)$$

де ρ_1 – густина повітря, кг/м^3 ; V_1 – розрахункова середня швидкість вітру, м/с ; A_1 – площа парусності судна, м^2 ; C_1 – коефіцієнт аеродинамічного опору.

Значення розрахункової середньої швидкості вітру генеруються за допомогою датчика випадкових чисел у відповідності із заданим законом розподілу. Площа парусності A_1 визначається в залежності від типу судна, дедвейту та стану завантаження: в «повному вантажу» або в «баласті» [77], [78].

Для оцінки хвильового впливу використовується формула [7], [10]:

$$F_3 = 0,112 L_{BP} H_{1/3}^2, \quad (2.5)$$

де L_{BP} – довжина судна між перпендикулярами, м ; $H_{1/3}$ – висота значної хвилі, м .

Сила опору води, що діє на занурену частину корпусу судна визначається за формулою [7], [10]:

$$F_2 = \frac{1}{2} \frac{\rho_2 V_2 A_2 C_2}{g 10^3}, \quad (2.6)$$

де ρ_2 – густина морської води, кг/м^3 ; V_2 – розрахункове значення швидкості при швартуванні, м/с^2 ; A_2 – проекція зануреної частини корпусу на діаметральну площину, м^2 ; C_2 – коефіцієнт гідродинамічного опору.

Визначення величини F_2 зазвичай виконується з урахуванням наступних значень: $\rho_2 = 1025 \text{ кг/м}^3$; $V_2 = 0,26 \text{ м/с}$; $C_2 = 0,7$.

В процесі маневрових операцій судно рухається лагом зі змінною швидкістю. Масові та гідродинамічні сили, які при цьому виникають, визначаються водотоннажністю судна та значеннями коефіцієнтів приєднаних

мас. В практиці експлуатації буксирів в портах сумарне навантаження, необхідне для завершення руху судна при причалюванні або для розгону до необхідної швидкості при відчалюванні [7], [10] використовується формула

$$F_4 = f_4 \frac{0,07V_4^2 \Delta}{S_4}, \quad (2.7)$$

де f_4 – інерційний коефіцієнт, для морських транспортних суден рівний 1,6;

V_4 – початкова або кінцева швидкість судна, значення якої $\cong 5$ вуз.;

Δ – водотоннажність судна, т; S_4 – дистанція переміщення судна, $S_4 \cong 40$ м.

Наведені формули використовують характеристики нерегулярного хвилювання і поривчастого вітру, що також задаються довготривалими режимними розподілами вітру і хвилювання на підходах до і в акваторії порту. Тому характеристика надійності цієї операції – ймовірність її виконання p_1 здійснюється за формулою [4], [5]

$$p_1 = \int_0^{V_{\max}} f(V) dV. \quad (2.8)$$

2.2.2.2 Задача зняття аварійного судна з мілини. Задачу зняття буксиром аварійного судна з мілини розглянуто в роботах [4], [5]. Судно, яке сіло на мілину, стягується із застосуванням потужних тягових зусиль та ривків буксира. Стягування буде успішним, коли тягове зусилля буксира F_T перевищить горизонтальну складову F_A сили, яка утримує судно на мілині. Подія успішного зняття судна з мілини визначається формулою

$$\Delta F = F_A(\Delta_A^*, f_A, \dots) - F_T(N_E, Z, \dots) < 0, \quad (2.9)$$

де тягове зусилля F_T є величиною, яка залежить від наступних факторів:

N_E – потужність силової установки ескортного буксира, Z – погодні умови на місці аварії та інших. Горизонтальна складова F_A залежить від Δ_A^* – нормальна сила тиску аварійного судна на ґрунт, f_A – коефіцієнт сили тертя аварійного судна об ґрунт.

Горизонтальна складова F_A визначається за формулою

$$F_A = \Delta_A^* f_A,$$

де випадкові величини Δ_A^* та f_A визначаються шляхом імітаційного моделювання у відповідності з даними про сили нормального тиску на ґрунт та даними про склад ґрунтів в районі аварії. Якщо припустити, що випадкові величини Δ_A^* та f_A підкорюються закону бета, а значення коефіцієнтів сили тертя ґрунтів знаходяться в межах від 0,2 (глина) до 0,6 (кам'яна плита), то закон розподілу цієї випадкової величини буде мати вигляд

$$f(f_A) = \frac{1}{0,6 - 0,2} \text{ при } 0,2 \leq f_A \leq 0,6;$$

$$f(f_A) = 0 \text{ при } f_A < 0,2 \text{ и } f_A > 0,6.$$

Щільність розподілу нормальної сили на ґрунт Δ_A^* має вид

$$f(\Delta_A^*) = \frac{1}{(\Delta_{A\max}^* - \Delta_{A\min}^*)^{\alpha+\beta-1} B(\alpha, \beta)} (\Delta_A^* - \Delta_{A\min}^*)^{\alpha-1} (\Delta_{A\max}^* - \Delta_A^*)^{\beta-1},$$

де $B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt$; $\Delta_{A\min}^* \leq \Delta_A^* \leq \Delta_{A\max}^*$; α, β – параметри закону,

$\alpha > 0; \beta \geq 0$.

Значення α і β визначаються за формулами [5]

$$\alpha = \frac{1 - \bar{\Delta}_A^*}{\sigma^2} \left[\bar{\Delta}_A^* (1 - \bar{\Delta}_A^*) - \sigma^2 \right];$$

$$\beta = \frac{\bar{\Delta}_A^* \alpha}{1 - \bar{\Delta}_A^*};$$

де

$$\bar{\Delta}_A^* = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_A^*}{n};$$

$$\sigma^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta_{Ai}^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta_{Ai}^* \right)^2}{n(n-1)},$$

де Δ_{Ai}^* – значення нормальної сили тиску на ґрунт, значення якої визначаються за статистичними даними в районі аварії.

За допомогою формули (2.9), в якій за функцію F_T прийнято тягу на гаку багатоцільового ескортного буксира, можна побудувати щільність імовірності зусиль $f(\Delta F)$ і ймовірність зняття аварійного судна з мілини p_2 визначити за формулою [4], [5]

$$p_2 = \int_{\Delta F_{\max}}^0 f(\Delta F) d\Delta F, \quad (2.10)$$

де $\Delta F_{\max} = F_{\max}$.

На рис. 2.5 представлений графік щільності імовірності результуючих зусиль $f(\Delta F)$, за допомогою якого визначається ймовірність зняття аварійного судна з мілини p_2 .

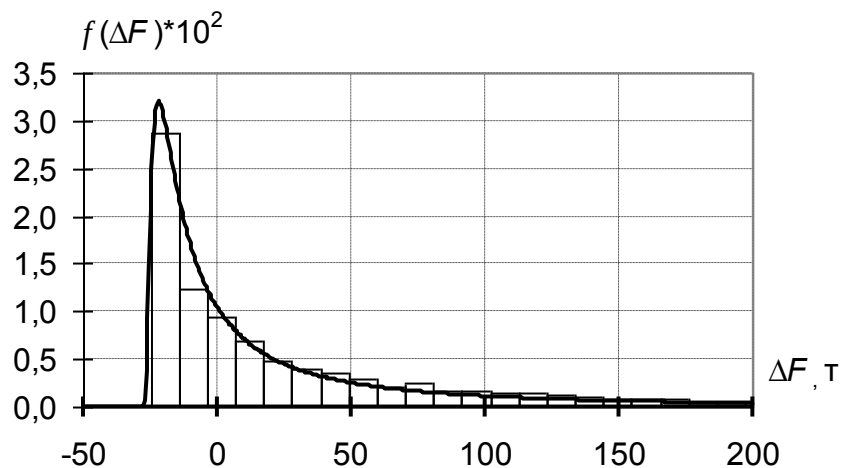


Рисунок 2.5 – Щільність імовірності величини ΔF [5]

2.2.2.3 Буксирування аварійного судна. Задача буксирування аварійного судна потребує необхідності задавання необхідної найменшої швидкості буксирування при найгірших погодних умовах. Для визначення необхідної тяги при буксировці необхідно розглянути умови рівномірного

прямолінійного руху ескортного буксира і аварійного судна. Це питання розглядалося в роботах [49] і [5].

В загальному випадку, рівняння сил і моментів, що діють на буксир при буксировці судна має вид [49]

$$\begin{aligned} P_e - X_\Gamma - X_T - X_B - T \cos \theta_1 &= 0; \\ -Y_B - Y_T - T \sin \theta_1 + Y_\Gamma &= 0; \\ M_\Gamma - M_B - M_T + T l_1 \cos \theta_1 &= 0, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де X_Γ – гідродинамічна сила, обумовлена рухом буксира з кутом дрейфу; X_B – аеродинамічна сила; X_T – гідродинамічна сила, обумовлена течією; P_e – корисна тяга ескортного буксира; T – зусилля в буксирному тросі; θ_1 – кут між буксирним тросом і ДП буксира; M_Γ – гідродинамічний момент; M_B – аеродинамічний момент; M_T – гідродинамічний момент, обумовлений течією. У випадку, коли ескортний буксир рухається разом з аварійним судном проти вітру і течії, рівняння має вид

$$P_e - X_T - X_B - T = 0.$$

В цьому випадку можливість успішної буксировки до бази визначається співвідношенням

$$\Delta P_e = (X_T + X_B + T) - P_e \leq 0. \quad (2.12)$$

Значення необхідного тягового зусилля T визначаються шляхом імітаційного моделювання в відповідності з даними або за прогнозуванням типів і розмірів аварійних суден в районі обслуговування. Визначення аеродинамічних та гідродинамічних сил здійснюється методами теорії корабля. Після цього визначається щільність імовірності $f(\Delta P_e)$ при буксировці. Імовірність p_3 успішного виконання ескортним буксиром буксирування аварійного судна до бази в заданому районі обслуговування визначається за формулою [4], [5]

$$p_3 = \int_{-\Delta P_{e \max}}^0 f(\Delta P_e) d\Delta P_e. \quad (2.13)$$

2.2.2.4 Гасіння пожеж на аварійних судах. Задачу гасіння буксиром пожеж на аварійних судах та на об'єктах порту детально розглянуто в роботах [4], [5].

2.2.2.5 Ліквідування аварійних розливів нафтопродуктів. Задачу ліквідування багатоцільовим буксиром аварійних розливів нафтопродуктів в районі розташування порту достатньо детально розглянуто в роботі [5].

Врахування в задачі функціонування ескортного буксира стохастичності потоку суден, що відвідують порт. Під час виконання ескортним буксиром буксирних операцій змінюються не тільки погодні умови в районі обслуговування, які впливають на час проведення операцій, але й водотоннажність суден, що ескортуються, яка також носить явно виражений випадковий характер.

Тому важливою задачею функціонування ескортного буксира є задача поповнення буксирного забезпечення сучасного морського порту шляхом орієнтації буксира, що замовляється, на певну сукупність суден, які заходять в морський порт. Це обумовлено тим, що всі небезпечні судна, які приходять в морський порт, обслуговуються ескортними буксирами різної потужності. Малий ескортний буксир не може супроводжувати великі судна. Разом з тим, потужні ескортні буксири економічно недоцільно використовувати при ескортування малих суден.

У зв'язку з тим, що водотоннажність або дедвейт небезпечних суден, які заходять в порт, є випадковими величинами, то і орієнтація замовленого ескортного буксира повинна здійснюватися виходячи з представлення водотоннажності або дедвейту обслуговуваної групи суден випадковою величиною з встановленим законом розподілу. На рис. 2.6 представлено річний розподіл суден по дедвейту, які були відшвартовані до всіх причалів порту «Южний» [10].

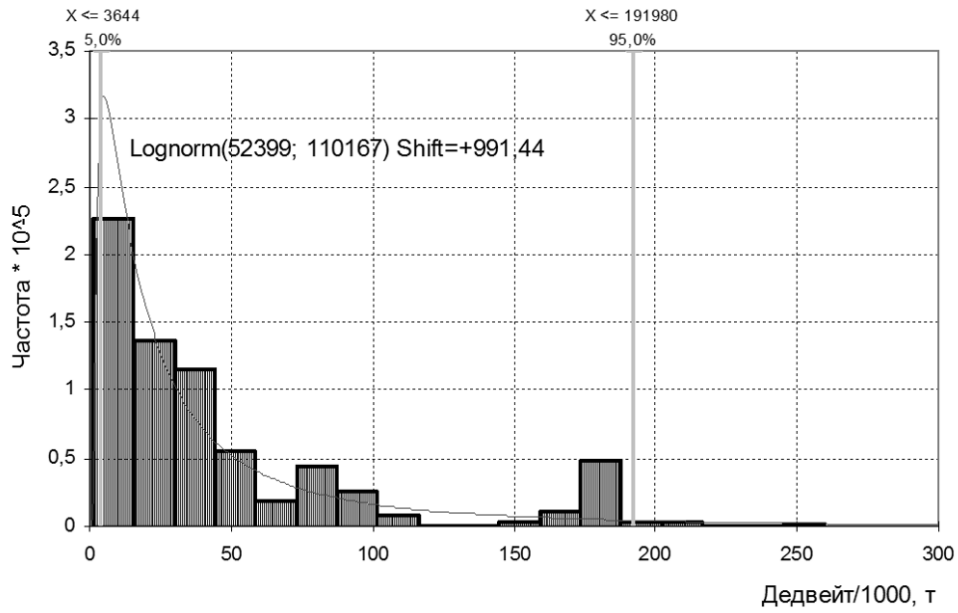


Рисунок 2.6 – Розподіл суден, відшвартованих до всіх причалів порту «Южний» за дедвейтом протягом року [10]

Задаючись відповідними розподілами дедвейту по конкретному порту, визначають необхідні значення керуючої (утриманої) сили ескортного буксира для заданого діапазону дедвейтів суден, які заходять до порту.

Висновки з розділу 2

В результаті огляду задач функціонування буксирного флоту морського порту встановлено, що оптимізаційне визначення оновленого складу флоту його буксирів, їх необхідної кількості і потужності, може бути здійснено за допомогою створення відсутнього на даний час комплексу задач функціонування багатоцільових ескортних буксирів, визначення показників надійності функціональних операцій та методів розв'язку цих задач.

Для цього сформульовано комплекс задач функціонування багатоцільового ескортного буксира, в якому основною функціональною операцією обрано ескорткування буксиром сукупності суден певних типів і певної водотоннажності, які прибувають в морський порт. До числа допоміжних функціональних операцій віднесено операцію супроводження судна по підхідному каналу, транспортування його до причалу в акваторії порту, а також участь в маневрових операціях швартування/відшвартування і виводу судна з порту, операцію гасіння пожеж на суднах, операцію зняття аварійного судна з мілини та операцію буксирування аварійного судна.

При формулюванні основної функціональної задачі вирішено проблему визначення діючих на буксир сил і на цій основі складено систему трансцендентних рівнянь руху буксира, розв'язок якої дозволяє визначити характеристики руху. В якості методу вирішення трансцендентних рівнянь руху ескортного буксира вперше обрано метод, аналогічний методу рішення оптимізаційної задачі визначення його головних розмірів. Формулювання та розв'язок допоміжних функціональних задач ескортного буксира також виконано на основі аналізу діючих сил та відповідних рівнянь руху.

В якості показника ефективності функціональних операцій ескортного буксира обрано комплексний показник економічної ефективності і надійності виконання буксиром основної та допоміжних функціональних операцій, який дозволяє визначити вартість створення і експлуатації багатоцільового ескортного буксира, а також знайти ймовірність виконання основної та допоміжних операцій.

Використання цього показника в оптимізаційній задачі вибору головних розмірів ескортного буксира враховує вимоги класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій, яке обумовлено необхідністю компенсації обмеженої керованості супроводжуваних суден при малих швидкостях їх ескортування в прибережних водах за рахунок розвиненої керуючої сили ескортного буксира.

Все це дозволяє ескортному буксиру певної потужності ефективно обслуговувати судна певних діапазонів водотоннажності.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЬ ІНЖЕНЕРНИХ І НАВІГАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ

3.1 Визначення навантаження мас і положення центру ваги

Визначення масового навантаження судна і положення центру ваги – найбільш важлива та відповідальна частина проектування. Для отримання інформації про масове навантаження необхідно на стадії технічного проекту зробити типову розбивку за розділами після того, як виконано повний набір корпусу за Правилами класифікаційного товариства. До цього часу вже потрібно мати відомості про повний склад деталей корпусу, механізмів, устаткування, силової установки і т.д. Однак на ранніх стадіях проектування масове навантаження повинно бути визначене з максимально можливою точністю. Найбільш доцільно в цьому випадку використання даних прототипів.

Для рішення рівняння мас, яке визначає водотоннажність судна, потрібно встановлення зв'язку між масами, які входять до навантаження судна, його розмірами, формою корпусу, вимогами технічного завдання. Рішення цих питань найбільш повно відображено в роботах вітчизняних вчених В. В. Ашика [30], А. В. Броннікова [31]. Серед робіт закордонних вчених найбільш відомі роботи [79–82].

Визначенню складових масового навантаження буксирів та положенню центру ваги були присвячені роботи В. М. Пашина [29], Б. В. Богданова, А. В. Слуцького [3], А. Н. Гуровича, О. А. Родіонова [83], О. І. Ракова и Н. Б. Севаст'янова [84], [85], Ле К. Х. [5], Нгуєн З. Б. [6].

В роботах [3], [5] було виконано узагальнення статистичних даних по масових характеристиках та положенню центру ваги буксирів. Розглядалися укрупненні групи вагового навантаження:

- водотоннажність судна з повними запасами (Δ);
- маса судна порожнем ($\Delta_{\text{п}}$);

- маса корпусу судна з надбудовою, фундаментами, ізоляцією, покриттям (W_k);
- маса обладнання судна, включаючи суднові пристрої (з палубними механізмами), суднові системи (W_o);
- маса корпусу з обладнанням ($W_{ko} = W_k + W_o$);
- маса енергетичної установки і електрообладнання, включаючи машинну установку, її трубопроводи, рушії, електрообладнання, автоматику, радіобладнання (W_m);
- маса суднового постачання (W_c).

Результатом обробки авторами [82], [2] статистичних даних складових масових модулів морських та портових буксирів стала можливість встановити наступні межі значень вимірників маси:

- вимірник маси корпусу

$$p_K = \frac{W_R}{LBD} = 140 \div 150, \text{ кг/м}^3;$$

- вимірник маси корпусу з обладнанням

$$p_{KO} = \frac{W_{KO}}{LBD} = 190 \div 200, \text{ кг/м}^3;$$

- вимірник маси механічного обладнання

$$p_M = \frac{W_M}{LBD} = 58 \div 97, \text{ кг/м}^3;$$

- вимірник маси суднового постачання

$$p_C = \frac{W_C}{LBD} = 4 \div 9, \text{ кг/м}^3.$$

До повної водотоннажності входить також дедвейт

$$\Delta = \Delta_{II} + W_{DW},$$

де W_{DW} – дедвейт, в який стосовно до буксирів входять наступні складові

$$W_{DW} = W_{IM} + W_{PC} + W_{BL}'' ,$$

де W_{IM} – маса палива та масла; W_{PC} – маса постачання, екіпажу, провізії, води;

W_{BL}'' – маса змінного баласту.

Центр ваги порожнем для цих суден має положення близько до міделю. Величина абсциси центру ваги LCG має значення $\pm 0,3 \div 3,0\%$ від довжини

судна L . Апліката центру ваги KG для рятувальних буксирів порожнем складає $0,8 \div 0,93$ висоти борту D та $0,73 \div 0,85$ від висоти борту D для суден з повними запасами.

Апліката центру ваги KG для морських та портових буксирів порожнем складає $0,7 \div 0,9$ висоти борту D та $0,6 \div 0,8$ висоти борту D при повній водотоннажності.

Обробка статистичних даних складових вагових модулів існуючих ескортних буксирів дозволила отримати наступні значення вимірника маси:

– вимірник маси корпусу з судновими пристроями

$$p_{KO} = \frac{W_{KO}}{LBD} = 182 \div 250, \text{ кг/м}^3;$$

– вимірник маси механічного обладнання

$$p_M = \frac{W_M}{LBD} = 40 \div 59, \text{ кг/м}^3;$$

– вимірник маси суднового постачання

$$p_C = \frac{W_C}{LBD} = 5 \div 6,7, \text{ кг/м}^3.$$

Величина абсциси центру ваги LCG цих суден має значення $\pm 0,5 \div 2,4\%$ від довжини судна L . Апліката центру ваги KG для ескортних буксирів порожнем складає $0,68 \div 0,75$ висоти борту D та $0,62 \div 0,69$ висоти борту D для суден з повними запасами.

В практиці проектування в інших країнах водотоннажність порожнем визначають за допомогою таких розділів [86]: металевий корпус W_{StR} , палубна рубка W_{StAD} , обладнання та пристрої W_O , енергетична установка W_M , запасні частини W_R . Тоді вираз для повної водотоннажності матиме такий вигляд

$$\Delta = \Delta_{II} + W_{DW} = W_{StR} + W_{StAD} + W_O + W_M + W_R + W_{DW}.$$

Дедвейт представляє суму мас змінних вантажів

$$W_{DW} = W_{PL} + W_{FO} + W_{FW} + W_{CR} + W_{SR},$$

де W_{PL} – маса корисного вантажу, т; W_{FO} – маса палива, т; W_{FW} – маса води, т; W_{CR} – маса екіпажу з багажем, т, W_{SR} – маса провізії, т.

Маса екіпажу з багажем та провізією визначається за формулами

$$W_{CR} = 0,13N_{CR}, \quad W_{SR} = 0,03N_{CR}N_{AB}, \text{ т.}$$

Маса палива W_{FO} розраховується за наступною формулою

$$W_{FO} = (1,15 \div 1,2) \frac{q_t P_b R}{V_S}, \text{ т,}$$

де R – розрахункова дальність плавання, милі; $P_b = N_e$ – потужність головних двигунів, кВт, q_t – питома витрата палива, г/кВт·год, $1,15 \div 1,2$ – коефіцієнт морського запасу, V_S – експлуатаційна швидкість, вузл.

Розбиття маси судна порожнем W_{LS} на складові, яке було запропоноване в роботах [37], [82], визначається формулою

$$W_{LS} = W_{100} + W_{200} + W_{300} + W_{400} + W_{500} + W_{600} + W_{700}$$

Найбільш вагомим розділом навантаження мас для буксирів є корпус. Значення складової навантаження мас корпусу (W_{100}) в роботі [37] було запропоновано в наступному вигляді

$$W_{100} = KE^{1,36},$$

де значення коефіцієнту K приймається в залежності від типу судна (для буксирів коефіцієнт $K = 0,042 \div 0,046$), значення E для буксирів знаходиться в межах $350 \div 450$.

Але найбільш ефективною схемою розкладу маси судна на складові є структура розбиття судових робіт на частини SWBS (Ship Work Breakdown Structure), яка запропонована державними стандартами США та Великобританії [35], [38]. Значення складових навантаження мас $W_{100} - W_{700}$ в цієї структурі визначаються в залежності від повної водотоннажності судна та швидкості його руху по статистичним даним існуючих суден. При цьому залежність складових розбиття маси ескортних буксирів від швидкості руху може бути не враховано тому, що ці буксири мають фіксовану швидкість руху.

Складовими навантаження судна в структурі SWBS є: W_{100} – маса конструкцій, W_{200} – маса пропульсивної установки, W_{300} – маса електричної

установки, W_{400} – маса систем управління та спостереження, W_{500} – маса допоміжних систем, W_{600} – маса обладнання та фурнітури, W_{700} – маса озброєння; W_F – маса змінних вантажів (W_{F1} – палива та масла; W_{F2} – запасів прісної води; W_{F3} – екіпажу та провізії; W_{F4} – баласту); W_G – маса спеціалізованих систем.

В структурі ESWBS до вказаних вантажних категорій додаються невантажні категорії: W_{800} – креслення судна, 3D-моделі, забезпечення якості, стандарти сертифікації, навчальне обладнання та навчання; W_{900} – включає все необхідне для побудови судна, його спуску на воду та випробувань, сюди входять риштування, елементи спуску на воду, здаточні випробування, страхування та інші.

В результаті обробки статистичних даних масового навантаження існуючих ескортних буксирів [26] отримані наступні залежності вимірників маси розділів навантаження в структурі SWBS:

$$W_{100} = 0,5192 \Delta - 24,88; \quad (3.1)$$

$$W_{200} = 0,00004 \Delta^2 + 0,0473 \Delta + 38,53; \quad (3.2)$$

$$W_{300} = 0,00008 \Delta^2 - 0,1004 \Delta + 35,06; \quad (3.3)$$

$$W_{400} = 0,0008 \Delta + 0,26; \quad (3.4)$$

$$W_{500} = 0,0334 \Delta + 2,07; \quad (3.5)$$

$$W_{600} = 0,0685 \Delta + 1,12; \quad (3.6)$$

$$W_{700} = 0,0; \quad (3.7)$$

$$W_{F1} = 0,1224 \Delta + 13,37; \quad (3.8)$$

$$W_{F2} = 0,0001 \Delta + 15,00; \quad (3.9)$$

$$W_{F3} = 0,0025 \Delta - 0,0582; \quad (3.10)$$

$$W_{F4} = 0,0074 \Delta + 12,35; \quad (3.11)$$

$$W_G = 0,0657 \Delta + 4,55. \quad (3.12)$$

Положення центру ваги по висоті можна визначити в залежності від висоти борту D за формулою

$$\overline{KG} = C_{KG} D + \frac{\nabla_{DH}}{L_{PB} B},$$

де ∇_{DH} – об'єм рубки, $C_{KG} = 0,65 \div 0,75$ – коефіцієнт для буксирного судна.

При відсутності інформації про об'єми приміщень на початкових етапах проектування положення центру ваги по висоті знаходиться за формулою

$$\overline{KG} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \overline{KG}_i}{\sum_{i=1}^n W_i},$$

де $\overline{KG}_i$ – апліката центру ваги відповідної складової навантаження, м;

n – кількість складових навантаження мас.

При наявності близького прототипу апліката центру маси відповідної статті навантаження дорівнює, м,

$$\overline{KG}_i = \frac{\overline{KG}_i^*}{D^*} D,$$

де $\overline{KG}_i^*$, D^* – відповідно апліката центру ваги i -го розділу навантаження і висота борту прототипу, м.

Якщо прототип відсутній, аплікату $\overline{KG}$ визначають за наближеною формулою

$$\overline{KG} = \zeta_{KG} D,$$

де ζ_{KG} – коефіцієнт, значення якого знаходиться з робіт [2], [30].

3.2 Плавучість

Правильний вибір головних розмірів ескортних буксирів вже на початкових етапах проектування є однією з найважливіших задач проектування, оскільки це дає можливість забезпечити високий рівень морехідних якостей та експлуатаційну універсальність судна, зменшити масу його корпусу. В математичній моделі розрахунок технічних якостей

ескортного буксира починається з визначення головних елементів (довжини між перпендикулярами L_{pp} , ширини B , висоти борту D , осадки по конструктивну ватерлінію d).

Довжина між перпендикулярами L_{pp} ескортних буксирів, які були побудовані на провідних суднобудівних підприємствах за останні 20 років, знаходиться в межах від 25 до 35 метрів та визначається залежністю (1.2), яка була отримана здобувачем в результаті обробки статистичних даних, м,

$$L_{pp} = 2e^{-0,7 \cdot N_e^2} - 0,0012N_e + 29,995.$$

Наступні головні розміри визначаються залежностями (1.3), (1.4), (1.5):

$$- \text{ширина } B = 0,0183L_{pp}^2 - 0,829L_{pp} + 20,237, \text{ м};$$

$$- \text{осадка } d = 0,0382B^2 - 0,6208B + 6,0984, \text{ м};$$

$$- \text{висота борту } D = 0,114d^2 - 0,0965d + 3,2464, \text{ м}.$$

Параметри форми корпусу визначаються за наближеними формулами [81], [30,31]:

– коефіцієнт повноти мідельшпангоуту

$$C_m = (1 + (1 - C_B)^{3,5})^{-1};$$

– коефіцієнт поздовжньої повноти

$$C_p = \frac{C_B}{C_m};$$

– коефіцієнт повноти площі ватерлінії

$$C_{vp} = 0,95C_p + 0,17(1 - C_p)^{1/3};$$

– абсциса центру величини

$$L_{CB} = -0,011L \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{0,65 - C_b}{0,15} \right) \pm 1,0 \right].$$

Баланс між силою плавучості і силою ваги ескортного буксира визначається рівнянням плавучості:

$$\Delta = \rho C_B L B d.$$

3.3 Місткість

Повна теоретична місткість приміщень судна в межах теоретичних ліній корпусу і рубки

$$W = V + W_B + W_P,$$

або

$$W = V \left[1 + \frac{C_{wp}}{C_b} \left(\frac{D}{d} - 1 \right) (1 + k_b) \right] + W_P.$$

Рівняння об'ємів для забезпечення проектуваному судну необхідної місткості [28]:

$$W = \sum W_i,$$

де W – теоретичний об'єм корпусу судна з надбудовами,

W_i – сума потрібних теоретичних об'ємів всіх приміщень судна. До їх складу входять об'єми: приміщення команди $W_{км}$, приміщення енергетичної установки $W_{м}$, приміщення паливних цистерн $W_{п}$, приміщення електрообладнання $W_{е}$, приміщення постів керування $W_{к}$, приміщення баластних цистерн $W_{бл}$, запас місткості $W_з$. Для буксира рівняння об'ємів буде мати вигляд

$$W = \sum W_i = W_{км} + W_{м} + W_{п} + W_{е} + W_{к} + W_{бл} + W_з, \quad (3.13)$$

де $W_{км} = \mu_{км} n$, $\mu_{км}$ – питомий об'єм приміщень команди, n – загальна кількість членів команди;

$W_{м} = \mu_{м} N$, $\mu_{м}$ – питомий об'єм приміщень енергетичної установки, N – потужність енергетичної установки;

$$W_{п} = \frac{k_{м} k_{п} p_{п}}{\rho_{п} k_{пп}} N \frac{z}{v} = \frac{k_{м} k_{п} p_{п}}{\rho_{п} k_{пп}} \frac{V^m v^{n-1}}{C} r,$$

при цьому $\rho_{п}$ – густина палива, $k_{пп}$ – коефіцієнт заповнення паливних цистерн, $k_{м}$ – коефіцієнт морського запасу, $p_{п}$ – питома витрата палива;

об'єми приміщень електрообладнання $W_{е}$, приміщення постів керування $W_{к}$, приміщення баластних цистерн $W_{бл}$ та запас місткості $W_з$ можна прийняти пропорційно об'ємній водотоннажності V :

$$W_{е} = a_e V, \quad W_{к} = a_k V, \quad W_з = a_z V;$$

об'єм баластних цистерн $W_{\text{бл}} = \frac{\eta_{\text{бл}}}{k_{\text{бл}}} V$,

де $\eta_{\text{бл}}$ – коефіцієнт, який визначає, яку частку від V складає об'єм баластної води, $k_{\text{бл}}$ – коефіцієнт заповнення баластних цистерн.

З урахуванням вищезначених складових, рівняння (3.13) має вигляд

$$W = \left(a_e + a_{\kappa} + a_z + \frac{\eta_{\text{бл}}}{k_{\text{бл}}} \right) V + \left(\frac{\mu_m v^n}{C} + \frac{k_M k_{\Pi} p_{\Pi}}{\rho_{\Pi} k_{\text{III}}} \frac{v^{n-1}}{C} r \right) V^m + W_{\text{км}},$$

або

$$W = W(V) + W_{\text{нз}},$$

де $W(V)$ – місткість, яка залежить від об'ємної водотоннажності V , $W_{\text{нз}}$ – незалежна місткість.

У випадку розміщення постів керування в рубці, рівняння місткості [30]

$$V \left[1 + \frac{C_{\text{wp}}}{C_b} (1 + k_b) \left(\frac{D}{d} - 1 \right) \right] = \left(a_e + a_z + \frac{\eta_{\text{бл}}}{k_{\text{бл}}} \right) V + \left(\frac{\mu_m v^n}{C} + \frac{k_M k_{\Pi} p_{\Pi}}{\rho_{\Pi} k_{\text{III}}} \frac{v^{n-1}}{C} r \right) V^m + W_{\text{км}},$$

або

$$\frac{C_{\text{wp}}}{C_b} (1 + k_b) \left(\frac{D}{d} - 1 \right) = \frac{W(V)}{V} + \frac{W_{\text{нз}}}{V} - \frac{W_p}{V} - 1.$$

3.4 Ходовість

При проектуванні багатоцільового буксира розрахунки його ходовості треба виконати як для основної – ескортної, так і для допоміжних операцій функціонування. При цьому треба враховувати, що в загальному випадку операції здійснюються с кутами дрейфу від 0 до 180 градусів.

Для отримання найкращого результату визначення опору руху буксира при таких кутах дрейфу потрібно, як правило, проведення модельних випробувань в дослідному басейні або використання регресійних залежностей, які створені на основі теоретичних, експериментальних та натурних досліджень ходовості ескортних буксирів.

В практиці проектування, як правило, користуються методами, що базуються на результатах раніше проведених серійних модельних і натурних

експериментів, які виконані при різних кутах дрейфу. Найбільш відомими з них є методи визначення ходовості буксира при його русі з нульовим кутом дрейфу [42–46]. Методи розрахунку ходовості ескортних буксирів при їх русі з різними кутами дрейфу створено в Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова на основі теоретичних залежностей [49] та даних експериментальних випробувань [19], [20], [23], які були проведені за останні двадцять років. Метод оцінювання ходовості ескортних буксирів, що базується на даних експериментальних випробувань в дослідовому басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, створено на основі буксирувальних випробувань моделей 6 багатоцільових та 10 ескортних буксирів по замовленням проектних організацій України. Одними з таких замовлень були замовлення підприємства «Краншип» корпорації TransShip, на якому виконується проектування, будівництва, а також проведення натурних випробувань ескортних буксирів. Усі проекти цього підприємства завершилися побудовою ескортних буксирів, які в теперішній час успішно експлуатуються. Дані результатів натурних випробувань дали можливість порівняти їх з даними експериментів в дослідовому басейні і з результатами створених розрахункових методів, які зараз використовуються для визначення характеристик ходовості ескортних буксирів на початкових етапах їх проектування.

3.4.1 Ходовість при куті дрейфу, що дорівнюється нулю. Однією з допоміжних задач функціонування ескортних буксирів є задача проведення буксирних операцій при русі з нульовим кутом дрейфу. Для оцінки опору суден в цій розрахунковій ситуації широке застосування отримали метод Ван Уртмерсена (Van Oortmerssen's method) [42] і метод Холтропа і Меннена (Holtrop and Mennen's Method) [43–46].

Метод Холтропа і Меннена базується на регресійних залежностях, отриманих в результаті обробки даних випробувань моделей і натурних суден. Найбільше розповсюдження він отримав для визначення опору транспортних суден з середніми значеннями коефіцієнту загальної повноти, але має деякі

обмеження на використання по параметрах форми корпусу судна (табл.3.1). Основним його недоліком є необхідність мати в наявності значну кількість даних по судну, які на початкових етапах проектування не завжди можна визначити.

Таблиця 3.1 – Обмеження на використання методу Холтропа і Меннена

Параметр форми корпусу	Нижнє значення	Верхнє значення
F_n	—	1,00
C_b	—	—
C_p	0,55	0,85
C_m	—	—
B/d	2,10	4,00
L/B	3,90	14,90

Метод Ван Уртмерсена також використовує дані по 93 моделях буксирів та траулерів, які були отримані в дослідному басейні Нідерландів. Цей метод використовує широкий діапазон параметрів в межах чисел Фруда $0,1 \div 0,5$.

У таблиці 3.2 наведені обмеження на використання цього методу за параметрами форми корпусу судна.

Таблиця 3.2 – Обмеження на використання методу Ван Уртмерсена

Параметр форми корпусу	Нижнє значення	Верхнє значення
F_n	0,1	0,50
C_b	—	—
C_p	0,52	0,70
C_m	0,73	0,98
B/d	1,90	3,40
L/B	3,40	6,20

В результаті порівняння даних розрахунку за цими методами опору руху ескортних буксирів з відповідними даними модельних випробувань в дослідному басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, обрано метод Холтропа і Меннена, який в порівнянні з методом Уртмерсена дає кращі результати в діапазоні швидкостей до 13 вузлів. Для ескортних суден середньоквадратична похибка розрахунку опору за методом Холтропа і Меннена не перевищує значення $3\div 5\%$. Використання цього методу при розрахунках буксирувального опору враховує всі основні параметри форми корпусу судна, які дають можливість з достатньою точністю визначити швидкість руху і найбільш повно відобразити особливості впливу форми корпусу на ходовість ескортного буксира при його русі з кутом дрейфу, що дорівнює нулю. Метод Холтропа и Меннена також має усі регресійні залежності для визначення ефективності редукторів, валопроводів, гребних гвинтів та їх взаємодії з корпусом буксира, які дозволять реалізувати вибір двигунів необхідної потужності.

3.4.2 Ходовість при різних кутах дрейфу. Розробка методу визначення ходовості ескортних буксирів, який створено на основі випробувань їх моделей в дослідному басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова [19–20], [23], включає формування регресійних залежностей для сил, безпосередньо діючих на корпус буксира, визначення сил, що обумовлені роботою гвинто-рульових колонок, та сил, які виникають у буксирному тросі, а також складання системи трансцендентних рівнянь руху буксира при виконанні стаціонарної ескортної операції, формування методу розв'язання цієї системи та створення програмного комплексу розрахунку діючих сил і кінематичних характеристик ескортного буксира.

3.4.2.1 Сили, що діють на буксир під час виконання ескортної операції. Характеристики ескортної операції визначаються за допомогою аналізу сил, які діють на буксир в режимі ескортної операції. Такі сили відображені на рис. 3.1. Схема цього рисунку приведена в вимогах Bureau Veritas (BV) [39], а її системи координат відповідають тим, що прийняті в теорії керованості суден

[49]. При цьому початок координат системи, жорстко зв'язаної з буксиром, розташовано в площині ватерлінії (ВЛ) на перетині діаметральної площини (ДП) та площини мідельшпангоуту (ПМШ).

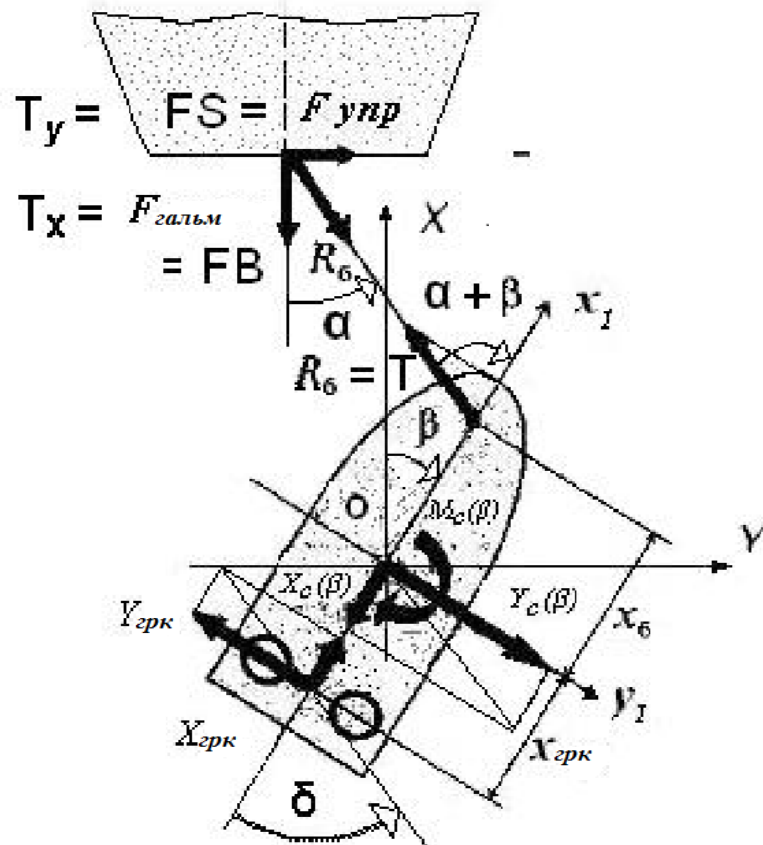


Рисунок 3.1 – Сили, діючі на ескортний буксир і ескортоване судно,

де R_6 – зусилля в буксирному канаті;

x_6 – відстань до носового буксирного рима;

α – кут буксирного канату;

β – кут дрейфу ескортного буксира;

δ – кут упору гвинто-рульових колонок;

X_c – поздовжня сила на корпусі ескортного буксира;

Y_c – поперечна сила;

M_c – динамічний момент;

$X_{грк}$ – поздовжня складова корисної тяги двох гвинто-рульових колонок (ГРК), що діє на корпус буксира при його русі зі швидкістю V_s і створюваному при цьому русі кутом набігаючого потоку на ГРК ($\beta - \delta$);

$Y_{гpk}$ – бічна складова корисної тяги двох гвинто-рульових колонок, що діє на корпус буксира при його русі зі швидкістю V_s і створюваному при цьому русі кутом набігаючого потоку на ГРК ($\beta - \delta$);

$X_{гpk}$ – відстань до вертикальних осей гвинто-рульових колонок.

3.4.2.2 Сили, що діють на буксир зі сторони ГРК. Рушійно-рульовий комплекс ескортного буксира, що розглядається, представлений двома повноповоротними ГРК, характеристики яких для розглянутих операцій отримані шляхом узагальнення даних по існуючим ГРК [86–88] при їх синхронній роботі за корпусами, розвиваючих в умовах повного використання потужності своїх ГД швидкості ходу 8 і 10 вузлів вперед.

Таке узагальнення приводить до «типової» безрозмірної залежності сумарного упору колонок $P_1(v_s)$ від швидкості руху вперед v_s , (рис. 3.2), «типової» безрозмірної залежності сумарного упору $P_2(\delta)$ при синхронному повороті колонок на кути перекладки δ від 0 до ~ 120 градусів (рис. 3.3) і «типової» безрозмірної коректуючої залежності азимутального використання колонок $P_3(\delta)$, обумовленої «заборною» їх роботи в режимах «струміль в струміль» при кутах перекладки, близьких до 90 градусів (рис. 3.4).

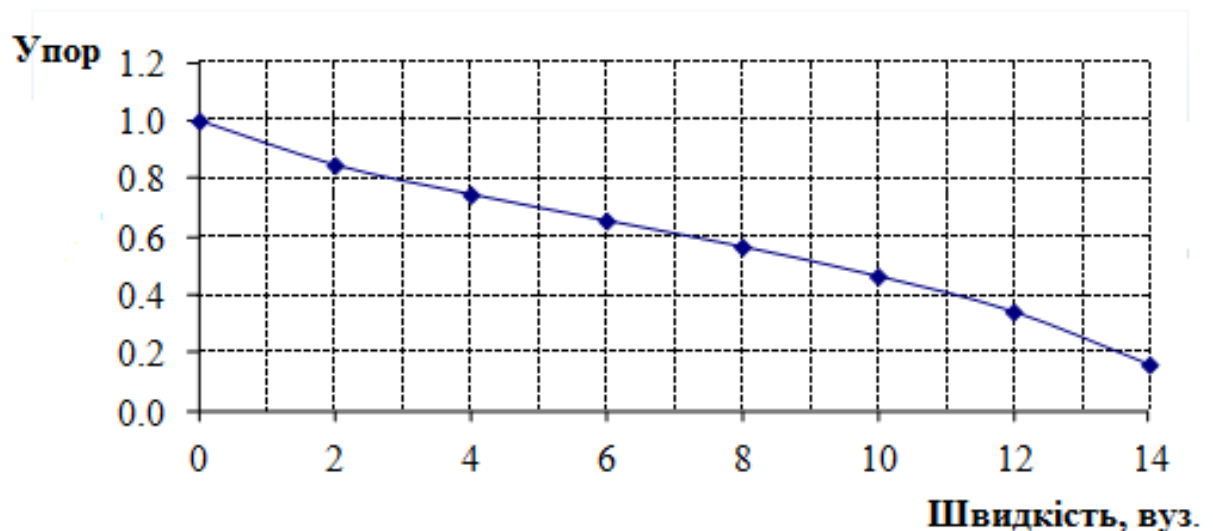


Рисунок 3.2 – Залежність безрозмірного сумарного упору ГРК від швидкості руху на передньому ході

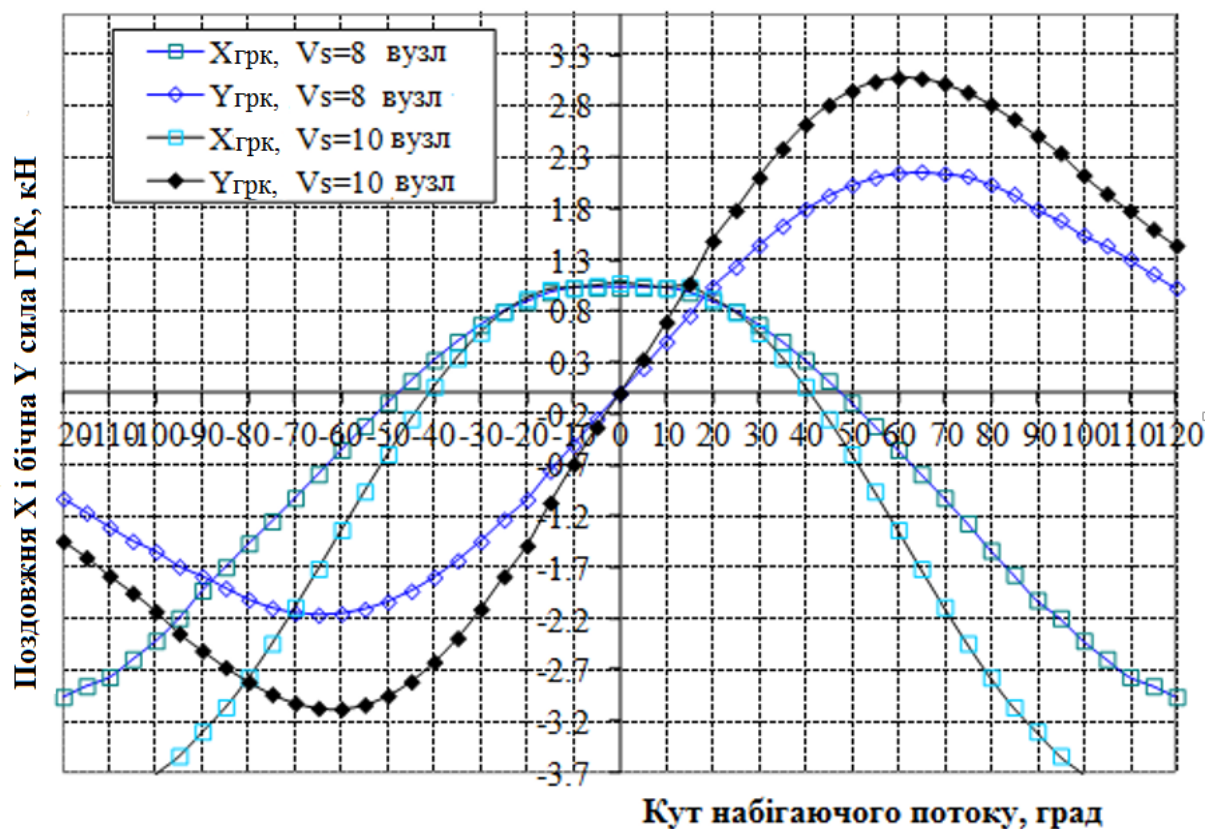


Рисунок 3.3 – Залежність сумарного упору при синхронному повороті колонок на кут перекладки від 0 до 120°

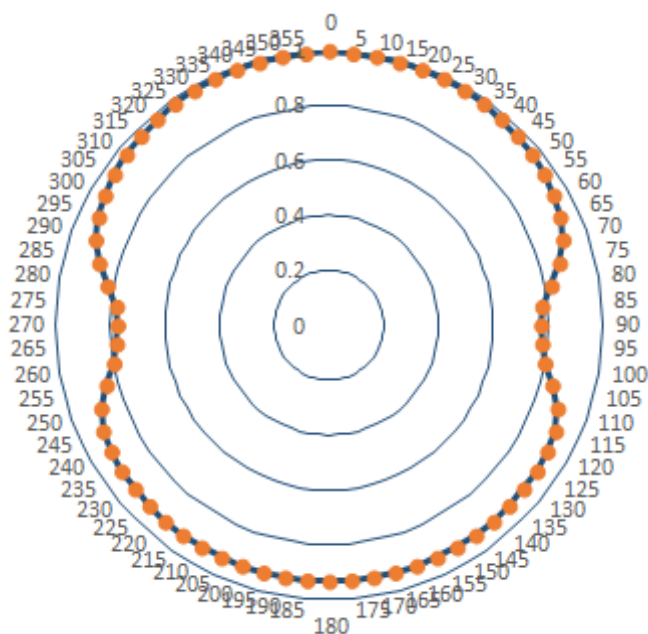


Рисунок 3.4 – Залежність рівня використання сумарної сили упору азимутального використання колонок, яка враховує «заборону» їх роботи в режимах «струміль в струміль» при кутах перекладки, близьких до 90 градусів

3.4.2.3 Гідродинамічні сили, що діють на буксир під час виконання ескортної операції. В основу визначення гідродинамічних сил на корпусі і скегу буксира покладені припущення теорії керованості суден при русі на відносно невеликих швидкостях ходу, але великих кутах дрейфу.

При цьому структура залежностей позиційних сил і моментів на корпусі буксира від параметрів його форми, кута дрейфу і швидкості набігаючого потоку визначена способом обробки даних систематичних серійних модельних випробувань дубльованих тіл судновий форми в аеродинамічній трубі, наведеним в [49]. Скег розглянуто як крило малого подовження.

У зв'язку з тим, що корпус для скега є екраном, гідродинамічні коефіцієнти скега взяті як для крила подвоєного розмаху.

Вплив відхилення форми корпусів ескортних буксирів від форми корпусів тіл суднових форм, розглянутих в [49], враховано введенням коригувальних множників, значення яких встановлюється шляхом модельних («ескортних» – з кутами дрейфу від 0 до 90 градусів) випробувань в дослідному басейні Національного університету кораблебудування моделей ескортних буксирів, спроектованих конструкторськими бюро ЧСЗ, Пелла, і групи компаній TransShip.

Проекції діючих на корпус буксира гідродинамічних сил $X_c(\beta)$, $Y_c(\beta)$ і моменту $M_c(\beta)$ на осі пов'язаної з буксиром системи координат $ox_1y_1z_1$ визначаються виразами

$$\begin{aligned} X_c(\beta) &= C_x(\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_L; \\ Y_c(\beta) &= C_y(\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_L; \\ M_c(\beta) &= C_m(\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_L L, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де ρ – густина рідини; v – швидкість буксира; A_L – занурена площа діаметрального батоксу; L – довжина буксира по ватерлінії (ВЛ).

Занурена площа діаметрального батоксу A_L розраховується за формулою

$$A_L = Ld\sigma_d.$$

Позиційні гідродинамічні характеристики судна $C_X(\beta)$, $C_Y(\beta)$ і $C_M(\beta)$ можуть бути знайдені шляхом дослідження характеристик моделей ескортних буксирів в дослідовому басейні. Велика кількість експериментів, проведених в дослідовому басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) з моделями ескортних буксирів, дозволила отримати значення гідродинамічних характеристик судна $C_X(\beta)$, $C_Y(\beta)$ і $C_M(\beta)$ в діапазоні кутів дрейфу від 0 до 90°. Отримані залежності співпадають з даними [49] та мають вигляд

$$\begin{aligned} C_X(\beta) &= -0,075 \sin \left\{ \left[\pi - \arcsin(C_{x0} / 0,075) \right] \left[1 - (\beta / \psi) \right] \right\}; \\ C_Y(\beta) &= 0,5 C_{y\beta} \sin 2\beta \cos \beta + c_2 \sin \beta |\sin \beta|; \\ C_M(\beta) &= C_{m\beta} \cdot \sin 2\beta, \end{aligned} \quad (3.2)$$

де C_{x0} – коефіцієнт опору буксира при передньому ході при швидкості v без кута дрейфу;

$\psi = \psi_1 + \psi_2$ – кут диференту (ψ_1 – статичного і ψ_2 – ходового);

$C_{y\beta}$, c_2 , $C_{m\beta}$ – позиційні похідні коефіцієнтів бічної сили та моменту за кутом дрейфу β .

Позиційні похідні $C_{y\beta}$, c_2 і $C_{m\beta}$ залежать від геометричних характеристик корпусу. При розгляданні основного тіла корпусу буксира і його скега як єдиного цілого в якості таких характеристик обрані:

σ_d – коефіцієнт повноти зануреної площі діаметрального батоксу;

d/L – відношення середньої осадки d до довжини по ВЛ L ;

d/B – відношення середньої осадки d до ширини по ВЛ B ;

L/B – відношення довжини по ВЛ L до ширини по ВЛ B ;

C_p – коефіцієнт поздовжньої повноти.

Вибір цих характеристик визначено з урахуванням доступності їх розрахунків в процесі концептуального і технічного проектування буксира за допомогою використання програми Maxsurf.

Структурна залежність позиційних похідних $C_{y\beta}$, c_2 і $C_{m\beta}$ від характеристик корпусу буксира з включеним скегом прийнята за аналогією зі структурною залежністю коефіцієнтів сил і моменту, прийнятої в теорії керованості суден [49]:

$$\begin{aligned} C_{y\beta} &= \pi(d/L)(a_1/C_p)^{2,5}((L/B)/a_2)^{0,33} + (\sigma_D - a_3); \\ c_2 &= b_1(3(d/B))^{0,5}(b_2/C_p)^{1,5} + b_3(\sigma_D - b_4); \\ C_{m\beta} &= d_1(d/L)d_2(d_3 - C_p) + (d_4 - \sigma_D). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Обробка даних, представлених наведеним вище рядом проектних рішень ескортних буксирів дозволила отримати наступні значення коефіцієнтів a_i , b_i і d_i ($i = 1, 2, 3, 4$) [23]:

$$\begin{aligned} a_1 &\approx 0,720; a_2 \approx 2,941; a_3 \approx 0,962; \\ b_1 &\approx 0,722; b_2 \approx 0,853; b_3 \approx 0,851; b_4 \approx 0,953; \\ d_1 &\approx 0,383; d_2 \approx 0,104; d_3 \approx 0,602; d_4 \approx 0,904. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Якість апроксимації експериментальних даних по силах, діючих на корпус буксира, отриманої викладеним методом в абсолютній системі координат OXYZ при швидкостях його ходу 6, 8 і 10 вузлів, визначено шляхом порівняння отриманих залежностей з даними експериментальних досліджень моделей ескортних буксирів в дослідовому басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Приклад такого порівняння наведено на рис. 3.5 [19].

3.4.2.4 Сили від дії вітру та хвилювання. Врахування інерційного навантаження при швартовних операціях. При обчисленнях сил і моментів, що діють на буксир в режимі ескортної операції, додатково враховуються

хвильові гідродинамічні і вітрові аеродинамічні сили і моменти, а також інерційні сили, які діють на корпус супроводжуваного судна, його гвинти і рулі при нестаціонарному русі в умовах швартування/відшвартування.

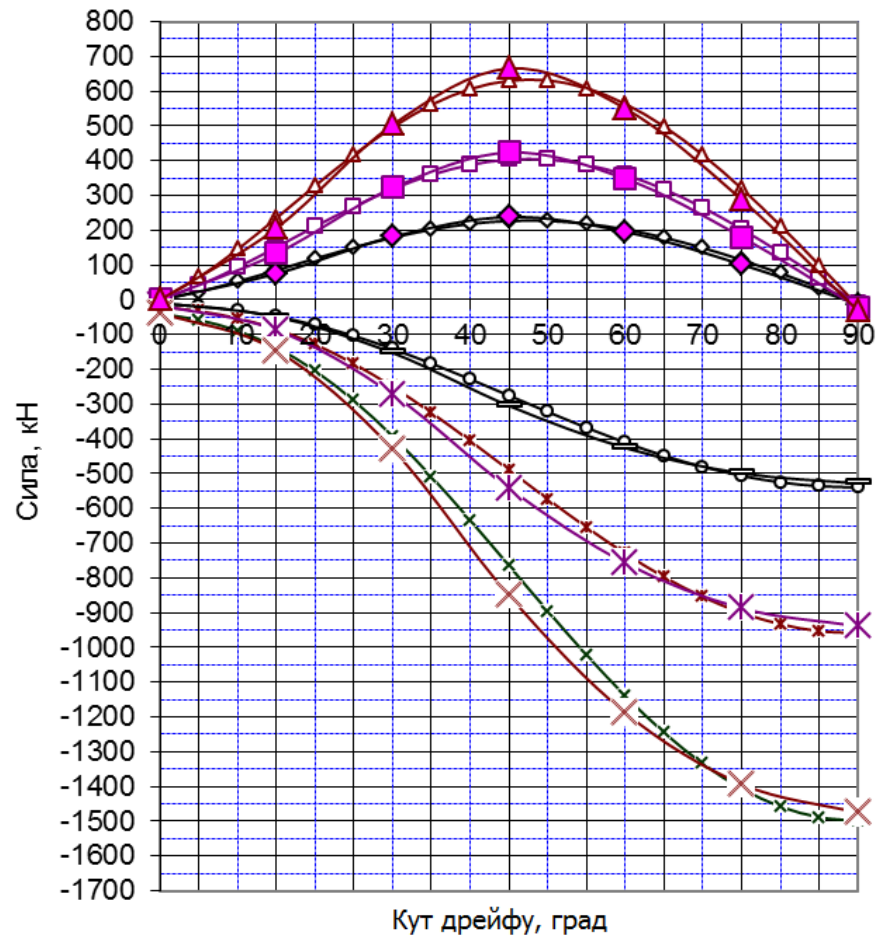


Рисунок 3.5 – Залежність гідродинамічних сил XX і YY , діючих на корпус буксира TUG60L («Пантера») від кута дрейфу:

$\text{---}\bigcirc\text{---}$ $XX V_s = 6$ вуз., $\text{---}\diamond\text{---}$ $YY V_s = 6$ вуз., $\text{---}\times\text{---}$ $XX V_s = 8$ вуз.,
 $\text{---}\square\text{---}$ $YY V_s = 8$ вуз., $\text{---}\times\text{---}$ $XX V_s = 10$ вуз., $\text{---}\triangle\text{---}$ $YY V_s = 10$ вуз.,
 $\text{---}\bigcirc\text{---}$ $XX V_s = 6$ вуз.: методика визначення діючих сил;
 експ. НУК., $\text{---}\diamond\text{---}$ $YY V_s = 6$ вуз., експ. НУК.,
 $\text{---}\times\text{---}$ $XX V_s = 8$ вуз., експ. НУК., $\text{---}\square\text{---}$ $YY V_s = 8$ вуз., експ. НУК.,
 $\text{---}\times\text{---}$ $XX V_s = 10$ вуз., експ. НУК., $\text{---}\triangle\text{---}$ $YY V_s = 10$ вуз., експ. НУК.:
 експериментальні випробування

Оцінка цих сил виконується за формулами, аналогічними формулам (2.4) – (2.7).

3.4.2.5 Рівняння руху буксира під час виконання стаціонарної ескортної операції. Отримані залежності гідродинамічних сил (3.2) – (3.5) використані

при формуванні трансцендентних рівнянь руху буксира в режимах стаціонарних ескортних операцій. В результаті значення характеристик цього режиму руху ескортного буксира визначено системою рівнянь [18–21]:

$$\begin{aligned} R_6 \cos(\beta + \alpha) + X_c(\beta) + X_{epk}(\beta - \delta) &= 0; \\ -R_6 \cos(\beta + \alpha) + Y_c(\beta) + Y_{epk}(\delta - \beta) &= 0; \\ -R_6 \sin(\beta + \alpha)x_6 + M_c(\beta) + Y_{epk}(\beta - \delta)x_{epk} &= 0, \end{aligned} \quad (3.5)$$

При заданому значенні швидкості v і заданому куті буксирного каната α рішення цих рівнянь руху отримано в результаті пошуку глобального мінімуму (нуля) в задачі безумовної оптимізації цільової функції $F(\beta, \delta, R_6)$ незалежних змінних β, δ, R_6 наступного вигляду [23]

$$F(\beta, \delta, R_6) = (\sum Fx)^2 + (\sum Fy)^2 + (\sum Mz)^2 \quad (3.6)$$

одним з методів нелінійного програмування – методом Пауелла. У представленому виразу для цільової функції (3.6) компоненти $\sum Fx$, $\sum Fy$ і $\sum Mz$ є лівими частинами рівнянь (3.5).

3.2.4.6 Програмний комплекс розрахунку діючих сил і кінематичних характеристик буксира в режимах ескортних операцій. Для визначення значення сил, діючих на буксир в режимах ескортних операцій, існують спеціальні програмні комплекси. На цей час найбільш розповсюджені два основних типи, які відрізняються по признаку розглядання ескортних операцій. Перший тип заснований на використанні диференціальних рівнянь ескортного супроводження, другий – на рішенні трансцендентних рівнянь рівноваги діючих на буксир сил в умовах його стаціонарного руху з фіксованою швидкістю при різних положеннях відносно ескортованого судна.

Прикладом першого типу є програмні комплекси, створені Криловським державним науковим центром в співробітництві з Російським морським

регістром судноплавства [89] та Damen Reserch в співробітництві з Дельфтським університетом Technology and MARINE [25].

Прикладом програмного комплексу другого типу є розробка Maritime Reserch Institute Netherlands в співробітництві з SCHOTTEL GmbH &Co. [90].

Програмним комплексом, який розроблено Національним університетом кораблебудування імені адмірала Макарова по замовленню корпорації TransShip для визначення зусиль, діючих на буксир, та кінематичних характеристик руху в режимах стаціонарних ескортних операцій [47] є комплексом другого типу. Цей комплекс під назвою «EscortTugForces» має схвалення Класифікаційного товариства Російський морський реєстр судноплавства на використання в якості методики, що дозволяє ще при проектуванні буксира визначити його клас без проведення натурних випробувань побудованого проекту [91]. Особливостями цього програмного комплексу є:

а) використання в якості вихідних даних загальнодоступних відомостей про головні розміри та характеристики буксира, що визначаються на стадіях його проектування за допомогою сучасних систем автоматичного проектування суден або містяться в технічній документації буксира;

б) окремий розгляд корпусу буксира і його скега з послідуєчим об'єднанням в єдине ціле з метою визначення діючих сил та кінематичних характеристик руху на основі розв'язання трансцендентних рівнянь руху буксира в діапазоні кутів буксирного канату від 0 до 90 градусів;

в) побудування полярних діаграм залежності діючих зусиль від положення буксира щодо супроводжуваного судна, які дають можливість швидкого визначення найбільш результативної позиції буксира по відношенню до супроводжуваного судна і його загальної здатності до проведення ескортних операцій;

г) застосування на стадіях проектування в якості методики визначення регламентованих Російським морським реєстром судноплавства

максимальних керуючих зусиль і кутів крену для визначення класу буксира без проведення натурних ескортних випробувань після його побудови.

Результати розв'язання рівнянь ескортних операцій (3.5), отриманих викладеним методом, співставленні з даними натурних ескортних випробувань діючих буксирів. Для ескортного буксира проекту TUG60LA результати розв'язання рівнянь руху (3.5) за допомогою програмного комплексу «EscortTugForces», в яких використані дані викладеного експериментально обґрунтованого методу визначення діючих на корпус буксира гідродинамічних сил, наведені на рис. 3.6–3.8. На рисунку 3.6 також представлені результати натурних випробувань буксира проекту TUG60LA [92] на тихій воді.

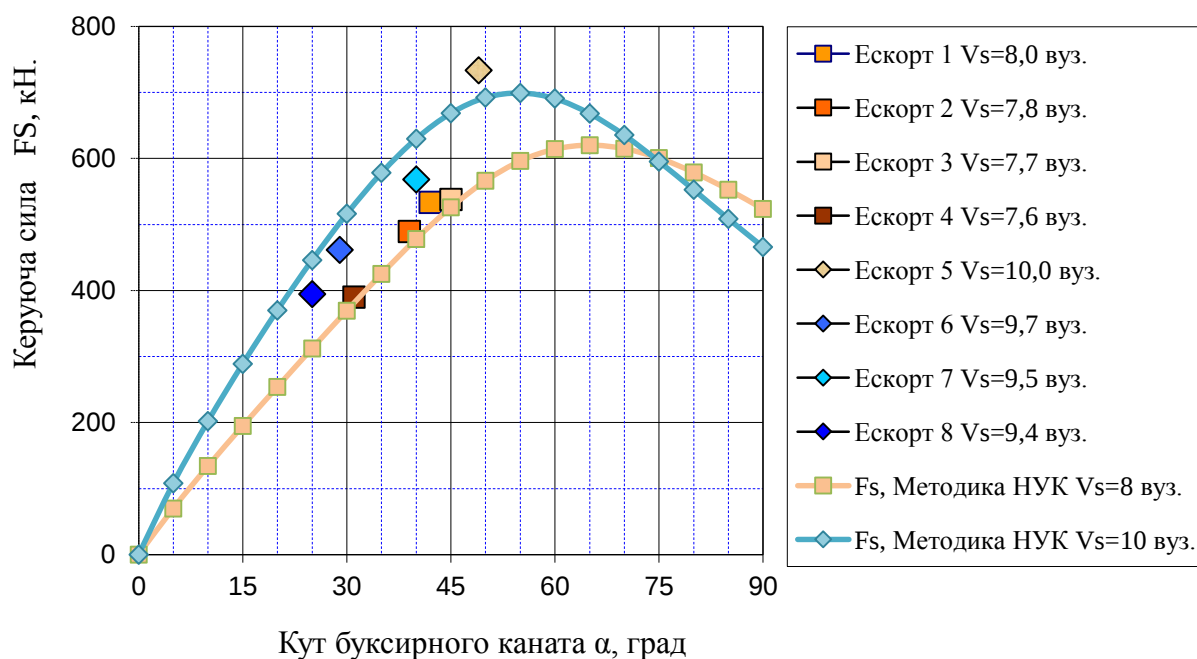


Рисунок 3.6 – Залежність значень керуючої сили F_S ескортного буксира проекту TUG60LA від кута буксирного каната α :

- F_S при $V_s = 10$ вуз., — F_S при $V_s = 8$ вуз.: розрахунки за методикою, схваленою Класифікаційним товариством [91];
- Ескорт 1 $V_s = 8,0$ вуз.: дані натурних випробувань [92]

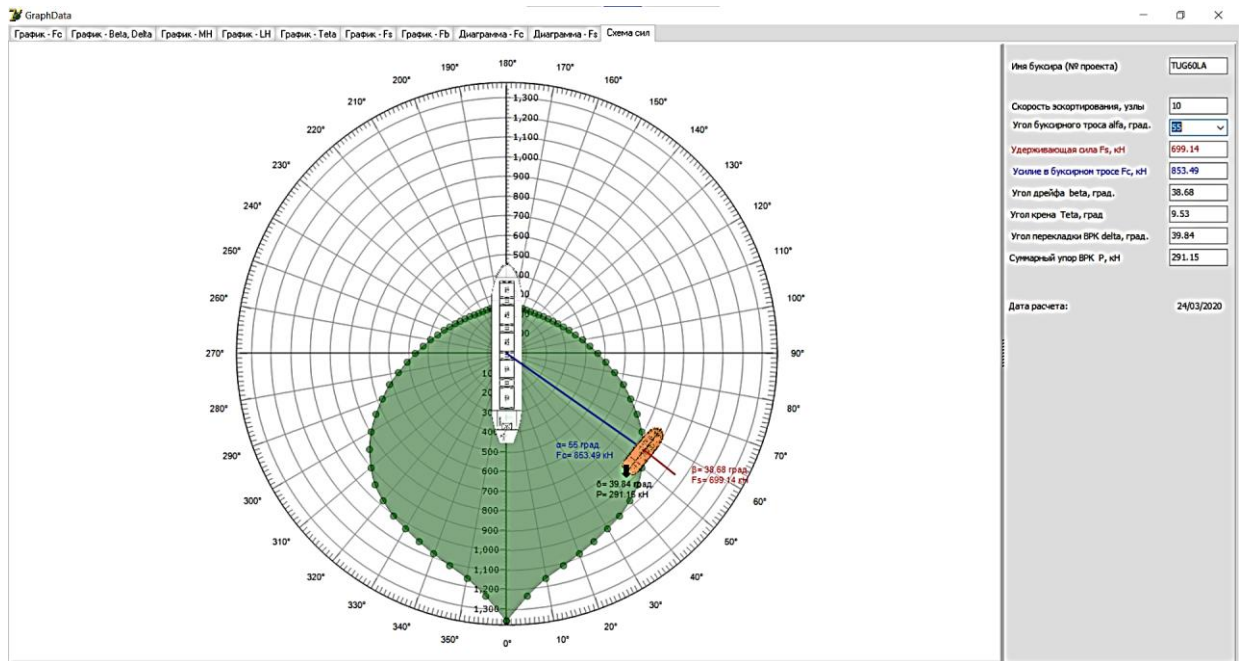


Рисунок 3.7 – Вікно результатів розрахунку характеристик ескорту судна буксиром TUG60LA при $V_s = 10$ вузлів програмним комплексом «EscortTugForces»

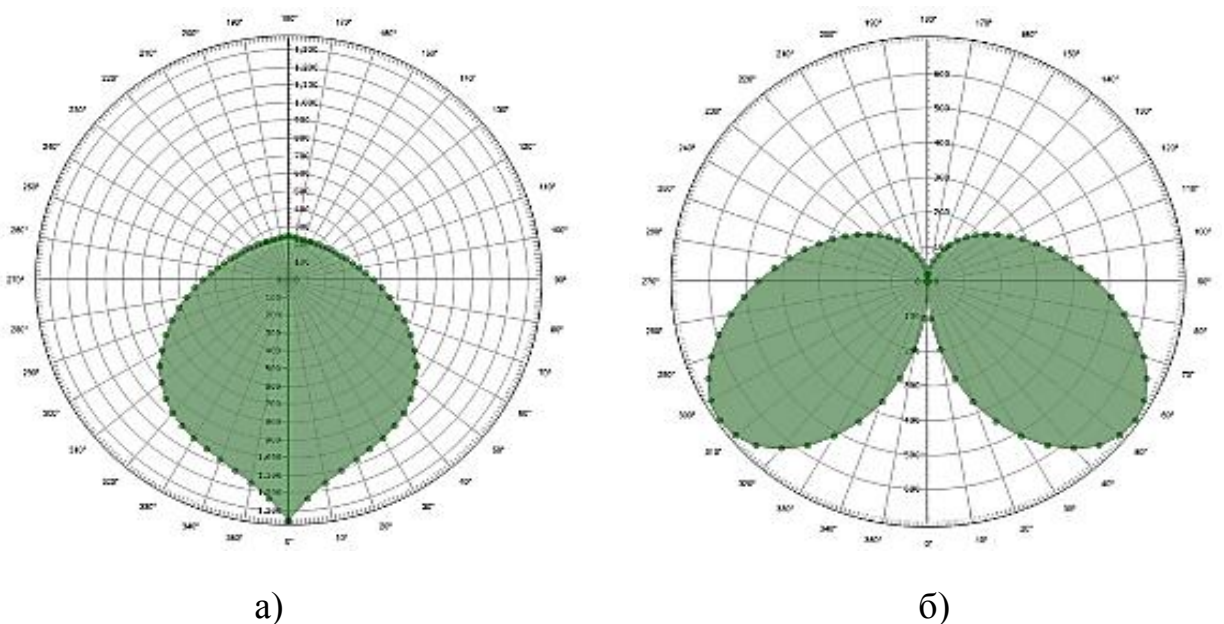


Рисунок 3.8 – Полярні діаграми отриманої залежності від кута троса α характеристик стаціонарного ескортного супроводу судна буксиром TUG60LA при $V_s 10$ вузлів:

а) – зусилля $F_c(\alpha)$ в буксирному тросі; б) – керуючого зусилля $F_s(\alpha)$

3.5 Врахування вимог класифікаційних товариств до остійності

Початкова метацентрична висота $\overline{GM}$ в математичній моделі судна розглядається як міра остійності і хитавиці судна. Величина метацентричної висоти судна визначається з рівняння початкової остійності, м,

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG},$$

де $\overline{KB}$ – апліката центру величини ескортного буксира, м; $\overline{BM}$ – поперечний метацентричний радіус, м; $\overline{KG}$ – апліката центру ваги ескортного буксира, м. Значення аплікат центру величини ескортного буксира та поперечного метацентричного радіусу отримуються за наближеними формулами або шляхом заміни обводів корпусу судна аналітичними залежностями, також можливе використання статистичних даних. Використовуючи формули, наведені в роботі [86], вираз для аплікати центра ваги $\overline{GM}$ ескортного буксира, після заміни складових наближеними значеннями матиме наступний вигляд

$$\overline{GM} = d(0,9 - 0,3C_M - 0,1C_B) + \frac{(3C_{WP} - 1)B^2}{24C_B d} - \zeta_{KG} D.$$

Розрахунок остійності ескортного буксира враховує всі варіанти навантаження: – буксир з 100% запасів, буксир з 50% запасів, буксир з 10% запасів та деякі інші.

Класифікаційні товариства висувають додаткові вимоги до остійності ескортних буксирів [39], [40]. Це обумовлено більш жорсткими умовами роботи буксирів цього класу в порівнянні з портовими.

Відношення роботи відновлювального моменту на ділянці діаграми статичної остійності (ДСО) від кута крену, викликаного максимальною утриманою силою F_S (див. рис. 3.9) до кута крену 20° , до роботи кренувального моменту від цієї ж сили на цій же ділянці кутів крену, повинне бути не менше 1,25.

Відношення роботи відновлювального моменту на ділянці діаграми статичної остійності від 0° крену до кута заливання або кута крену 40° , залежно від того, що з них менше, до роботи кренувального моменту, викликаного максимальною утриманою силою F_s на цій же ділянці повинно бути не менше 1,4.

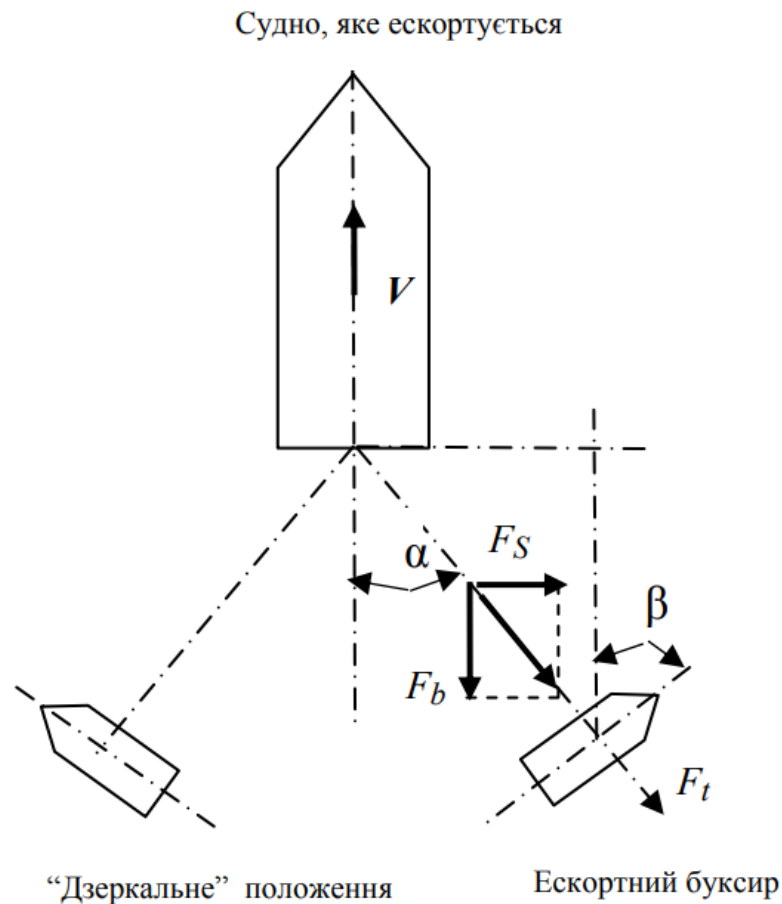


Рисунок 3.9 – Типова схема ескортних операцій:

F_s – сила, що утримує судно (керуюча сила); F_b – гальмівна сила; F_t – натяг буксирного тросу; α – кут відхилення буксирного тросу ескортного буксира від курсу судна, яке ескортується; β – кут відхилення курсу ескортного буксира від курсу судна, яке ескортується; V – швидкість судна, яке ескортується

Кут крену ескортного буксира, який перебуває під дією максимального робочого кренувального моменту, при ривку буксирного тросу в умовах хитавиці не повинен перевищувати кута максимуму ДСО Θ_{max} або кута заливання Θ_f , залежно від того, який з них менший [40].

Для цього необхідно виконати вимогу (див. рис. 3.10)

$$K_3 = \sqrt{\frac{b+c}{a+c}} \geq 1,0, \quad (3.9)$$

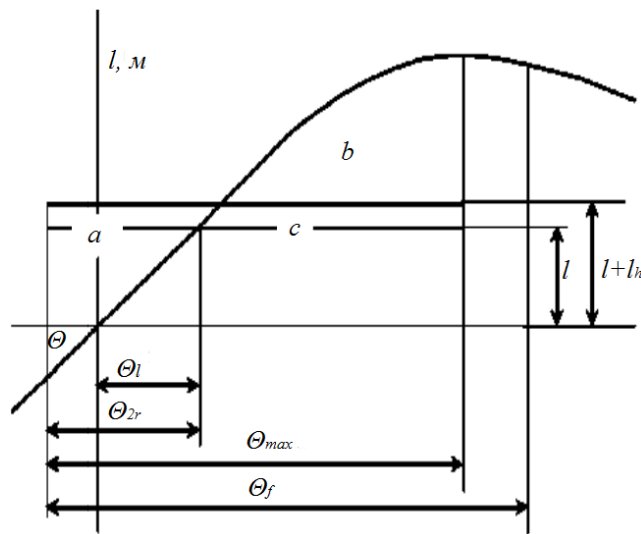


Рисунок 3.10 – ДСО і кути для визначення площ a , b , c

де a – площа, обмежена кривою $l(\Theta)$ відновлюваних плечей діаграми статичної остійності, горизонтальною прямою, що відповідає кренувальному плечу $(l+l_h)$, і кутом крену, який дорівнює $\Theta_l - \Theta_{2r}$;

b – площа, обмежена зверху кривою $l(\Theta)$ відновлювальних плечей діаграми статичної остійності, знизу – горизонтальною прямою, що відповідає кренувальному плечу $(l+l_h)$, праворуч – кутом максимуму діаграми статичної остійності Θ_{max} або кута заливання Θ_f залежно від того, який з них менший;

c – площа, обмежена ліворуч кривою $l(\Theta)$ відновлювальних плечей діаграми статичної остійності, зверху – горизонтальною прямою, що відповідає кренувальному плечу $(l+l_h)$, праворуч – кутом максимуму діаграми статичної остійності Θ_{max} або кута заливання Θ_f залежно від того, який з них менший.

Кренувальне плече l_h , м, що характеризує дію умовного ривка тросу, визначається за формулою (3.7.4.4–2) [40]

$$l_h = 0,2 \left(1 + 2 \frac{d}{B} \right) \frac{b^2}{(1+c^2)(1+c^2+b^2)} \frac{57,3}{(\Theta_{2r} - \Theta_l + \Theta_{lim})}, \quad (3.10)$$

де d – осадка буксира; B – ширина буксира;

коефіцієнти c , b , a , e визначаються за формулами (3.7.2.2–2, 3.7.2.2–3,

3.7.2.2–4, 3.7.2.2–5):

$$a = \frac{0,2 + 0,3(2d/B)^2 + \frac{z_g}{B}}{1 + 2 \frac{d}{B}};$$

$$b = \frac{(z_H/B) - a}{e}; \quad (3.11)$$

$$e = 0,145 + 0,2 \frac{z_g}{B} + 0,06 \frac{B}{2d};$$

$$c = 4,55 x_H / L;$$

$$\Theta_{lim} = \Theta_{max} \text{ або } \Theta_f \text{ залежно від того, який з них менший.}$$

Вимоги для ескортних буксирів, закладених, або в стадії побудови з 1.01.2020 року або після цієї дати, зайнятих буксируванням в порту, прибережним або морським буксируванням або ескортними операціями, а також для суден, переобладнаних для операцій буксирування після цієї дати:

Плече кренувального моменту, що виникає при буксируванні, розраховується наступним чином:

- поперечний кренувальний момент виникає під дією сили тяги рушія, рульового пристрою і протилежно спрямованим натягненням буксирного тросу;
- плече кренувального моменту HL_Θ , м, як функція від кута крену Θ повинне бути обчислене за формулою (3.11.8.2.1.2) [40]

$$HL_{\Theta} = \frac{B_p C_T (h \cos \Theta - r \sin \Theta)}{g \Delta}, \quad (3.12)$$

де B_p – тягове зусилля на швартовах, кН;

$$C_T = \frac{0,9}{\left(1 + \frac{l}{L_{pp}}\right)} \text{ для суден з гвинто-рульовими колонками,}$$

встановленими на однаковому рівні по довжині судна. C_T повинен прийматися не менше 0,7 для суден з ГРК, призначеними для буксирування кормою, і не менше 0,5 для суден з ГРК, призначеними для буксирування носом;

Δ – водотоннажність судна, т;

l – відстань по вертикалі, м, між точкою прикладання сили тяги буксирного троса і вертикальною віссю рушія;

h – відстань по вертикалі, м, між точкою прикладання сили тяги буксирного троса і горизонтальною віссю рушія;

g – прискорення вільного падіння, м/с², повинно прийматися 9,81 м/с²;

r – відстань в поперечному напрямі, м, між ДП і точкою прикладання сили тяги буксирного троса;

L_{pp} – довжина судна, м, як вона визначена в Правилах про вантажну марку морських суден.

Для суден, зайнятих ескортними операціями, при врахуванні плеча кренувального моменту, повинні виконуватися такі критерії:

$$A \geq 1,25 \cdot B; \quad C \geq 1,40 \cdot D; \quad \Theta_e \leq 15^\circ,$$

де A – площа під кривою відновлюваних плечей, виміряна від кута крену Θ_e до кута крену 20 градусів (див. рис. 3. 11);

B – площа під кривою плеча кренувального моменту, виміряна від кута крену θ_e до кута крену 20 градусів (див. рис. 3. 11);

C – площа під кривою відновлюваних плечей, виміряна від нульового крену ($\theta = 0^\circ$) до кута крену Θ_d (див. рис. 3. 12);

D – площа під кривою плеча кренувального моменту, виміряна від нульового крену ($\theta = 0^\circ$) до кута крену Θ_d (див. рис. 3. 12);

θ_e – кут крену рівноваги, який відповідає першому перетину між кривою плеча кренувального моменту і кривою відновлюваних плечей;

θ_d – кут крену, який відповідає другому перетину між кривою плеча кренувального моменту і кривою відновлюваних плечей або куту заливання або 40 градусам, зважаючи на те, що менше.

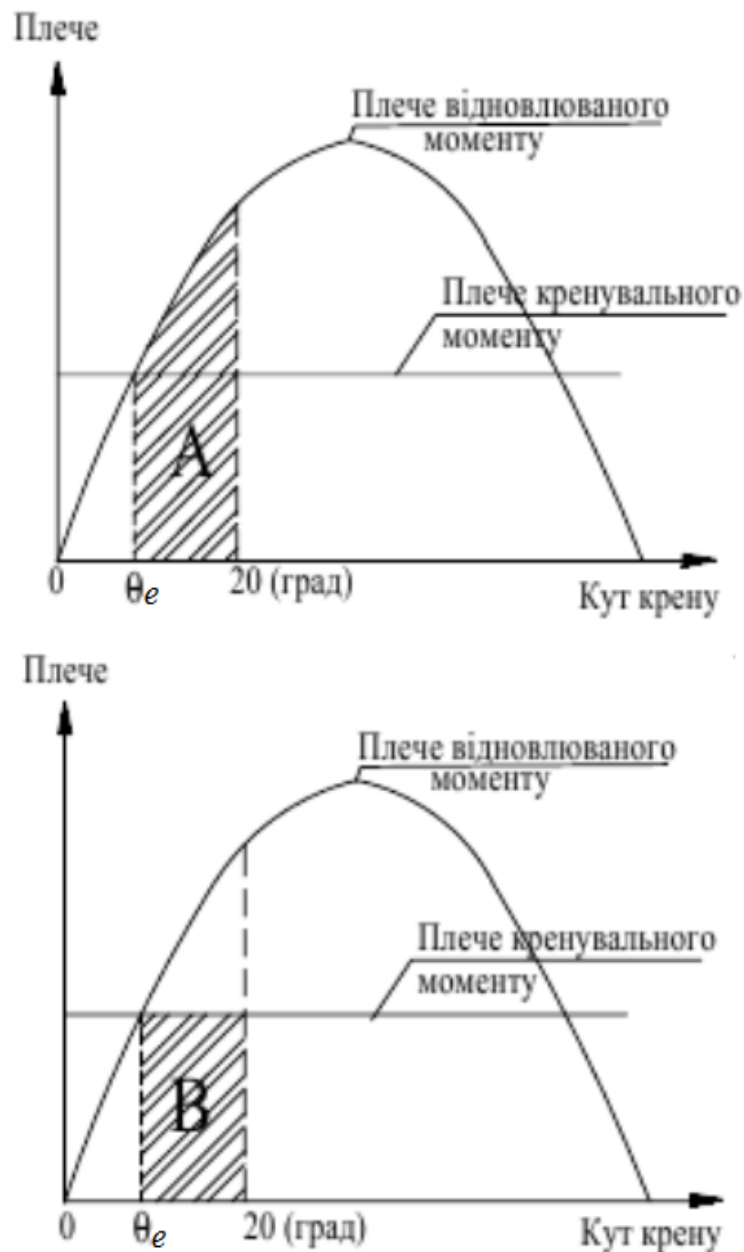


Рисунок 3.11 – ДСО і кути для визначення площ А та В

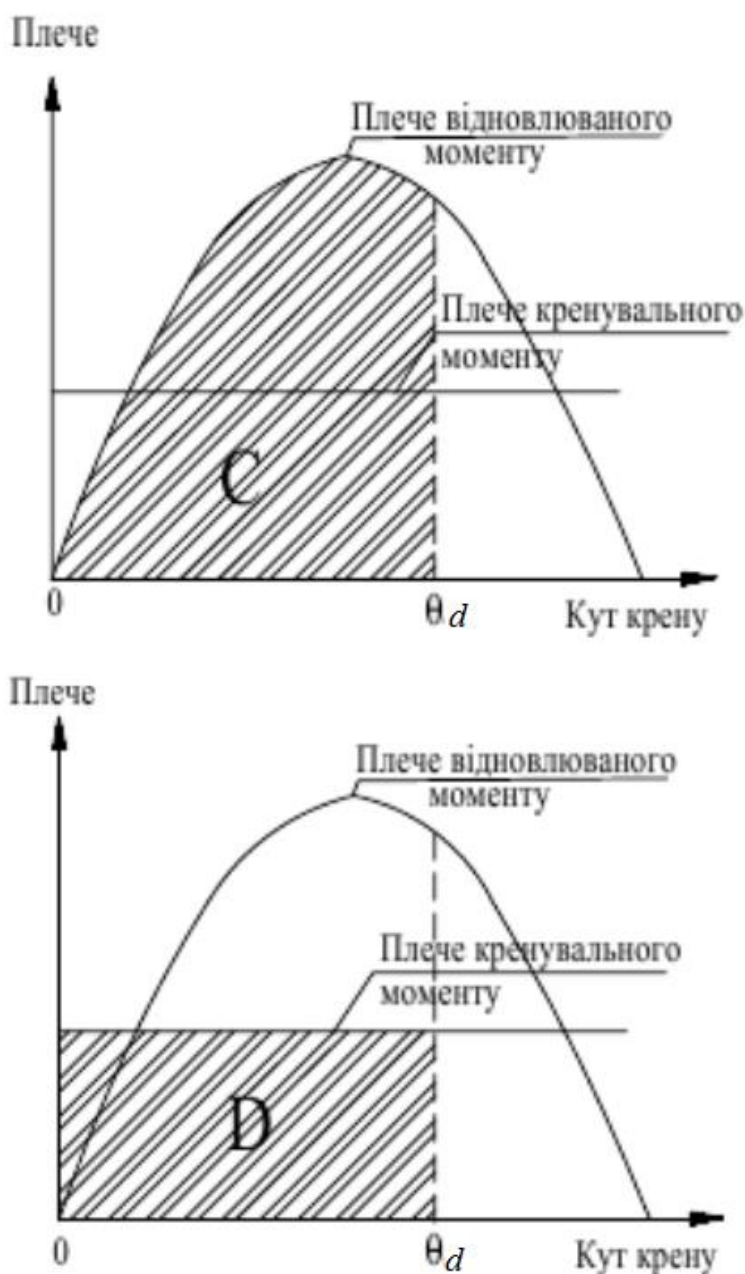


Рисунок 3.12 – ДСО і кути для визначення площ С та D

3.6 Врахування вимог класифікаційних товариств до керуючої сили

Класифікаційні товариства – Bureau Veritas, Російський морський реєстр судноплавства, Регістр судноплавства України висувають наступні вимоги до випробувань ескортних буксирів [40], [41]:

- визначення керуючої сили виконується при швидкості 8 та 10 вузлів натурними випробуваннями. Дозволяється попереднє визначення керуючої сили за методиками, затвердженими Регістром;
- під час проведення натурних випробувань фіксується положення ескортного буксира і ескортованого судна;
- визначається сила натягу буксирного тросу;
- фіксується кут крену буксира;
- вимірюється довжина буксирного тросу та кут відхилення буксирного тросу від ДП ескортованого судна;
- час переходу буксира з одного крайнього положення при максимальному значенні натягіння буксирного троса в дзеркальне положення, але не більше, ніж 60°;
- визначення крену при раптовій зупинці головного двигуна ескортного буксира

Визначення додаткової керуючої сили, яка потрібна для здійснення ескортного супроводження виконується на підставі вимог IMO 751 10/10 Zig-Zag [48] для операції Зиг-Заг. Залежність потрібної керуючої сили від дедвейту ескортованого судна представлена на рис. 3.13. Рекомендовані значення керуючої сили танкерів при різних кутах перекладки руля і швидкостях руху від 6 до 12 вузлів. Ці дані наведені в табл. 3.3

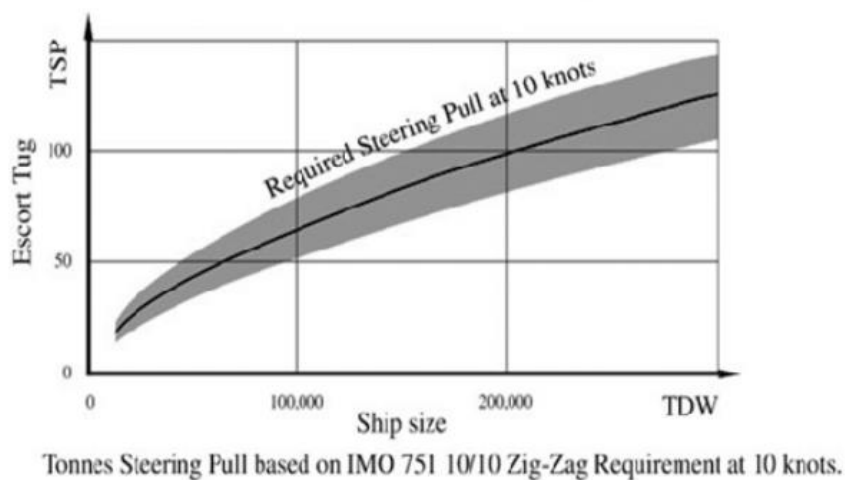
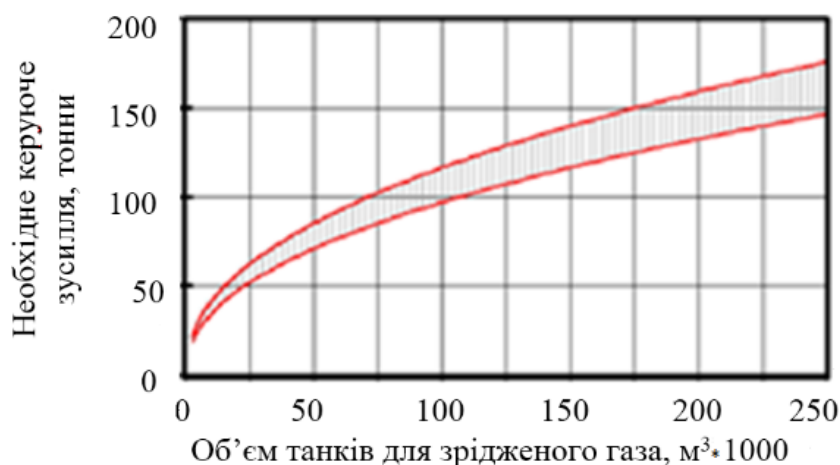


Рисунок 3.13 – Залежність потрібної керуючої сили від дедвейту

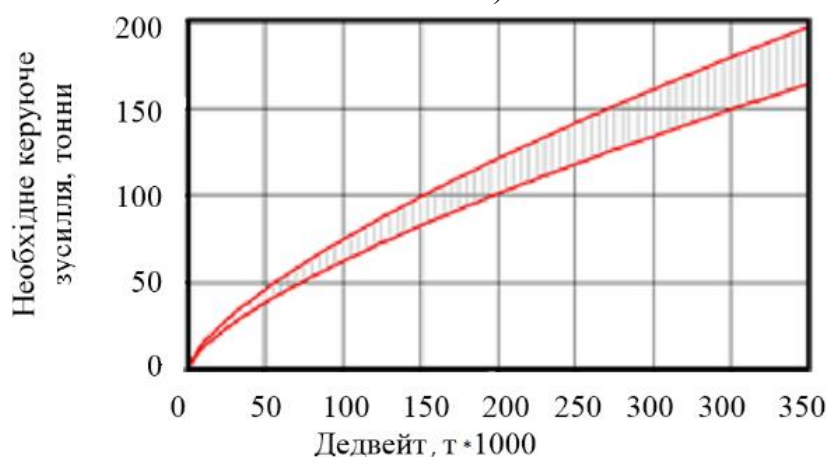
Таблиця 3.3 – Значення керуючої сили танкерів при різних кутах перекладки руля і швидкостях руху від 6 до 12 вузлів

Швидкість танкеру, вуз.	100,000 dwt танкер Кут перекладки руля		200,000 dwt танкер Кут перекладки руля	
	15°	25°	15°	25°
6	30 t	45 t	50 t	60 t
8	55	75	85	115
10	85	120	130	185
12	120	175	190	260

Вимоги ІМО для необхідного керуючого зусилля при ескортванні газозовів та танкерів представлені на рис. 3.14.



а)



б)

Рисунок 3.14 – Вимоги ІМО для необхідного керуючого зусилля ескортного буксира в залежності від об'єму танків та дедвейту, тони
а – залежність для газозовів, б – залежність для танкерів

3.7 Врахування морехідності

Вимоги правил класифікаційних товариств до морехідності буксирів стосуються розрахунку амплітуди хитавиці та її періоду.

Амплітуда хитавиці судна з круглою скулою, град., обчислюється за формулою

$$\Theta_1 = 109kX_1X_2\sqrt{rS},$$

де k – коефіцієнт, що враховує вплив скулових килів і/або брускових килів.

Ескортний буксир має розвинутий скег, який зменшує хитавицю

k – визначається в залежності від $\frac{A_k}{(L_{wl}B)}$,

де A_k – сумарна площа скулових килів або площа бокової проекції брускового килю, м²,

L_{wl} – довжина судна по ватерлінії м,

X_1 – безрозмірний множник, який визначається в залежності від B/d ,

X_2 – безрозмірний множник, який визначається в залежності від C_B ,

r – параметр, який визначається за формулою

$$r = 0,73 + 0,6(z_g - d)/d,$$

S – безрозмірний множник, який визначається в залежності від району плавання та періоду хитавиці T , який розраховується за формулою

$$T = 2cB/\sqrt{h},$$

де $c = 0,373 + 0,023B/d - 0,043L_{wl}/100$;

h – виправлена метацентрична висота, м

L_{wl} – довжина судна по ватерлінії м, B – ширина судна.

Плавність процесів хитавиці буксира на хвилюванні забезпечує виконання вимог до морехідності

$$\tau \geq \tau_{\min},$$

де $\tau_{\min}$ – мінімальне допустиме значення періоду хитавиці, обумовлений необхідністю виконання умов комфорту, с; τ – власний період хитавиці, с.

Висновки з розділу 3

В цьому розділі на основі залежностей теорії корабля та проектування суден вперше створено комплекс математичних моделей інженерних та морехідних якостей ескортного буксира – комплекс навантаження мас, місткості та міцності, плавучості, остійності, непотоплюваності, ходовості, керованості та морехідності, який необхідний для визначення показників ефективності та надійності ескортних та допоміжних операцій буксира.

В основу визначення інженерних та навігаційних властивостей ескортного буксира покладено найбільш ефективну структуру розбиття маси суден на складові SWBS, яка використовується у США та Великобританії на основі відповідних стандартів цих держав. Регресійні залежності цього розбиття отримані на основі статистичного регресійного аналізу масового навантаження буксирів спроектованих та побудованих в Україні.

Особливу увагу при розгляді морехідних якостей ескортного буксира приділено його ходовості. Для цього розроблено метод визначення динамічних та кінематичних характеристик ходовості ескортних буксирів, який створено на основі випробувань їх моделей в дослідному басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Цей метод включає формування регресійних залежностей для сил, безпосередньо діючих на корпусі буксира, визначення сил, що обумовлені роботою гвинто-рульових колонок, та сил, які виникають в буксирному тросі, а також складання системи трансцендентних рівнянь руху буксира при виконанні стаціонарної ескортної операції, формування методу розв'язання цієї системи та створення програмного комплексу EscortTugForces розрахунку діючих сил і кінематичних характеристик ескортного буксира.

Програмний комплекс EscortTugForces, який розроблено по замовленню корпорації TransShip, має схвалення Класифікаційного товариства Російський морський реєстр судноплавства на використання в якості методики, що дозволяє ще при проектуванні буксира визначити його клас без проведення натурних випробувань після побудови проекту.

РОЗДІЛ 4

ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ОПЕРАЦІЙ ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ

4.1 Визначення економічних показників

До економічних показників функціонування ескортного буксира відносять витрати на його створення і експлуатацію B , які в умовах ринкових відносин є випадковими величинами.

У даній роботі витрати на забезпечення життєвого циклу судна розраховуються за формулою:

$$B = B_{\text{пр}} + B_{\text{п}} + B_{\text{э}} + B_{\text{у}},$$

де $B_{\text{пр}}, B_{\text{п}}, B_{\text{э}}, B_{\text{у}}$ – математичне сподівання або інша імовірнісна характеристика витрат на проектування, побудову, експлуатацію і утилізацію відповідно.

4.1.1 Розрахунок вартості проектування і побудови.

Будівельна вартість судна, будучи ціною продукції суднобудівних підприємств, в подальшому виступає як капіталовкладення споживача в розвиток основних фондів виробничого призначення. У загальному вигляді будівельна вартість судна повинна відображати сукупні витрати суспільної праці на його виробництво, включаючи витрати галузі (собівартість) і вартісний еквівалент додаткового продукту. Вже на початковій стадії проектування при виборі головних елементів ескортного буксира дуже важливо встановити вартість побудови кожного варіанту, оскільки вона визначає розміри капіталовкладень і витрати на поточний і середній ремонт, впливає на річні експлуатаційні витрати і інші економічні показники. Будівельна вартість судна може бути визначена різними методами.

У практиці економічних розрахунків вартості проектування і побудови суден на морському транспорті зазвичай використовують один із таких способів:

– визначення будівельної вартості по групах конструктивної розбивки. Зазвичай приймають стандартну розбивку водотоннажності порожнем і встановлюють для кожної групи свої статистичні нормативи;

- укрупнений метод розрахунку будівельної вартості за допомогою розбивки на елементи;
- складання кошторисної калькуляції, в яку включають такі статті витрат, як матеріали, контрагентські поставки, заробітна плата, податки, накладні та інші витрати.

Розрахунок першим методом проводиться на початкових стадіях проектування і при виконанні різноманітних науково-дослідних робіт. Другий метод застосовується при складанні попереднього калькуляції для технічних проектів, а третій – при складанні кошторису по робочих кресленнях.

Метод розрахунку вартості побудови судна по групах конструктивної розбивки [37] є основним наближеним методом. В якості вихідних характеристики приймають масу окремих конструктивних груп судна. Вартість побудови по кожній з груп розбивки визначається на основі даних про масу конструкції і вартості однієї одиниці маси, встановленої за аналогічному або близькому за типом судну. Будівельну вартість судна розраховують за формулою

$$B_{\Pi} = \mu \sum_{i=1}^I W_i q_i$$

де W_i – маса i -го елемента навантаження стосовно прийнятої схеми розбиття по групах ($i = 1, \dots, I$); I – кількість прийнятих конструктивних груп; q_i – питомий норматив вартості одиниці маси i -го розділу навантаження; μ – коефіцієнт, що показує відношення накладних витрат до заробітної плати робітників.

Внаслідок простоти і можливості швидкого визначення будівельної вартості по великій кількості варіантів, цей спосіб широко застосовується при економічних обґрунтуваннях. На перших стадіях проектування, чим більш детальна розбивка судна по групам, тим більш складніший розрахунок, який не забезпечує великої точності результатів. Однак розбивка судна по великих укрупнених групах недостатньо відображає вплив деяких важливих характеристик судна на будівельну вартість.

Однією з формул, що застосовуються в практиці дослідного проєктування, була формула, запропонована Крайовим в роботі [95], для різних типів суден

$$B_{\Pi} = B_{\text{КП}} + B_{\text{ОБ}} + B_{\text{ЭУ}} + B_{\text{Р}},$$

де $B_{\text{КП}}$, $B_{\text{ОБ}}$, $B_{\text{ЭУ}}$, $B_{\text{Р}}$ – вартість укрупненої групи металевий корпус, обладнання, енергетична установка, роботи.

Для більш наближеного визначення вартості побудови суден, коли немає можливості провести диференційований розрахунок навантаження мас по групах конструктивної розбивки, використовують нормативи вартості однієї тони водотоннажності або одиниці потужності головною енергетичною установкою, або різні емпіричні залежності. Серед відомих емпіричних методів найбільше застосування отримали параметричні методи, в яких вартість судна розраховується через його основні параметри.

$$B_{\text{КП}} = W_{\text{КП}} q_{\text{КП}};$$

$$B_{\text{ОБ}} = W_{\text{ОБ}} q_{\text{ОБ}} + W_{\text{СС}} q_{\text{СС}};$$

$$B_{\text{ЭУ}} = W_{\text{ЭУ}} q_{\text{ЭУ}};$$

$$B_{\text{Р}} = B_{\text{ОС}} + B_{\text{НР}} + B_{\text{ОТ}} + B_{\text{ЗП}},$$

де $W_{\text{КП}}$, $W_{\text{ОБ}}$, $W_{\text{СС}}$, $W_{\text{ЭУ}}$ – маси корпусу, обладнання, суднових систем та енергетичної установки судна; $q_{\text{КП}}$, $q_{\text{ОБ}}$, $q_{\text{СС}}$, $q_{\text{ЭУ}}$ – питомі вартості на одиницю маси корпусу, обладнання, суднових систем та енергетичної установки, значення яких в прийнятої моделі вартості є випадковими величинами, що генеруються відповідно до заданих параметрів і типу закону розподілу; $B_{\text{ОС}}$, $B_{\text{НР}}$, $B_{\text{ОТ}}$, $B_{\text{ЗП}}$ – основна зарплата робітників, накладні витрати, відрахування і запас витрат відповідно.

Основна заробітна плата робочих може бути розрахована за наступною формулою

$$B_{\text{ОС}} = t_{\text{Р}} \Delta_{\Pi} q_{\text{ОС}},$$

де Δ_{Π} – водотоннажність судна порожнього; $q_{\text{ОС}} = 1,8\text{--}2,5$ – вартість 1 нормо/години; $t_{\text{Р}}$ – норматив питомої трудомісткості верфі, люд.год./т. Значення

нормативу питомої трудомісткості верфі t_P розраховується за формулою, отриманою за статистичними даними

$$t_P = 495,94 \Delta_{\Pi}^{-0,206}.$$

Залишені складові вартості робіт розраховуються за формулами:

$$B_{HP} = k_{HP} B_{OC};$$

$$B_{OT} = k_{OT} (B_{OC} + B_{HP});$$

$$B_{3\Pi} = k_{3\Pi} (B_{OC} + B_{HP}),$$

а вартість проектування визначається відношенням

$$B_{\Pi P} = k_{\Pi P} B_{\Pi}.$$

Узагальнення наведених способів оцінки вартості проектування та побудови суден, які використовуються на етапі дослідницького проектування досягнуто на основі розробки спеціального параметричного методу визначення вартості суден. Цей метод був розроблений в США для параметричного модулю програмного продукту Product-Oriented Design and Construction Cost Estimation (PODAS Cost Estimation) [38], який в теперішній час широко використовується в суднобудуванні [35], [96]. Основою цього методу є системи розбиття маси судна на складові SWBS, ESWBS та співвідношень оцінки вартості CER, ECER.

Для ескортних буксирів система розбиття судових робіт на складові SWBS, ESWBS визначається регресійними залежностями (3.1)–(3.12), які отримано в результаті обробки статистичних даних масового навантаження існуючих ескортних буксирів, побудованих в Україні.

Системи співвідношень оцінки вартості судових робіт CER, ECER для суднобудівних верфей різних країн, у тому числі для верфей України, наведено в роботі В.О. Некрасова [35].

Результати суміщення систем розбиття судових робіт на складові та оцінки їх вартості для процесів проектування та побудови багатоцільового ескортного буксира водотоннажністю 576 т наведено у таблиці 4.1.

4.1.2 Розрахунок витрат на експлуатацію і утилізацію.

Річні витрати на утримання одного судна розподіляються на дві групи. До першої групи віднесені постійні витрати (вони не залежать від експлуатації), до другої групи – змінні витрати (залежать від характеристик експлуатації)

$$B_{\text{УТ}} = B_{\text{ПЗ}} + B_{\text{ЗЗ}}.$$

До групи постійних затрат $B_{\text{ПЗ}}$ віднесено заробітну плату екіпажу $B_{\text{ЕК}}$, страхування $B_{\text{СТР}}$, витрати на заводський ремонт $B_{\text{РЕ}}$, амортизаційні відрахування $B_{\text{АМ}}$, тобто

$$B_{\text{ПЗ}} = B_{\text{ЕК}} + B_{\text{СТР}} + B_{\text{РЕ}} + B_{\text{АМ}}.$$

До групи змінних затрат – витрати на паливо та масло $B_{\text{ПА}}$, витрати на електроенергію, яка подається з берега $B_{\text{ЕЛ}}$, витрати на витратні матеріали, інструменти $B_{\text{ВМ}}$, інші витрати $B_{\text{ІН}}$, тобто

$$B_{\text{ЗЗ}} = B_{\text{ПА}} + B_{\text{ЕЛ}} + B_{\text{ВМ}} + B_{\text{ІН}}.$$

До витрат на заводський ремонт входять витрати на виконання ремонтних та профілактичних робіт, незалежно від того, виконує ремонтні роботи, завод або екіпаж. Розмір витрат на ремонт залежить від умов експлуатації, розмірів та потужності головного двигуна. Ці витрати визначаються за формулою

$$B_{\text{РЕ}} = q_{\text{РЕ}} B_{\text{П}},$$

де $q_{\text{РЕ}}$ – норматив витрат на виконання поточного ремонту, докування.

Таким же чином інші складові постійних витрат можуть приблизно визначені процентним відношенням від вартості побудови судна

$$B_{\text{ПБ}} = q_{\text{ПБ}} B_{\text{П}}; B_{\text{АМ}} = q_{\text{АМ}} B_{\text{П}},$$

де $q_{\text{ПБ}}$, $q_{\text{АМ}}$ – нормативи витрат – випадкові величини, які генеруються у відповідності до заданих параметрів закону розподілу.

Таблиця 4.1 – Результати використання регресійних залежностей систем ESWBS та ECER при оцінці вартості проектування і побудови багатоцільового ескортного буксира водотоннажністю в повному вантажу 576 т

	Водотоннажність	576 т	Співвідношення вартості (CER)					
I	Найменування розділів SWBS	SWBS, т	CER праці, люд.год./т	Обсяг праці люд. год.	Оплата праці \$/год	Витрати на працю, \$	CER матеріалів, \$/т	Вартість матеріалів, \$
100	Конструкції	272.69	23	6272	15	94078.05	1150	313593.5
200	Пропульсивна установка	78.80	20	1576	15	23640	35000	2758000
300	Електрична установка	3.80	789	2998	15	44973	36000	136800
400	Управління та спостереження	0.72	720	518	15	7776	40000	28800
500	Допоміжні системи	21.21	89	1888	15	28315.35	12000	254520
600	Устаткування і фурнітура	40.38	211	8520	15	127802.7	11000	444180
700	Озброєння	0	0	0	0	0	0	0
	Сума 100-700	417.60						
F	Паливо, вода, екіпаж, постачання, баласт	88.41						
G	Спецобладнання	70.45	89	6270	15	94050.75	11000	774950
	Сума	576.46		28042		420636		4710844
II	Найменування розділів ESWBS і вартості буксира	ESWBS	Співвідношення вартості (ECER)					
	Накладні витрати	100%, 2%				420636		94217
	Прибуток і страхування матеріалів	50%, 4%				210318		188434
	Сума					1051590		4993494
800	Вартість робіт з проектування та планування виробництва верфі	15%				906763		
900	Вартість робіт верфі з побудови, випробувань і передачі буксира замовнику	15%				906763		
	Вартість буксира					7858609		

Заробітна плата екіпажу $B_{ЕК}$ визначається за формулою

$$B_{ЕК} = 12N_{ЕК}q_{ЕК},$$

де $q_{ЕК}$ – середня місячна заробітна плата одного члена екіпажу.

Розрахунок змінних витрат судна виконується в залежності від тривалості періоду експлуатації судна, який визначається погодними умовами району обслуговування і часом сервісного обслуговування. Час обслуговування включає тривалість заводських ремонтів і інтенсивність суднопотоку в районі обслуговування ескортного буксира.

Річний експлуатаційний період $T_{ЕКС}$ – випадкова величина, закон розподілу якої визначається на основі аналізу суднопотоку.

Витрати на паливо та масло

$$B_{ПА} = T_{ЕКС1}N_{Е1}(q_{ПА}r_{ПА1} + q_{МА}r_{МА1}) + (T_{ЕКС} - T_{ЕКС1})N_{Е2}(q_{ПА}r_{ПА2} + q_{МА}r_{МА2}),$$

де $T_{ЕКС1}$ – тривалість експлуатаційного періоду, в якому головний двигун працює на повну потужність; $r_{ПА1}$, $r_{МА1}$ – питомі витрати палива і масла головного двигуна при економічній потужності; $q_{ПА}$, $q_{МА}$ – вартість 1 тони палива і масла – випадкові величини, які генеруються в відповідності із заданими параметрами і типом закону розподілу.

Витрати на електроенергію, яка подається з берега $B_{ЕЛ}$, витрати на витратні матеріали, інструменти $B_{ВМ}$, інші витрати $B_{ІН}$ в моделі визначаються наближено

$$B_{ЕЛ} = q_{ЕЛ}B_{П}; B_{ВМ} = q_{ВМ}B_{П}; B_{ІН} = q_{ІН}B_{П},$$

де $q_{ЕЛ}$, $q_{ВМ}$, $q_{ІН}$ – випадкові величини

Витрати на утилізацію ескортного буксира визначаємо за формулою

$$B_{У} = q_{У}\Delta_{П},$$

де $q_{У} = 220 \div 380$, \$/т. вартість 1 тони водотоннажності порожнем.

4.2 Визначення показників надійності операцій

Виконання багатоцільовим ескортним буксиром основної та допоміжних функціональних операцій створюється комплексом подій $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$, де C_0 – подія виконання основної операції – ескортування судна; C_1 – подія виконання операції супроводу судна по підхідному каналу та акваторії порту, його швартування/відшвартування; C_2 – подія зняття судна з міліні; C_3 – подія буксирування аварійного або неаварійного судна; C_4 – подія гасіння пожеж на аварійних судах і в акваторії порту, C_5 – подія ліквідації розливів нафтопродуктів в акваторії розташування порту. Визначення відповідних ймовірностей виконання цих подій p_0, p_1, p_2, p_3, p_4 та p_5 , тобто – показників надійності функціональних операцій багатоцільового ескортного буксира, розглянуто у розділі 2. Тому показник надійності виконання цим буксиром функціональних операцій в заданому комплексі умов його експлуатації $P(U, X)$, згідно з теоремою множення ймовірностей, буде визначатися за формулою

$$P(U, X) = \prod_{i=0}^5 p_i . \quad (4.1)$$

4.3 Загальний показник ефективності та надійності

Стохастичний характер явищ, які мають місце при проектуванні, побудові та експлуатації ескортних буксирів, враховуються за допомогою використання всіх об'єктів теорії ймовірностей – випадкових подій, величин та функцій. При цьому такі характеристики економічної ефективності ескортного буксира як прибуток $P = I - R$, який може бути отримано від доходів I і витрат R , є випадковими величинами.

При комерційному використанні ескортного буксира основним показником його ефективності є прибуток P від експлуатації певного буксира в складі певного буксирного флоту порту на певному проміжку часу. В цих умовах ескортний буксир працює в команді і результат його комерційної

діяльності обумовлюється результатами діяльності команди. Тобто оптимізація комерційної діяльності ескортного буксира є частиною проблеми оптимізації роботи буксирного флоту порту. Рішення цієї проблеми виходить за рамки даної дисертаційної роботи. В роботі основна увага приділяється визначенню ефективності ескортного буксира при обслуговуванні певного діапазону суден усіх типів, що відвідують морський порт.

В такий постановці задачі визначення ефективності показником ефективності може бути ймовірнісна характеристика випадкової величини витрат R :

$$F_1(U, X) = M[R(U, X)], \quad (4.2)$$

який повинен мінімізуватися, або загальний показник ефективності та надійності, якщо в якості цільової функції оптимізаційної задачі вибору головних елементів буксира використовується критерій мінімуму вартості – максимуму надійності, який також мінімізується:

$$F_2(U, X) = \frac{M[R(U, X)]}{P(U, X)}. \quad (4.3)$$

де $F_2(U, X)$ – показник ефективності та надійності виконання багатоцільовим ескортним буксиром сукупності своїх функціональних операцій;

$M[R(U, X)]$ – ймовірнісна характеристика (середнє значення) вартості проектування, побудови, експлуатації і утилізації ескортного буксира;

$P(U, X)$ – ймовірність виконання буксиром основних функціональних операцій в заданому комплексі умов експлуатації;

U – вектор географічних і кліматичних параметрів зовнішнього середовища і умов технічного завдання;

X – вектор незалежних змінних (головних елементів буксира).

Визначені вище складові витрат на забезпечення життєвого циклу ескортного буксира дозволяють за допомогою виразів (4.1)–(4.3) визначити його економічний показник і загальний показник ефективності та надійності.

При розрахунках за цими формулами термін експлуатації буксира визначається проміжком часу $T = 20 \div 25$ років, після чого припускається, що буксир може бути або списаний, або модернізований.

Показник економічної ефективності (4.2) пропонується для використання в оптимізаційній задачі вибору головних елементів ескортного буксира при мінімумі допоміжних операцій. Наприклад, коли буксир має тільки водяну протипожежну систему гасіння пожеж в акваторії порту. Це буксири відносно малої водотоннажності. Для багатофункціонального буксира потрібно використовувати комплексний показник ефективності і надійності (4.3), при цьому не для усіх допоміжних операцій обов'язково.

Висновки з розділу 4

У розділу розглянуто економічні показники функціонування багатоцільового ескортного буксира та показники надійності функціонування, які зорієнтовано на ефективний розв'язок проблеми обслуговування буксиром суден певного діапазону дедвейту, що відвідують морський порт.

У якості одного з основних показників ефективності такої проблеми функціонування буксира обрано витрати на його створення і експлуатацію. При визначенні витрат на створення буксира – витрат на його проектування та побудову – використані регресійні залежності систем розбиття суднових робіт на складові (SWBS, ESWBS) та співвідношень оцінки вартості цих складових (CER, ECER), що отримані в результаті обробки статистичних даних по побудованих в Україні ескортних буксирах та обробки статистичних даних діяльності суднобудівних верфей України і зарубіжжя. При визначенні витрат на експлуатацію ескортного буксира за призначенням використані аналогічні регресійні залежності мас розхідних матеріалів для виконання функціональних операцій за призначенням і вартості цих матеріалів, а також вартості відповідних експлуатаційних робіт.

Це дозволило сформулювати комплекс показників ефективності та надійності функціонування багатоцільового ескортного буксира, що потрібен для формування та розв'язку оптимізаційної задачі вибору його головних елементів для ефективного обслуговування в складі флоту портових буксирів тих суден певного діапазону дедвейту, що відвідують цей порт.

При цьому показник економічної ефективності у вигляді витрат (4.2) пропонується для використання в оптимізаційній задачі вибору головних елементів ескортного буксира при мінімумі допоміжних операцій. Наприклад, тоді, коли буксир має тільки одну допоміжну систему – водяну протипожежну систему гасіння пожеж в акваторії порту. Для багатофункціонального буксира значно більшої водотоннажності та більших можливостей потрібно використовувати в оптимізаційній задачі комплексний показник ефективності і надійності (4.3), при цьому не для усіх допоміжних операцій відразу.

РОЗДІЛ 5

ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ ГОЛОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ

5.1 Вибір цільової функції задачі оптимізації

В якості цільової функції задачі оптимізації головних елементів судна зазвичай використовуються показники ефективності та надійності. Визначення таких показників для багатоцільового ескортного буксира є складною задачею, оскільки необхідно охопити всі фактори, які максимально сприяють ефективності проектного рішення. Обґрунтування оптимальності рішення проходить через три рівня показників судна: технічних, експлуатаційних (або експлуатаційно-технічних) і економічних (або техніко-економічних).

При визначенні головних елементів суден, користуються різними показниками в залежності від етапу роботи над проектом. При цьому пріоритет належить технічними показниками, які характеризують масу, розміри суден, їх остійність, непотоплюваність, ходовість, маневреність та інші характеристики та якості.

Ці показники розглядаються ізольовано або в якійсь комбінації, можуть бути абсолютними або відносними, розмірними або безрозмірними. Всі вони служать лише для відбору суден – претендентів з метою подальшої оптимізації проектного рішення. В результаті аналізу технічних показників необхідно обґрунтувати раціональні межі їх зміни у проектуваного судна, оцінити значення деяких вимірників і питомих показників.

У другу чергу розглядаються експлуатаційні показники, які знаходять широке застосування при оцінці варіантів суден. По перше, вони є основою, на якій базуються розрахунки економічних показників. По друге, експлуатаційні показники визначаються з тією ж точністю, що і технічні, чого не можна сказати про показники, пов'язані з грошовими одиницями виміру. По-третє, без експлуатаційних показників неможливо обговорювати

перспективи використання майбутнього судна з експертами морського флоту та експлуатаційниками.

Таким чином, і технічні і експлуатаційні показники необхідні в процесі обґрунтування проекту судна, але жоден з них і ніяка комбінація цих показників не може служити єдиним критерієм, який гарантує ресурсну оптимальність прийнятого рішення. Технічна досконалість судна це лише засіб досягнення його економічної ефективності.

Формалізувати це положення можна по-різному, що в умовах ринкової економіки цілком зрозуміло. Як правило, для комерційних суден, таким показником може бути лише економічний показник, обов'язково пов'язаний з прибутком майбутнього судна.

Для ескортних буксирів обчислення прибутку на перспективу є суттєво важкою проте ж навіть неможливою операцією, оскільки при використанні їх за своїм прямим призначенням не тільки частина доходів, що самостійно одержуються ескортним буксиром, але і їх загальне отримання залежать від випадкових обставин його функціонування в складі флоту портових буксирів як в роботі з групою буксирів.

В цьому випадку необхідно вибрати оптимальну вартість або найвищу ефективність виконання буксирним флотом порту поставлених задач обслуговування потоку суден, що відвідують морський порт, за критерієм типу "вартість – ефективність" [34], [97–99].

Існують три основні форми критерію цього типу. Перша форма передбачає досягнення максимуму ефективності виконання судном задач функціонування при заданій витраті ресурсів. Вона формулюється за принципом максимізації ефективності

$$\Pi_E = \max E\Phi(X, U),$$

$$B(X, U) \leq B^*.$$

Друга форма – це принцип мінімізації витрат ресурсів при обов'язковому досягненні заданого рівня ефективності

$$\Pi_E = \min B(X, U) ;$$

$$E\Phi(X, U) \geq E\Phi^* ,$$

де $E\Phi(X, U)$ – оціночні функції ефективності виконання портовим флотом задач функціонування і витрат ресурсів відповідно; $B(X, U)$, – задані рівні ефективності і витрат.

Слід зазначити, що дані форми критеріїв ефективності мають один недолік – необхідність знаходити абсолютне значення корисного ефекту, або витрат, що на ранніх стадіях проектування ескортного буксира виконати неможливо. Тому при виборі оптимального складу портового флоту широко використовують третю форму критерію типу "вартість – ефективність", яка являє собою співвідношення витрат до корисного ефекту

$$\Pi_E = \frac{B(X, U)}{E\Phi(X, U)} ,$$

або навпаки, корисного ефекту до відповідних витрат

$$\Pi_E = \frac{E\Phi(X, U)}{B(X, U)} .$$

Очевидно, що в першому випадку це співвідношення треба мінімізувати, а в другому – максимізувати.

При побудові критерію оптимальності необхідно дотримуватися вимог, яким він повинен задовольняти. Критерій повинен характеризувати ступінь досягнення поставленої перед портовим флотом мети і залежати від факторів, які впливають на нього. Він повинен відображати можливість врахування обмежень. Також повинно мати місце відображення всіх можливих способів досягнення мети, можливість аналізу самого критерію ефективності, визначення факторів, які найбільшою мірою впливають на нього. Нарешті, повинна бути реалізованої сама процедура проведення оптимізації. Для цього критерій оптимальності повинен мати незалежні змінні, бути функцією основних характеристик судна і режимів його експлуатації, бути кількісним і

однозначним, тобто кожному вектору значень незалежних змінних має відповідати одне значення критерію оптимальності.

Що стосується одного судна та формування його оптимізаційної задачі в детермінованій постановці перерахованим вимогам відповідає більша частина технічних, експлуатаційних і економічних показників, що включають вартість створення і експлуатації судна. Однак в стохастичній постановці, внаслідок наявності елементів випадковості і невизначеності, кожному набору незалежних змінних може відповідати не одне значення, а цілий розподіл значень показників. Більш того, при розгляданні декількох моделей, варіанти суден, які порівнюються, можуть мати різні розподіли ймовірностей показника ефективності. Тому при вирішенні задачі оптимізації головних елементів ескортних буксирів в стохастичній постановці необхідно звертати увагу на такі проблеми:

- в якій формі потрібно представляти математичний опис критерію ефективності;
- як робити вибір оптимальних характеристик судна в тих випадках, коли закони розподілу цільової функції, отримані для декількох варіантів проектних рішень, стають різними.

У даній роботі задача визначення показника економічної ефективності ескортного буксира вирішується із застосуванням методів перетворення законів розподілу вартості складових його створення і експлуатації в закон розподілу підсумкової вартості. При цьому, якщо розглядаються різні моделі економічної поведінки судна, то порівняння варіантів ескортних буксирів з різними розподілами показника ефективності $F(U, X)$ потрібно проводити за допомогою введення спеціальних критеріїв, які застосовуються в теорії ризику [99]:

- комбінації математичного сподівання $M(F(U, X))$ і середньоквадратичного відхилення $\sigma(F(U, X))$ показника ефективності судна $F(U, X)$ ("очікуване значення – середньоквадратичне відхилення");

- ймовірності перевищення показником ефективності деякого заданого значення (нормативу) β – забезпеченості β ;
- заданого рівня ймовірності неперевикнення α значення показника ефективності $F(U, X)$.

В якості обґрунтування першого критерію використовується ідея співставлення математичного сподівання і середньоквадратичного відхилення. При цьому, якщо показник ефективності потрібно мінімізувати, то цей критерій розраховується наступним чином:

$$F_1(U, X) = M[F(U, X)] + P^{-1}\sigma[F(U, X)] \rightarrow \min.$$

Аналогічно, якщо показник ефективності потрібно максимізувати, то перший критерій визначається за формулою

$$F_2(U, X) = M[F(U, X)] - P^{-1}\sigma[F(U, X)] \rightarrow \max,$$

де P^{-1} – число, яке визначається за допомогою табульованої функції розподілу α -процентилей нормованого показника ефективності.

Наприклад, при розподілі показника ефективності за нормальним законом, коефіцієнт P^{-1} може приймати такі значення:

$$\alpha = 0,05 (5\%) \rightarrow |P^{-1}| = 1,64;$$

$$\alpha = 0,005 (0,5\%) \rightarrow |P^{-1}| = 2,58.$$

Другий тип критерію оптимізації представляється у вигляді максимуму ймовірності того, що критерій ефективності прийме значення більше β

$$F_3(U, X) = P[F(U, X) > \beta] = \int_{\beta}^{\infty} p(F(U, X))dF(U, X) \rightarrow \max,$$

де β – нормативна задана величина; $p(F(U, X))$ – щільність ймовірності показника ефективності.

Для ескортного буксира в якості рівня витрат β можна приймати математичне сподівання показника економічної ефективності (4.2) для вже побудованих буксирів.

5.2 Формулювання оптимізаційної задачі вибору головних елементів ескортного буксира

Формулювання цієї задачі для ескортного буксира, який орієнтований на ефективне обслуговування суден певного діапазону водотоннажностей, складається з використання у якості цільових функцій показників економічної ефективності і надійності (4.2)–(4.3) при обмеженнях на ресурси процесів створення і експлуатації та характеристики інженерних і навігаційних якостей буксира, які забезпечують надійність його експлуатації відповідно вимогам класифікаційного товариства.

Тому задача оптимізації головних елементів ескортного буксира представляється у наступному вигляді:

Треба знайти мінімум цільової функції

$$F_j(U, X) \rightarrow \min \quad (5.1)$$

при наявності обмежень:

$$E_n(X) \geq 0, \quad n = 1, 2, 3; \quad (5.2)$$

$$F_k(X) \geq [F_k], \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad (5.3)$$

$$PC_l[Pt] \leq [PC_l], \quad l = 1, 2, \dots, L; \quad (5.4)$$

$$X \leq X_q, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \quad (5.5)$$

де $E_n(X) \geq 0$ – обмеження, що забезпечують необхідний рівень ефективності буксира (рівняння і нерівності плавучості, місткості і ходовості);

$F_k(X) \geq [F_k]$ – обмеження надійності – показники безвідмовного виконання функціональних операцій, пов'язаних з реалізацією таких морехідних якостей як остійність, керованість і мореплавність буксира;

$[F_k]$ – нормативні значення цих показників, які регламентуються класифікаційними товариствами та стандартами;

$PC_l[Pt] \leq [PC_l]$ – функціональні обмеження фінансових коштів на забезпечення проектування, побудови та експлуатації буксира, а також компенсації спричинених ним збитків;

$[PC_l]$ – граничні значення цих коштів;

U – вектор географічних і кліматичних параметрів зовнішнього середовища і умов технічного завдання;

X – вектор незалежних змінних (головних елементів буксира);

X_q – вектор обмежень на незалежні змінні.

До складових вектору географічних і кліматичних параметрів зовнішнього середовища, а також умов технічного завдання концептуального проектування ескортного буксира включаються такі величини: тип і кількість головних двигунів, тип і склад спеціального обладнання, чисельність екіпажу $N_{ЕК}$, автономність плавання N_{AB} , район плавання з його погодними умовами, швидкість ескортування, морехідність. Значення цих величин вважаються або заданими замовником, або приймаються на основі ретельного вивчення і аналізу сучасного стану та тенденцій при експлуатації ескортного буксира в заданому районі експлуатації. За характером опису величин, що задаються, компоненти вектору U можуть бути як детермінованими, так і випадковими величинами.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що вибір критерію оптимізації повинен здійснювати або замовник, або проєктант, і максимально погоджувати його зі специфікою задачі і метою призначення буксира.

5.3 Незалежні змінні і обмеження задачі оптимізації

Загальна постановка оптимізаційної задачі проектування ескортного буксира здійснена за допомогою формул (5.1)–(5.5). У даному підрозділі цим формулам надається подальше розкриття.

Відносно незалежних змінних – це такі характеристики буксира, оптимальні значення яких потрібно визначити.

Обмеження формують допустимі значення незалежних змінних та їх функцій, які можуть бути відповідно тривіальними та функціональними [29], [100]. Тривіальні обмеження задають граничні значення незалежних змінних. Функціональні обмеження – це вимоги до інженерних і навігаційних якостей

буксира (місткості, міцності, остійності, непотоплюваності, ходовості і т.д.), та вимоги середовища експлуатації, які задані функціями векторів X та U .

За незалежні змінні оптимізаційної задачі концептуального проектування ескортного буксира приймаються наступні параметри:

$x_1 = L$ – довжина буксира;

$x_2 = B$ – ширина буксира;

$x_3 = d$ – осадка буксира;

$x_4 = D$ – висота борту буксира;

$x_5 = C_B$ – коефіцієнт загальної повноти;

$x_6 = N_E$ – потужність головного двигуна;

$x_7 = H_S$ – висота скега;

$x_8 = C_{BS}$ – коефіцієнт загальної повноти скега.

Множення цих змінних утворює вектор $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, на компоненти якого накладаються двосторонні тривіальні обмеження типу

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad (i = 1, \dots, n),$$

де $n = 8$ – кількість незалежних змінних, що використовуються в даній роботі (див. табл. 1).

Таблиця 5.1 – Допустимі значення незалежних змінних

Назва незалежної змінної	Позначення	Нижня границя $(x_i)_{\min}$	Верхня границя $(x_i)_{\max}$
Довжина судна, м	x_1	22	40
Ширина судна, м	x_2	9	15
Осадка судна, м	x_3	2	6
Висота борту, м	x_4	3,5	8
Коефіцієнт загальної повноти	x_5	0,45	0,6
Потужність головних двигунів, кВт	x_6	2500	8200
Висота скега, м	x_7	0,5	2
Коефіцієнт загальної повноти скега	x_8	0,4	0,9

Розглянуті в таблиці 5.1 двосторонні обмеження замінюються односторонніми тривіальними обмеженнями:

$$x_i - (x_i)_{\min} \geq 0; \quad (x_i)_{\max} - x_i \geq 0.$$

Тривіальні обмеження визначаються вимогами до незалежних змінних оптимізаційної задачі. В даному випадку такими вимогами є:

– вимога до довжини судна

$$L \leq L_{\max},$$

де $L_{\max}$ – максимально допустима довжина судна з умов побудови та характеристик району обслуговування, м;

– вимога до ширини судна

$$B \leq B_{\max},$$

де $B_{\max}$ – максимально допустима ширина судна з умов побудови та характеристик району обслуговування, м

– вимога до осадки судна

$$d \leq d_{\max},$$

де $d_{\max}$ – максимально допустима осадка судна з умов побудови та характеристик району обслуговування, м;

– вимога до висоти борту судна

$$D \leq D_{\max},$$

де $D_{\max}$ – максимально допустима висота борту судна з умов побудови та характеристик району обслуговування, м;

– вимога до коефіцієнта загальної повноти судна

$$C_B \leq C_{B\max},$$

де $C_{B\max}$ – максимально допустимий коефіцієнт загальної повноти судна з умов побудови та характеристик району обслуговування;

– вимога до потужності головного двигуна судна

$$N_E \leq N_{E\max},$$

де $N_{E\max}$ – максимально допустима потужність головного двигуна судна з умов побудови та характеристик району обслуговування, кВт;

– вимога до висоти скега судна

$$H_S \leq H_{S\max},$$

де H_{Smax} – максимально допустима висота скега судна з умов побудови та характеристик району обслуговування, м;

– вимога до коефіцієнта загальної повноти скега судна

$$C_{BS} \leq C_{BSmax},$$

де C_{BSmax} – максимально допустимий коефіцієнт загальної повноти скега судна з умов побудови та характеристик району обслуговування.

Крім цих вимог існують вимоги до якостей проектуваного судна, які обумовлюють його ефективність і безпеку плавання. Ці вимоги формують основні функціональні обмеження оптимізаційної задачі.

До основних функціональних обмежень даної задачі відносяться:

– рівняння плавучості

$$\Delta = \sum W_i,$$

де Δ – водотоннажність судна, т; W_i – складові навантаження, т;

– співвідношення початкової остійності, яке встановлюється за допомогою нормативної вимоги до нижньої границі відносної поперечної метацентричної висоти

$$\bar{h} \geq \bar{h}_{min},$$

де $\bar{h}$ – фактичне значення відносної поперечної метацентричної висоти, $\bar{h}_{min}$ – мінімальне допустиме значення відносної поперечної метацентричної висоти;

– критерій остійності при ривку буксирного троса в процесі виконання операцій ескортування визначається за формулою (3.9) та рис. 3.10

$$K_3 = \sqrt{\frac{b+c}{a+c}} \geq 1,0,$$

де a – площа, обмежена кривою $l(\Theta)$ відновлюваних плечей діаграми статичної остійності, горизонтальною прямою, що відповідає кренувальному плечу $(l+l_h)$, і кутом крену, який дорівнює $\Theta_l - \Theta_{2r}$;

b – площа, обмежена зверху кривою $l(\Theta)$ відновлювальних плечей діаграми статичної остійності, знизу – горизонтальною прямою, що відповідає

кренувальному плечу $(l+l_h)$, праворуч – кутом максимуму діаграми статичної остійності Θ_{max} або кута заливання Θ_f залежно від того, який з них менший;
 c – площа, обмежена ліворуч кривою $l(\Theta)$ відновлювальних плечей діаграми статичної остійності, зверху – горизонтальною прямою, що відповідає кренувальному плечу $(l+l_h)$, праворуч - кутом максимуму діаграми статичної остійності Θ_{max} або кута заливання Θ_f залежно від того, який з них менший.

Кренувальне плече l_h , м, що характеризує дію умовного ривка тросу, визначається за формулою (3.7.4.4-2) [40]:

$$l_h = 0,2 \left(1 + 2 \frac{d}{B} \right) \frac{b^2}{(1+c^2)(1+c^2+b^2)} \frac{57,3}{(\Theta_{2r} - \Theta_l + \Theta_{lim})}, \quad (3.10)$$

де d – осадка буксира; B – ширина буксира; коефіцієнти c, b, a, e визначаються за формулами (3.11);

Вимоги для ескортних буксирів, закладених, або в стадії побудови з 1.01.2020 року або після цієї дати, зайнятих буксируванням в порту, прибережним або морським буксируванням або ескортними операціями:

– плече кренувального моменту HL_Θ , м, як функція від кута крену Θ повинне бути обчислене за формулою (3.12)

$$HL_\Theta = \frac{B_p C_T (h \cos \Theta - r \sin \Theta)}{g \Delta}.$$

– для суден, зайнятих ескортними операціями, при врахуванні плеча кренувального моменту, повинні виконуватися такі критерії (див. рис.3.3, 3.4)

$$A \geq 1,25 \cdot B; \quad C \geq 1,40 \cdot D; \quad \Theta_e \leq 15^\circ,$$

де A – площа під кривою відновлюваних плечей, виміряна від кута крену Θ_e до кута крену 20 градусів (див. рис. 3. 3);

B – площа під кривою плеча кренувального моменту, виміряна від кута крену θ_e до кута крену 20 градусів (див. рис. 3. 3);

C – площа під кривою відновлюваних плечей, виміряна від нульового крену ($\theta = 0^\circ$) до кута крену Θ_d (див. рис. 3. 4);

D – площа під кривою плеча кренувального моменту, виміряна від нульового крену ($\theta = 0^\circ$) до кута крену θ_d (див. рис. 3. 4);

θ_e – кут крену рівноваги, який відповідає першому перетину між кривою плеча кренувального моменту і кривою відновлюваних плечей;

θ_d – кут крену, який відповідає другому перетину між кривою плеча кренувального моменту і кривою відновлюваних плечей або куту заливання або 40 градусам, зважаючи на те, що менше;

– обмеження значень параметрів діаграми статичної остійності:

$$l_{\max} \geq 0,25; \theta_{l_{\max}} \geq 30; \theta_{\text{зак}} \geq 60,$$

де $l_{\max}$ – максимальне плече діаграми статичної остійності, м; $\theta_{l_{\max}}$ – кут, відповідний $l_{\max}$, град.; $\theta_{\text{зак}}$ – кут закату діаграми статичної остійності, град;

– обмеження, викликані недоліками керованості супроводжуваного судна, які обумовлені необхідністю виконання вимог класифікаційних товариств до ескортних буксирів, вводяться у вигляді залежностей, представлених на рис. 3.11;

– відношення плавності процесів хитавиці буксира на хвилюванні, що забезпечує виконання вимог до його морехідності:

$$\tau \geq \tau_{\min},$$

де $\tau_{\min}$ – мінімально допустиме значення періоду хитавиці, обумовлене виконанням умов комфорту, с., τ – власний період хитавиці судна, с.

Всі перераховані вище функціональні обмеження зручно представити односторонніми нерівностями виду, $g_j(X, U) \geq 0$. Для цього використовується одна з наступних формул:

$$g_j(X, U) = \frac{A_j}{a_j(X)} - 1, \text{ при } a_j(X) \leq A_j;$$

$$g_j(X, U) = \frac{a_j(X)}{A_j} - 1, \text{ при } a_j(X) \geq A_j,$$

де $a_j(X)$ – значення характеристики судна, отримане в результаті розрахунків.

У даній роботі система обмежень, що формує допустиму область пошуку розв'язання оптимізаційної задачі визначення основних характеристик ескортного буксира, включає 39 нерівностей.

5.4 Метод розв'язку задачі оптимізації головних елементів

Рішення сформульованої оптимізаційної задачі (5.1)–(5.5) реалізується блоком оптимізації, який здійснює його за допомогою відомого методу нелінійного програмування – методу Пауелла, тобто – методу пошуку мінімуму цільової функції (5.1), при цьому вплив функціональних і тривіальних обмежень (5.2)–(5.5) на результат пошуку враховуються за допомогою методу штрафних функцій [101].

5.5 Алгоритм задачі визначення головних елементів

Схема алгоритму розв'язання оптимізаційної задачі вибору головних елементів ескортного буксира на етапі його дослідницького проектування представлена на рис. 5.1 [23].

У відповідності до цієї схеми в процесі пошуку оптимального проектного рішення ескортний буксир виконує ряд «занурень» на час свого життя в задане середовище, що характеризується географічною областю розташування порту, її погодними умовами і заданим потоком обслугованих суден.

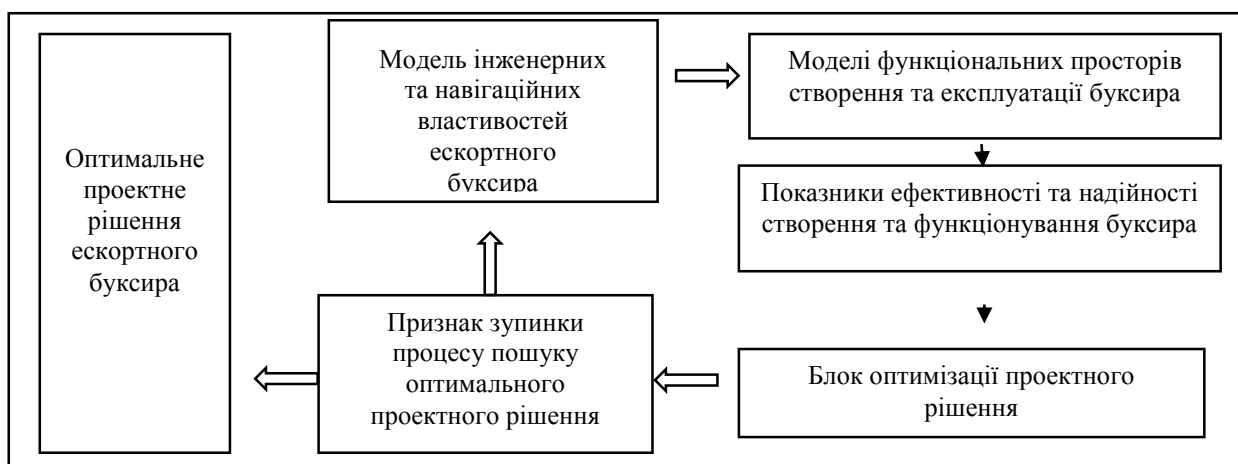


Рисунок 5.1 – Блок-схема алгоритму пошуку оптимального розв'язку задачі синтезу ескортного буксира для умов його експлуатації

При кожному зануренні за допомогою імітаційного моделювання реалізуються основні операції функціонування буксира і за показниками ефективності і надійності визначаються рівні його адаптації до середовища, в якому знаходиться буксир, тобто рівні ефективності і надійності виконання буксиром основної сукупності функціональних операцій [23].

В блоці оптимізації значення ефективності і надійності варіантів проектних рішень, що розглядаються при зануреннях, порівнюється і на цій основі вибирається найкоротший напрямок руху до основної цілі оптимізації – буксира найбільшої ефективності і надійності.

Процес пошуку проектного рішення завершується після задовольняння вимог критерія оптимізації – знаходження або екстремального значення показника економічної ефективності (4.2) або комплексного показника економічної ефективності і надійності (4.3). При цьому кожний етап пошуку представляє перетворення імовірнісних характеристик випадкових величин, відображаючих стохастичність природи цін на комплектуючі при створенні та експлуатації буксира, на складові його операційних витрат, змінність погодних факторів експлуатації, стохастичність потоку обслуговуваних суден, варіативний характер нормативних вимог і т.д., в імовірнісні характеристики підсумку операцій – в оптимізаційне значення цільової функції, яке визначає екстремальні значення вартості та значення імовірності виконання функціональних операцій.

Припускається, що при переходах розгляданих випадкових величин до різних своїх значень, розділених часовими інтервалами побудови і експлуатації, ці значення утворюються відповідними перетинами безперервних марківських процесів.

На основі вказаного алгоритму розв'язку оптимізаційної задачі вибору головних елементів ескортного буксира розроблено програмний комплекс процесу розв'язання оптимізаційної задачі, який складено на мові програмування Pascal в середовищі Visual Pascal. Інтерфейс цього програмного комплексу представлений на рис. 5.2–5.16 [23].

The dialog box 'Исходные данные' has two tabs: 'Основная часть задания на проектирование' (selected) and 'Обеспечение вспомогательных операций'. The first tab contains the following fields:

Parameter	Value
Автономность, сутки	10.0
Экипаж, чел	10
Скорость эскорта, узлы	10.0
Мореходность, баллы	6
Тип двигателя	☐ среднеоборотный ☒ высокооборотный
Количество двигателей	2

Buttons: OK, Отмена

Рисунок 5.2 – Вікно завдання на проектування

The dialog box 'Исходные данные' has two tabs: 'Основная часть задания на проектирование' and 'Обеспечение вспомогательных операций' (selected). The second tab contains the following fields:

Parameter	Value
Количество водяных лафетных стволов	2
Расход воды через пожарный ствол (л/с)	1000.0
Количество пенных лафетных стволов	2
Расход пены через пенный пожарный ствол (л/с)	1000.0
Протяженность бонового ограждения (м)	1000.0
Количество насосов удаления нефтяного пятна	2
Производительность насоса удаления нефтяного пятна (л/с)	1000.0

Buttons: OK, Отмена

Рисунок 5.3 – Спецобладнання для допоміжних операцій гасіння пожеж та ліквідації розливів нафти

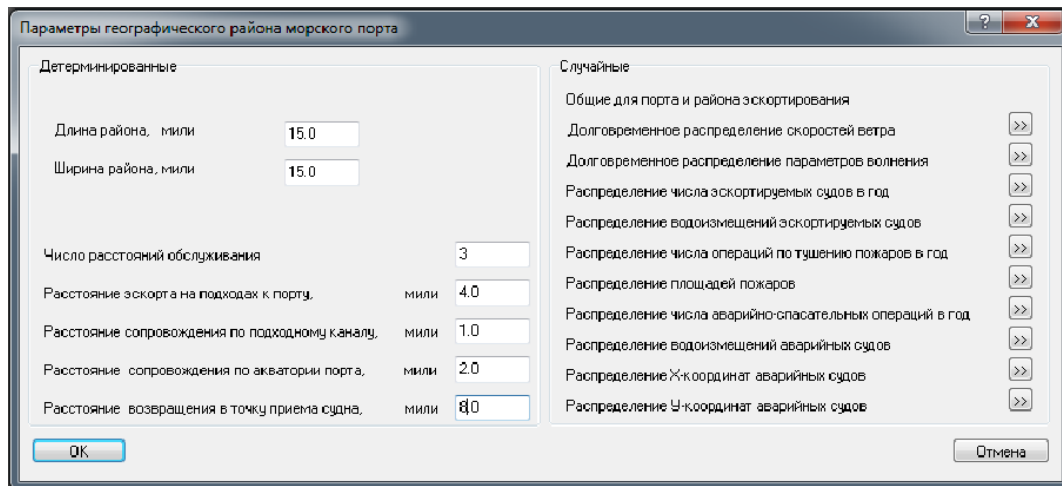


Рисунок 5.4 – Параметри географічного району порту обслуговування, його погодних умов, потоку суден, який потребує ескортування, кількості і розмірів пожеж, кількості рятувальних операцій і розмірів аварійних суден, та їх позицій в районі розташування порту

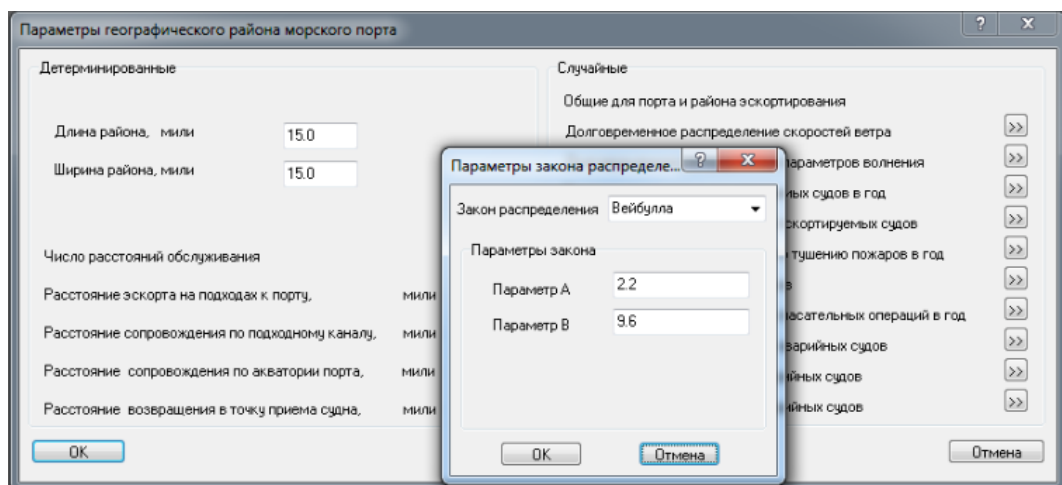


Рисунок 5.5 – Довготривалий розподіл швидкостей вітру

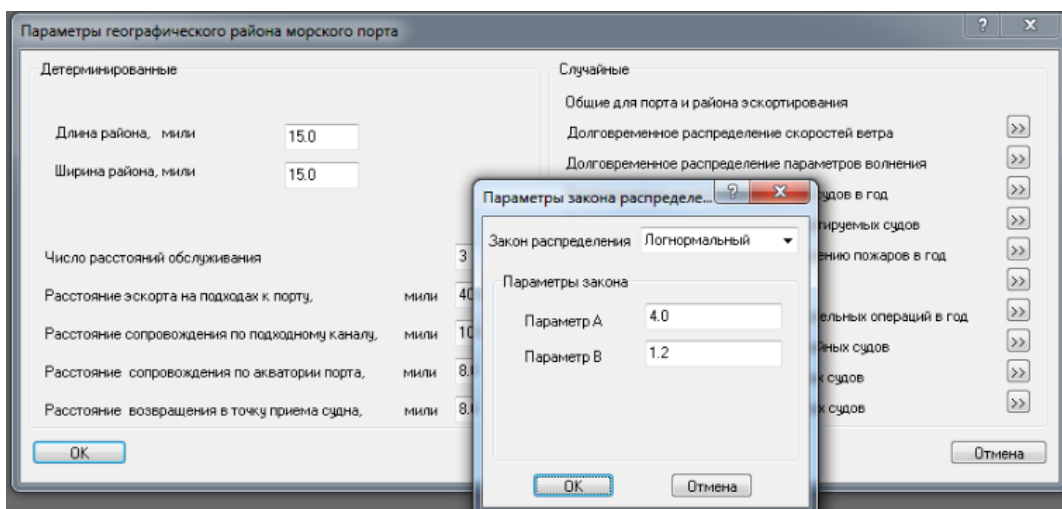


Рисунок 5.6 – Довготривалий розподіл параметрів хвилювання

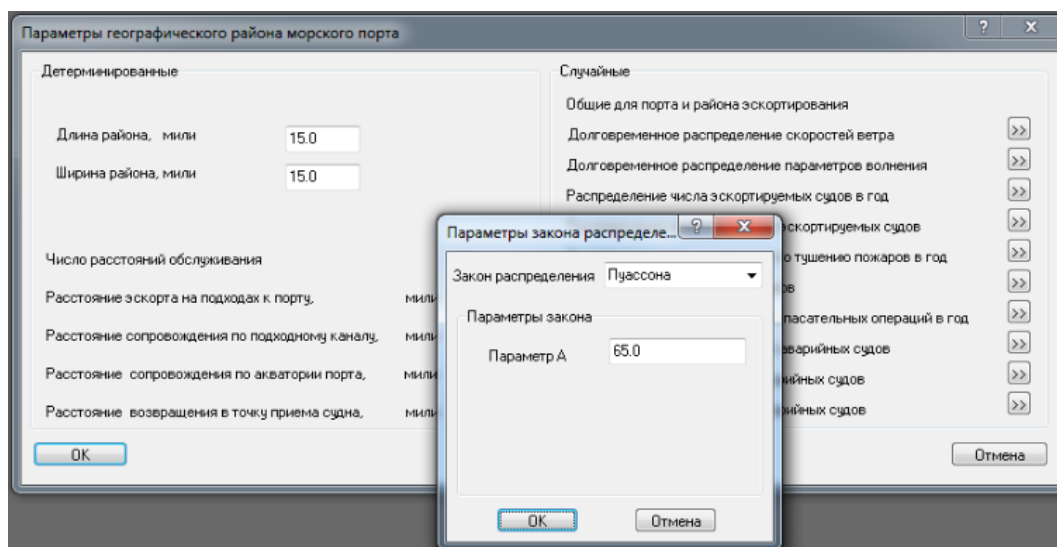


Рисунок 5.7 – Розподіл кількості ескортованих суден

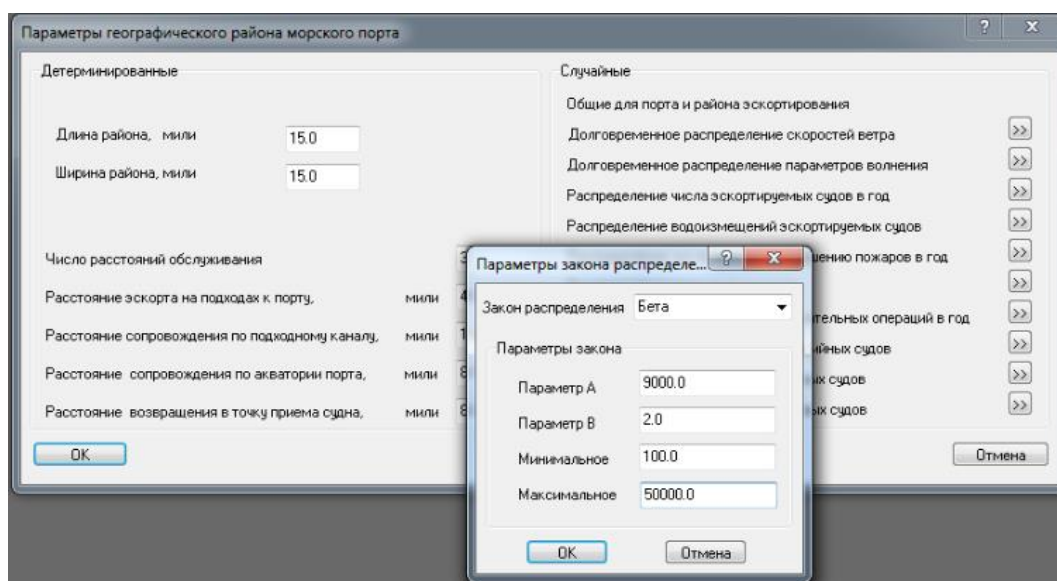


Рисунок 5.8 – Розподіл водотоннажності ескортованих суден

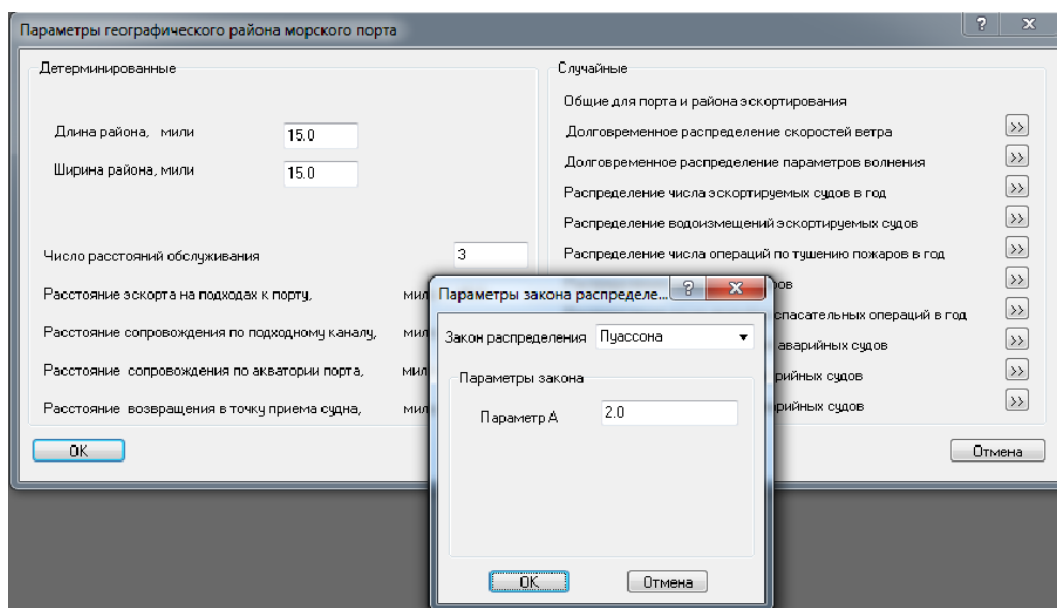


Рисунок 5.9 – Розподіл кількості операцій по гасінню пожеж

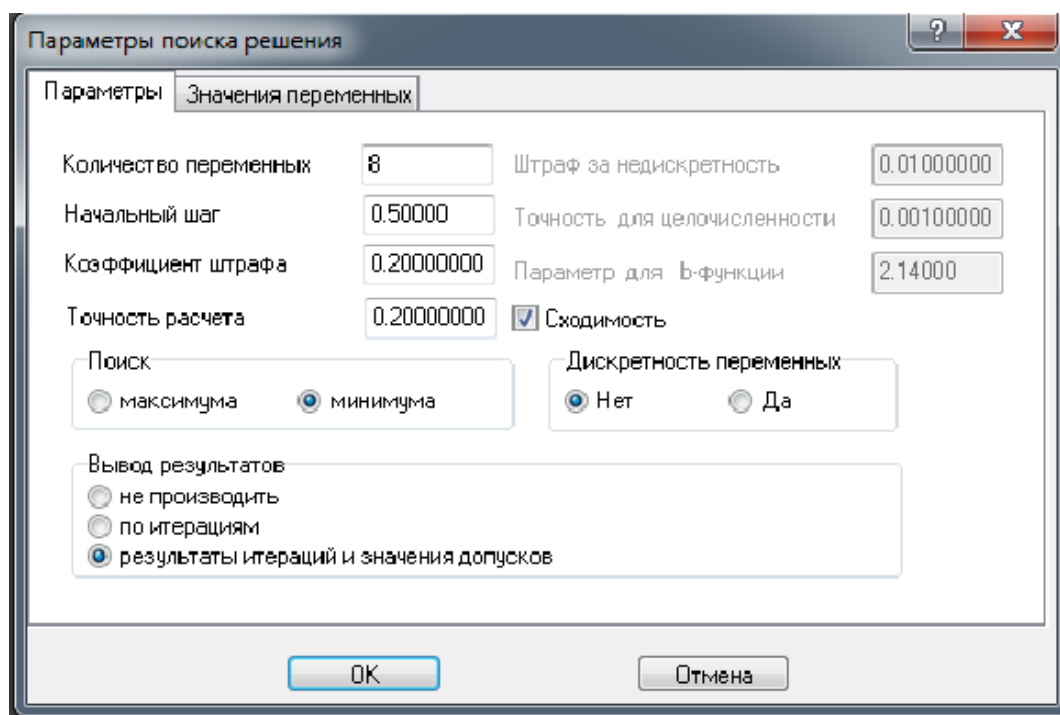


Рисунок 5.10 – Параметри пошуку рішення трансцендентних рівнянь руху буксира за судном, що ескортується

Параметры поиска решения

Параметры Значения переменных

Наименование	Начальные	Ожидаемые
Длина L, м - X1	34.000	34.000
Ширина B, м - X2	12.000	12.000
Осадка T, м - X3	4.000	4.000
Высота борта H, м - X4	5.000	5.000
Коэффициент общей полноты Cb - X5	0.600	0.600
Мощность энергетической установки Ne, кВт - X6	2800.000	2800.000
Высота скега sH, м - X7	0.940	0.940
Коэффициент общей полноты скега sCb - X8	0.400	0.400

OK Отмена

Рисунок 5.11 – Вікно керування рішенням оптимізаційної задачі

Параметры поиска решения

Параметры Значения переменных

Наименование	Начальные	Ожидаемые
Усилие буксирного троса Rb, тонны - X1	35.000	70.000
Угол дрейфа буксира Beta, град - X2	80.000	80.000
Угол перекладки BPK Delta, град - X3	90.000	90.000

OK Отмена

Рисунок 5.12 – Вікно керування рішенням рівнянь руху буксира

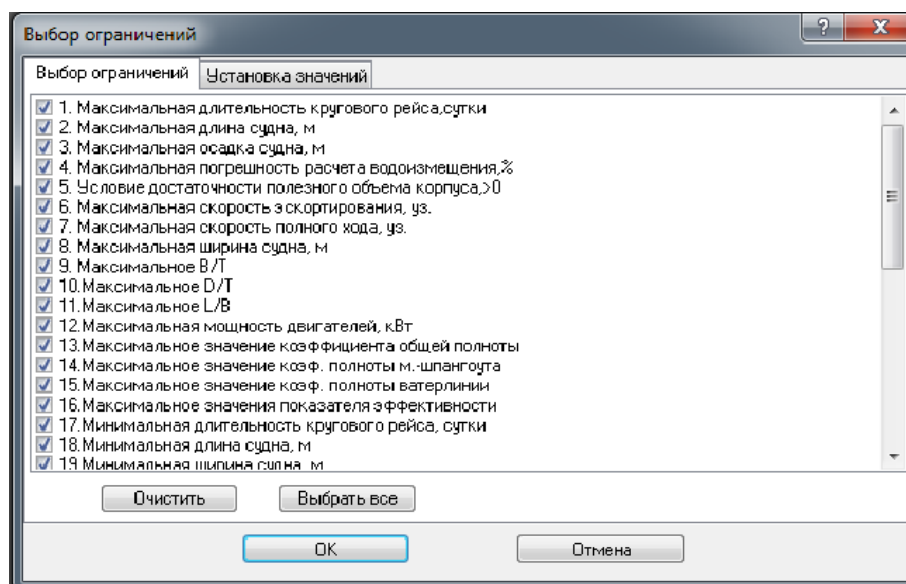


Рисунок 5.13 – Вікно вибору обмежень

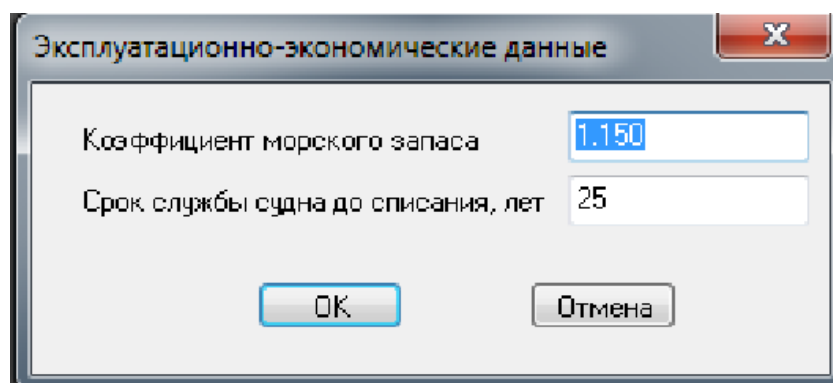


Рисунок 5.14 – Вікно експлуатаційно-економічних даних

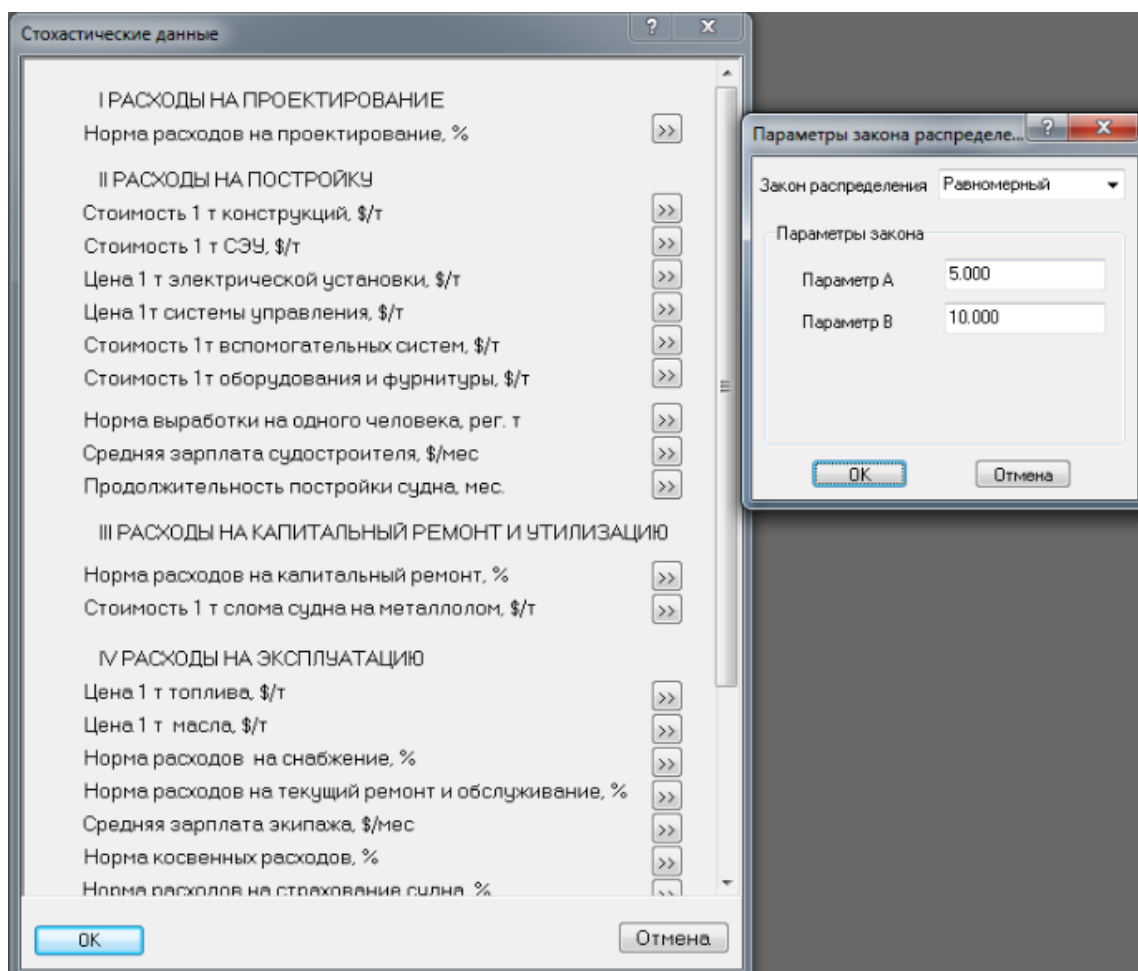


Рисунок 5.15 – Стохастичні дані витрат

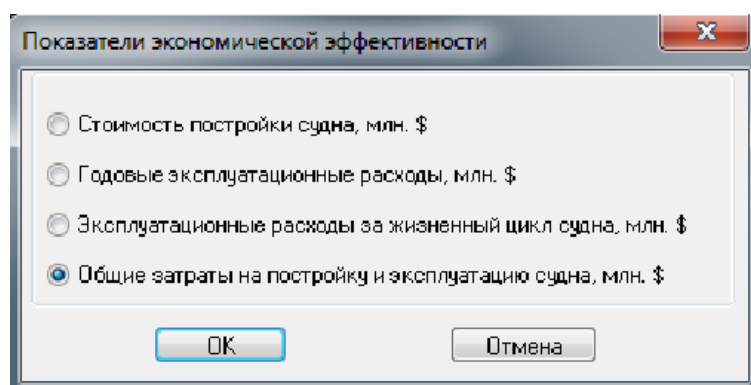


Рисунок 5.16 – Показники економічної ефективності

Висновки з розділу 5

Показано, що серед таких економічних показників функціонування багатоцільового ескортного буксира як витрати, доходи і прибуток, два останніх – доходи і прибуток, з достатньою якістю можуть бути визначені тільки при розгляданні результатів колективної роботи ескортного буксира при виконанні основної та допоміжних операцій в складі буксирного флоту морського порту та оцінці ефективності цієї колективної роботи. В такій роботі ескортному буксиру певних розмірів и певної потужності відводиться роль ескортного обслуговування суден певного діапазону водотоннажностей, тобто – роль виконання його основної функціональної операції для відносно вузького діапазону дедвейтів суден, що відвідують морській порт.

Тому при формулюванні оптимізаційної задачі вибору головних елементів ескортного буксира перевагу було віддано показнику витрат на його створення і експлуатацію, що повинен мінімізуватися, та комплексному показнику економічної ефективності і надійності типу затрати – ефективність, який дорівнюється відношенню сумарних витрат до ймовірності виконання ескортним буксиром комплексу основної та допоміжних операцій. У цьому випадку мінімізація комплексного показника обумовлює досягнення умовного мінімуму сумарних витрат на проведення функціональних операцій при відповідному максимуму надійності їх реалізації.

Основа на цьому оптимізаційна задача вибору головних елементів ескортного буксира сформульована як задача нелінійного програмування, з цільовою функцією, залежною від параметрів середовища функціонування ескортного буксира та характеристик його інженерних і навігаційних властивостей. Функціональними обмеженнями цієї оптимізаційної задачі з'явилися ресурсні обмеження процесів створення і експлуатації буксира та вимоги класифікаційного товариства для забезпечення належного рівня надійності його експлуатації.

У якості методу розв'язку оптимізаційної задачі обрано метод Пауелла, доповнений методом штрафних функцій. Створено алгоритм розв'язку задачі

вибору головних елементів ескортного буксира, в якому вперше використано метод Пауелла при розв'язку основної функціональної задачі ескортного буксира – задачі розв'язання системи трансцендентних рівнянь його руху за ескортованим судном.

На основі створеного алгоритму розв'язку оптимізаційної задачі вибору головних елементів ескортного буксира розроблено програмний комплекс розв'язання цієї оптимізаційної задачі «EscortTug», який складено на мові програмування Pascal в середовищі Visual Pascal.

РОЗДІЛ 6

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ

6.1 Приклад розв'язку задачі визначення головних елементів ескортного буксира на основі розробленої методики і програми

Наведений приклад є результатом розв'язку по критерію максимуму надійності функціонування при мінімуму витрат на проектування, побудову та експлуатацію протягом життєвого періоду оптимізаційної задачі вибору головних елементів багатоцільового буксира ОПТУГ, основною функціональною задачею якого є виконання ескорту танкерів дедвейтної групи 50 000–70 000 тон на підходах до акваторії морського порту, розташованому в Північно-Західному районі Чорного моря, а також здійснення допоміжних буксирних операцій, що визначені наступним завданням на його проектування:

***** Задание на проектирование *****	
Длина района обслуживания, мили	15
Ширина района обслуживания, мили	15
Автономность плавания, сутки	5
Экипаж, чел	6
Мореходность, баллы	5
Тип энергетической установки:	Дизель
Количество двигателей	2
Количество водяных лафетных стволов	2
Расход воды через пожарные стволы, л/с	640
Количество пенных лафетных стволов	4
Расход пены через пожарные стволы, л/с	500
Длина бонового ограждения, м	250
Количество насосов ликвидации разлива нефтепродуктов	4
Производ-ность насосов ликвидации разлива нефтепродуктов, л/с .	350
Скорость эскортирования, узлы	10

Рисунок 6.1 – Вихідні дані завдання на проектування ескортного буксира

На рис. 6.2 приведено головні розміри ескортного буксира, що отримані в результаті розв'язку оптимізаційної задачі вибору його головних елементів для вказаного діапазону дедвейту танкерів, що ескортуються во вказаному районі експлуатації.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДНА:

Длина эскортного буксира (ЭБ) L, м	28.05
Ширина B, м	10.25
Осадка T, м	4.01
Высота борта H, м	6.02
Коэффициент общей полноты	0.485
Коэффициент полноты мидель-шпангоута	0.790
Коэффициент полноты ватерлинии	0.905
Объемное водоизмещение, м ³	559.16

Рисунок 6.2 – Головні розміри ескортного буксира оптимального проекту

Рис. 6.3 містить характеристики пропульсивного комплексу, масового навантаження та остійності ескортного буксира отриманого проекту.

Марка главного двигателя	3516
Максимальная мощность двигателя, кВт	1850
Максимальная скорость, уз	12.37
Скорость эскортирования, уз	10.00
Тяга на швартовах, т	63.46
Тяга при скорости эскортирования, т	29.51
Тяга при скорости полного хода, т	20.04
Масса конструкций, т	272.69
Масса энергетической установки, т	78.80
Масса электроэнергетической установки, т	3.80
Масса систем управления и наблюдения, т	0.72
Масса вспомогательных систем, т	21.21
Масса оборудования и фурнитуры, т	40.38
Масса специального оборудования, т	70.45
Масса балласта, т	16.59
Водоизмещение порожнем, т	504.64
Масса экипажа, провизии, т	0.84
Масса судовых запасов пресной воды, т	7.50
Масса судовых запасов топлива и масла, т	63.48
Дедвейт, т	71.82
Водоизмещение полное, т	576.46
Апplikата ЦТ судна, м	4.433
Апplikата ЦВ судна, м	2.826
Поперечный метацентрический радиус, м	2.546
Начальная метацентрическая высота, м	0.939
Максимальное плечо диаграммы статической остойчивости (ДСО), м	0.74
Угол, соответствующий максимальному плечу ДСО, град	47.00
Угол заката ДСО, град	87.16
Критерий остойчивости	1.66
Период бортовых колебаний, с	7.93

Рисунок 6.3 – Характеристики пропульсивного комплексу, масового навантаження та остійності ескортного буксира отриманого проекту

Рис. 6.4 визначає відповідні головні розміри скега проекту ОПТУГ.

Средняя длина скега, м	16.55
Ширина скега на мидель-шпангоуте, м	0.62
Высота скега на мидель-шпангоуте, м	1.12
Абсцисса центра величины скега, м	2.38
Коэффициент общей полноты скега	0.712

Рисунок 6.4 Головні розміри скега оптимального ескортного буксира

Експлуатаційні та економічні характеристики отриманого проекту ескортного буксира приведені на рис. 6.5.

ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СУДНА:

Среднее время заказываемых портом эскортных рейсов, сутки	0.18
Средняя продолжительность реализованных рейсов, сутки	0.20

Потребное среднее значение управляющей силы буксира для выбранной группы судов, посещающих морской порт, тонны	54.5
Потребное максимальное значение управляющей силы буксира для этой же группы судов, посещающих морской порт, тонны	62.3
Потребное максимальное значение управляющей силы буксира для этой же группы судов, посещающих морской порт, кН	605.6
Потребное, соответствующее максимуму управляющей силы, значение тормозного усилия, тонны	-43.6
Потребный, соответствующий максимуму управляющей силы, угол буксирного троса, град	55.0

Проектные характеристики оптимального эскортного буксира:

Тяга на швартовах, кН	622.88
Максимальное значение управляющей силы буксира, кН	611.1
Соответствующее значение тормозного усилия, кН	-427.9
Соответствующее значение угла буксирного троса, град	55.0

Вероятностные характеристики эскортных операций:

Вероятность реализации эскорта по погодным условиям порта	0.990
Вероятность реализации эскорта выбранной группы судов по управляющей силе буксира	1.000
Суммарная вероятность эскорта выбранной группы судов	0.990

Вероятностные характеристики вспомогательных операций:

Вероятность прибытия ЭБ на место аварии	0.932
Вероятность прибытия ЭБ на место разлива нефтепродукта	0.932
Вероятность прибытия ЭБ на место пожара на аварийном судне	0.931
Вероятность снятия буксиром аварийного судна с мели	0.527
Вероятность буксировки аварийного судна в базу	0.376
Вероятность ликвидации разливов нефтепродуктов	1.000
Вероятность водотушения буксиром пожара на аварийном судне.....	0.081
Вероятность пенотушения буксиром пожара на аварийном судне.....	1.000
Вероятность водопенотушения буксиром пожара на аварийном судне	0.311
Суммарная вероятность выполнения вспомогательных операций	0.530

Экономические характеристики эскортного буксира:

Себестоимость суточного содержания ЭБ, \$/сутки	857.85
Минимальный тайм-чартерный эквивалент при фрахте ЭБ, \$/сутки ..	2613.10
Минимальная стоимость проектирования и постройки ЭБ, млн.\$	7.86
Минимальная стоимость жизненного периода ЭБ, млн.\$	17.26
Показатель эффективности жизненного периода ЭБ, млн.\$	17.43

Рисунок 6.5 – Експлуатаційні та економічні характеристики проекту ОПТУГ

Систему обмежень оптимізаційної задачі наведено на рис. 6.6. Там же показано виконання оптимізаційним рішенням тривіальних і функціональних обмежень цієї задачі.

Наименование	Расчетное	Допустимое
1. Максимальная длительность кругового рейса, сутки	0.196	0.500
2. Максимальная длина судна, м	28.045	40.000
3. Максимальная осадка судна, м	4.010	6.000
4. Максимальная погрешность расчета водоизмещения, %	0.577	1.000
5. Условие достаточности полезного объема корпуса, >0	0.095	1.000
6. Максимальная скорость эскортирования, уз.	10.000	10.000
7. Максимальная скорость полного хода, уз.	12.374	14.000
8. Максимальная ширина судна, м	10.250	14.000
9. Максимальное B/T	2.556	3.500
10. Максимальное D/T	1.500	1.500
11. Максимальное L/B	2.736	5.500
12. Максимальная мощность двигателей, кВт	3866.500	10000.000
13. Максимальное значение коэффициента общей полноты	0.485	0.900
14. Максимальное значение коэф. полноты м.-шпангоута	0.790	0.940
15. Максимальное значение коэф. полноты ватерлинии	0.905	0.930
16. Максимальное значения показателя эффективности	0.990	1.000
17. Минимальная длительность кругового рейса, сутки	0.196	0.100
18. Минимальная длина судна, м	28.045	20.000
19. Минимальная ширина судна, м	10.250	10.000
20. Минимальная метацентрическая высота, м	0.939	0.150
21. Минимальная осадка судна, м	4.010	4.000
22. Минимальная скорость эскортирования, уз.	10.000	8.000
23. Минимальная скорость полного хода, уз.	12.374	8.000
24. Минимальное B/T	2.556	2.500
25. Минимальное D/T	1.500	1.100
26. Минимальное L/B	2.736	3.000
27. Минимальная мощность двигателей, кВт	3866.500	500.000
28. Минимальное значение коэффициента общей полноты	0.485	0.450
29. Минимальное значение максимального плеча ДСО, м	0.740	0.250
30. Минимальный угол максимального плеча ДСО, град.	47.000	40.000
31. Минимальный угол заката ДСО, град.	87.160	70.000
32. Минимальное значение Критерия устойчивости	1.664	1.000
33. Минимальный период качки, с	7.933	5.000
34. Минимальное значение показателя эффективности	0.990	0.030
35. Максимальная высота скега, м	1.122	1.200
36. Минимальная высота скега, м	1.122	1.000
37. Максимальное значение коэффициента полноты скега	0.712	0.800
38. Минимальное значение коэффициента полноты скега	0.712	0.400
39. Максимальный недобор потребной управляющей силы, %	-0.568	1.000

Рисунок 6.6 – Система тривіальних та функціональних обмежень оптимізаційної задачі та свідцтво виконання її вимог

6.2 Перевірка достовірності результатів

Достовірність результатів розв'язку оптимізаційної задачі вибору головних елементів ескортного буксира обумовлюється якістю її розв'язання та відповідністю характеристик проектного рішення існуючим фактам.

Потрібна якість розв'язання оптимізаційної задачі підтверджується тим, що в результаті рішення задачі знайдено мінімум цільової функції вартості, яка дійсно слабо змінюється при відхиленнях по незалежних змінних від нього, про що вказує спеціальний файл виконання програми. Крім того, цей мінімум знаходиться в області пошуку необхідного екстремуму, про що свідчить виконання всіх тривіальних та функціональних обмежень оптимізаційної задачі, що наведені на рис. 6.6.

Відповідність отриманих результатів по показниках ефективності и надійності існуючим реальним фактам обумовлюється наступним:

- розподіл масового навантаження буксира проектного рішення відповідає розподілу навантаження буксира такої ж водотоннажності наведеному в таблиці 4.1, в основу якої покладено дані розподілу мас по побудованим в Україні ескортним буксирам;

- отримана вартість проектування і побудови буксира проектного рішення, яка дорівнюється 7,86 мільйону доларів, узгоджується з наведеною в тієї ж таблиці 4.1 оцінкою вартості буксира рівної водотоннажності, що отримана в результаті використання сучасних значень вартості праці і матеріалів, які реально використовуються на суднобудівних підприємствах;

- собівартість добового утримання буксира проектного рішення та показник вартості його оренди – тайм-чартерний еквівалент, відповідають аналогічним показникам буксирів такого ж класу, що нині експлуатуються;

- максимальне значення керуючого зусилля, що створюється буксиром проектного рішення при ескорті суден дедвейтом 50000–70000 тон, відповідає вимогам класифікаційного товариства до потрібного для цих суден керуючого зусилля, яке наведено на рис. 3.13–3.14;

- показник надійності виконання буксиром проектного рішення ескортних операцій в комплексі погодних умов місця розташування порту 0,990 перевищує оцінку річного часу його функціонування на вхід і вихід 0,967, яка обумовлена довготривалим розподілом інтенсивності вітрових впливів в місці розташування порту, що наведено на рис. 2.1–2.3;

– порівняння отриманих результатів з головними елементами ескортного буксира, що є найбільш близьким до нього із існуючих портових буксирів наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати розв’язання оптимізаційної задачі вибору головних елементів багатоцільового ескортного буксира з основною функціональною операцією – ескорт танкерів дедвейтної групи 50000–70000 т в морських портах Північно-Західного району Чорного моря, порівняння отриманих результатів з головними елементами ескортного буксира, що є найбільш близькими до нього із існуючих

1. Головні розміри та характеристики	ОПТUG	TUG60L
Довжина по КВЛ, м	28,05	28,99
Ширина по КВЛ, м	10,25	11,20
Осадка по КВЛ (від ОП), м	4,01	3,85
Висота борту (від ОП), м	6,02	5,45
Коефіцієнт загальної повноти	0,485	0,450
Об’ємна водотоннажність, м ³	559,2	562,5
Довжина скега, м	16,55	19,00
Висота скега на мідельшпангоуті, м	1,12	0,60
Марка гвинто-рульових колонок	US 205-P20	US 255 P30
Марка головних двигунів	CAT3516B	CAT3516C
Максимальна потужність двигуна, кВт	1920	1840
Максимальна швидкість руху, вуз.	12,94	12,70
Швидкість ескортування, вуз.	10,00	10,00
Тяга на швартовах, тони	63,0	68,5
Максимальне значення керуючої сили, тони	62,3	72,9
Відповідне гальмівне зусилля, тони	-43,6	-51,0
Кут буксирного троса, що відповідає максимуму керуючої сили, град	55,0	55,0
2. Експлуатаційні показники:		
Середня тривалість портової операції буксира (ескортування судна, супровід його по підводному каналу, транспортування по акваторії порту, швартування/відшвартування), доби	0,18	-
Потрібне середнє значення керуючої сили буксира для обраної групи суден, які відвідують морський порт, тони	54.6	-
Потрібне максимальне значення керуючої сили буксира для цієї ж групи суден, які відвідують морський порт, тони	62.3	-

Висновки з розділу 6

Наведений приклад концептуального проектування багатоцільового ескортного буксира, здійснений на основі запропонованого методу формулювання та розв'язку оптимізаційної задачі вибору його головних елементів, відповідає вимогам до такого типу проектування суден по необхідному об'єму отриманих даних, коректності їх отримання і відповідності існуючим потребам актуальності.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано низку задач, які забезпечили досягнення поставленої мети наукового дослідження – створення методу визначення головних розмірів і характеристик ескортних буксирів на етапі їх концептуального проектування, а саме:

1. Вперше створено модель інженерних та навігаційних якостей ескортного буксира, в якій на основі даних модельних випробувань ходовості та керованості 6 проектів багатофункціональних та 10 проектів ескортних буксирів в дослідному басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова розроблено метод визначення діючих на корпус буксира гідродинамічних сил, що встановлює залежність цих сил від орієнтації буксира щодо набігаючого потоку рідини, швидкості потоку і характеристик форми корпусу, які необхідні для складання і рішення рівнянь руху буксира в задачі його функціонування;

2. Вперше сформульовано задачу функціонування ескортного буксира, в якій основною функціональною операцією обрано обслуговування буксиром сукупності суден різних типів і водотоннажності, які прибувають в морський порт. Це дозволяє ескортному буксиру певної потужності ефективно обслуговувати судна певних діапазонів водотоннажності. Методом вирішення трансцендентних рівнянь руху ескортного буксира в цій операції обрано метод, аналогічний методу розв'язку оптимізаційної задачі визначення його головних розмірів;

3. Вперше за критерій ефективності обрано комплексний критерій економічної ефективності і надійності виконання буксиром основних функціональних операцій, включено вимоги класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій, обумовлених необхідністю компенсації обмеженої керованості супроводжуваних суден при малих швидкостях їх руху розвиненою керуючою силою ескортного буксира;

4. Вперше в оптимізаційну задачу вибору головних розмірів і характеристик ескортного буксира включені задачі визначення його інженерних та навігаційних властивостей, діючих на корпус буксира гідродинамічних сил і розв'язання трансцендентних рівнянь його руху, а також врахування вимог класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій;

5. Вибрано метод розв'язання оптимізаційної задачі вибору оптимальних розмірів ескортного буксира на стадії його концептуального проектування.

6. Виконано чисельні розрахунки розв'язання трансцендентних рівнянь руху ескортного буксира під час виконання ескортних операцій та зроблено порівняння результатів цих розрахунків з результатами натурних випробувань ескортних буксирів, на основі яких розроблена методика присвоєння проектуваному буксиру ескортного класу без проведення натурних випробувань, яка рекомендована Регістром судноплавства до практичного використання;

7. Ця методика та чисельні розрахунки оптимізаційної задачі вибору головних розмірів ескортних буксирів свідчать про те, що створений метод може бути використаний при проведенні дослідження ефективності ескортного буксира та визначення його характеристик на концептуальній стадії проектування в проектно-конструкторських і науково-дослідних організаціях, при обґрунтуванні вибору характеристик найбільш ефективного варіанту проектуваного судна на етапах розробки техніко-експлуатаційних вимог та техніко-експлуатаційних обґрунтувань сучасних ескортних буксирів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методы оптимизации характеристик и элементов рыбопромысловых и буксирных судов. – Труды ЦНИИ им. Акад. А. Н. Крылова, Судостроение, 1971, вып. 267.
2. Алявдина Т. Ф. Разработка методики выбора оптимальных типов и количества буксиров для морского порта: диссертация на соискание ученой степени кандидата наук: 05.22.19 / ЛВИМУ им. адм. С.О. Макарова. Ленинград, 1984. 239 с.
3. Богданов Б. В., Слуцкий А. В., Шмаков М. Г., Васильев К. А., Соркин Д. Х. Буксирные суда (проектирование и конструкция). Судостроение, Ленинград, 1974. 275 с.
4. Некрасов В. А., Ле Куанг Хунг. Задача исследовательского проектирования спасательного судна // 3б. наук. праць НУК. Миколаїв: НУК, 2004. – № 5 (398).– С. 3–12.
5. Ле Куанг Хунг. Определение главных элементов спасательных судов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.08.03 / НУК і мені адмірала Макарова. Николаев. 2006. 162 с.
6. Нгуен Зуй Бак. Обоснование проектных характеристик портовых буксиров для социалистической республики Вьетнам: диссертация на соискание ученой степени кандидата наук: 05.08.03 /КВТУ. Калининград, 2010. 313 с.
7. Разработка технологии швартовки судов к причалам АО СК «Авлита», выбор необходимых буксиров и поставка научно-технического отчета об этих работах. Отчет о НИР, заключительный. – Николаев: НУК, 2013. – 24 с.
8. Henk Hensen. Tug use in port. A practical guide. Second edition. – Port Rotterdam, Nautical Institute, 2003. – 192 p.
9. Captain HenkHensen. Using experience to asses required tug power. Port Technology International, N26, 2003. pp. 95–97.

10. Определение необходимого количества и мощности существующих портовых буксиров для обслуживания ГП «МТП «Южный» и терминалов, которые находятся в акватории Малого Аджалыкского лимана. Отчет о НИР, промежуточный. – Николаев: НУК, 2014. – 69 с.
11. Бондаренко А. В., Некрасов В. А., Ястреба А. П. Концепция выбора оптимального состава буксирного флота порта. Водный транспорт: *Збірник наукових праць КДАВТ*. Київ, 2015. № 2 (23). С. 7–14.
12. Бондаренко А. В., Некрасов В. А., Ястреба А. П. Расчетные и нормативные методы повышения эффективности буксирного обеспечения морских портов Украины. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2015. № 3. С. 42–57.
13. Бондаренко А. В., Некрасов В. А., Ястреба А. П. Методика выбора оптимального состава обеспечения порта. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. СПб., 2015. Вып. 4 (32). С. 43–52.
14. Bondarenko O., Nekrasov V., Yastreba O. Effectives harbor tug fleet: problem formulation and methodology of its solution. *Brodogradnja. Shipbuilding*. 2016. № 2. P. 34–46.
15. Bondarenko O., Nekrasov V., Yastreba O. Effectives and optimization of harbor tug fleet. Transport and Telecommunication Institute. Latvia, 2018. № 2. P. 140–150.
16. Некрасов В. А., Бондаренко А. В., Ястреба А. П. Современные методы определения эффективности, оптимизации состава и формирования требований к буксирным флотам морских портов Украины. *Морська інфраструктура України: проблеми та перспективи розвитку*: матеріали І Всеукраїнської науково-технічної конференції (Миколаїв, 3–4 грудня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 13–24.
17. Smoker B. Escort Tug Performance Prediction: A CFD Method: dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science. University of Victoria, 2009. 90p.

18. Слижевский Н. Б., Марков А. С. Расчет эскортных характеристик буксира. *Збірник наукових праць УДМТУ імені адмірала Макарова № 7 (35).* Миколаїв, 2002. С. 3–12.
19. Некрасов В. А., Поздеев В. А., Ястреба А.П. Метод определения гидродинамических сил, действующих на буксир, в режимах эскортных операций. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування.* Миколаїв, 2010. № 6. С. 41–46.
20. Ястреба А. П. Определение сил , действующих на эскортный буксир, в режиме стационарных эскортных операций. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково – технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 23–25 травня 2012 р.).* Миколаїв: НУК, 2012 р. С. 74–76.
21. Некрасов В. А., Ястреба А. П. Формулировка оптимизационной задачи выбора главных размерений эскортного буксира. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 20–22 травня 2015 р.).* Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 46–47.
22. Некрасов В. А., Бондаренко А. В., Ястреба А. П. Определение оптимальных главных размерений эскортных буксиров морских портов Украины. *Сучасні технології проектування , побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 23–24 травня 2018 р.).* Миколаїв: НУК, 2018 р. С. 9–7.
23. Yastreba O. Method for determination of escort tugs main dimensions characteristics at conceptual designs stage. *Shipbuilding & marine infrastructure.* 2018. № 2 (10). P. 27–35.
24. ИАЦ. Буксирный рынок Украины. Модернизация неизбежна. *Порты Украины,* 2017. № 3. С. 37–41.

25. Damen year book. – Damen, 2016. 39p.
26. Ястреба А. П. Основные зависимости характеристик корпуса эскортных буксиров. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 20–21 травня 2020 р.). Миколаїв: НУК, 2020 р. С. 85–89.
27. Архипов А. В., Никитин Н. В., Родионов В. В., Третьяков О. В. Система автоматизированного исследовательского проектирования надводных кораблей. *Судостроение*, 2002. № 4. С. 43–46.
28. Davit G.M. Watson. Practical ship design. Volume 1. – Amsterdam – London and others: Elesevier, 2002. – 531 p.
29. Пашин В.М. Оптимизация судов. Ленинград: Судостроение, 1983. 292 с.
30. Ашик В.В. Проектирование судов. Ленинград: Судостроение, 1985. 313 с.
31. Бронников А. В. Проектирование судов. Ленинград: Судостроение, 1991. 320 с.
32. Гайкович А. И. Основы теории проектирования сложных технических систем. Ленинград: Моринтех, 2001. 418 с.
33. Войлошников М.В. Морские ресурсы и техника: эффективность, стоимость, оптимальность. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2002. – 586 с.
34. Некрасов В. А., Богова Ю. Б. Комплексная критериальная оценка эффективности и безопасности судов // *Зб. наук. праць УДМТУ*. Миколаїв: УДМТУ, 2003. – № 6 (392). – С. 10–21.
35. Nekrasov V. Conceptual Designing of Ships / Valeriy Nekrasov.- Kyiv-Kherson: Oldi-Plus, 2019.–112p. (in English).
36. Некрасов В.О. Метод оцінки вартості і термінів побудови кораблів і суден // *Збірник наукових праць НУК ім. адм. Макарова*. – Миколаїв: НУК, 2017. – № 5. – С.28–39.
37. Grubicik I. Reliability of weight prediction in the craft concept design. *Zagreb. P.* 215–236.

38. Ennis K. J., Dougherty J. J., Lamb T., Greenwell C. R/ Product-Oriented Design and Konstruktion Cost Model.–SNAME, Ship Product Simposium, New Orlean, Louisiana, APRIL 21-23, 1997. 17 p.
39. BV. Rules for the Classification of Steel Ships. Parte 13, Tugs. 2000. 171 p.
40. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна. НД№2-020101-87. СПб: Российский морской регистр судоходства. 2016.
41. Регістр судноплавства України. Правила класифікації и постройки – 2002. – Т. 1, Т. 4
42. Oortmerssen G. van. A Power prediction method and its application to small ships // International Shipbuilding Progress, 1971, Vol. 18, No. 20. P. 397–415.
43. Holtrop J. A Statistical reanalysis of resistance and propulsion data // International Shipbuilding Progress. November 1984. Vol. 31, P. 272–276.
44. Holtrop J. A Statistical resistance prediction method with a speed dependent form factor // BSHC Varna 17–22 October 1988. Vol. 1. P. 31–37.
45. Holtrop J. Computer Programs for the Design and Analysis of General Cargo Ships // International Shipbuilding Progress. 1972. Vol. 19, № 210. P. 53–63.
46. Holtrop J., Mennen G. G. J. An approximate power prediction method // International Shipbuilding Progress, Vol. 29, July 1982. P. 166–170.
47. Некрасов В. А., Демидов Е. Д., Бондаренко А. В., Ястреба А. П. Создание программного обеспечения для определения усилий, действующих на буксир в режимах стационарных эскортных операций. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 12–14 жовтня 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016 р. С. 14–17.
48. H. Interim Standarts for Ship manoevrability Resolution A.751(18) IMO. 1993. 6 p.

49. Справочник по теории корабля: в трех томах. Том 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания Ленинград: Судостроение, 1985.– 544 с.
50. Некрасов В.А. Вероятностные задачи мореходности судов. – Л.:Судостроение, 1978. – 300 с.
51. Пашин В. М., Поляков Ю. Н. Вероятностная оценка экономической эффективности судов. – Л.: Судостроение, 1976. – 84 с.
52. Бондаренко А. В., Кротов А. И., Потолов А. Н. О решении оптимизационных задач проектирования судов в стохастической постановке. Зб. наук. праць УДМТУ. Миколаїв: НУК. 2005. № 1. С. 8–14.
53. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е издание. – СПб.: Питер, 2004. – 847 с.
54. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1969. – 396 с.
55. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. Москва: Наука, 1985. – 642 с.
56. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. – М.: Наука, 1971. – 576 с.
57. Кендалл М., Стьюарт А. Теория распределений: Пер. с англ. Москва: Наука, 1966. – 588 с.
58. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование, теория и технологии. СПб.: Корона Принт, 2004. – 375 с.
59. Вентцель Е. С. Исследование операций. Москва: Советское радио, 1972. 572 с.
60. Таха Хэмди А. Введение в исследование операций. 6-е издание: Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2005.– 912 с.
61. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

62. Charles S. Wasson. System Analysis, Design and Development: Concepts, Principles and Practices. New Jersey: Wiley–Interscience publication. 2006. – 818 p.
63. Christopher A. Chung. Simulation Modeling Handbook. A Practical Approach. New York: CRC Press, 2004. – 574 p.
64. Davit Kelton W. Simulation with Arena. Second edition. New York: McGraw Hill, 2003. – 631 p.
65. George S. Fishman. Monte Carlo – Concepts, Algorithms, and Applications. – New York: Springer–Verla, 1996. – 598 p.
66. Peter Jackel. Monte Carlo methods in finance. Chichester, England.: John Wiley & Sons, LTD, 2002. – 223 p.
67. Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания. Москва: Наука, 1966. – 432 с.
68. Букалов В. М. Определение надежности при проектировании судов. Судостроение. 1972. № 5. С. 11–14.
69. Регистр СССР. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. – Л.: Транспорт, 1974. – 360 с.
70. Обязательные постановления по порту "Южный" (Новая редакция). ГП «МТП «Южный», 2009. – 83с.
71. РД 31.31.37-78. Нормы технологического проектирования морских портов. Основные положения. – Москва: Минморфлот СССР, 1978. 122 с.
72. РД 31.3.05–97. Нормы технологического проектирования морских портов. – Москва: Министерство транспорта Российской Федерации, 1998. – 177 с.
73. British Standards. BS 6349 – 1:2000. Maritime structures – Part 1: Code of practice for general criteria. – London: British Standards Institution, 2003. – 240 p.
74. Tugs and Tows – A Practical Safety and Operational Guide [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.shipownersclub.com/loss-prevention/publications> (Дата звернения 11. 08. 2015).

75. Agerschou H. Planning and designing of ports and marine terminals: 2-nd eddition. London: Thomas Telford, 2004. – 444 p.
76. Gaythwaite J. W. Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring, and Repair of Vessels. Reston: ASCE Press, 2004. – 564 p.
77. Ермолаев Г. Г. Справочник капитана дальнего плавания. Москва: Книга по требованию, 2013. – 245 с.
78. Наказ, Правила № 655 от 01.08.2007, Про затвердження Правил плавання і лоцманського проведення суден у північно-західній частині Чорного моря, Бузько-Дніпровсько-лиманському та Херсонському морському каналах.
79. Yasuhiro A. Ship Dimensions of Design Ship under Given Confidence Limits. Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, 1998. № 911. 25 p.
80. Watson G.M.. Practical ship design. Volume 1. – Amsterdam – London and others: Elsevier, 2002. – 531 p.
81. Hironao T. Study on Standards for Main Dimensions of the Design Ship. Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management, 2006. 309. June. – 103 p.
82. Schneekluth and V. Bertram. Ship Design for Efficiency and Economy. Butterworth-Heinemann, 1998. – 218 p.
83. Гурович Л.Н., Родионов А.А. Проектирование спасательных и пожарных судов. – Л.: Судостроение, 1971. – 288 с.
84. Раков А. И. Оптимизация основных характеристик и элементов промысловых судов. – Л.: Судостроение, 1978. – 226 с.
85. Севастьянов Н.Б. Раков А.И. Проектирование промысловых судов. Л.: Судостроение, 1981. — 373 с.
86. Steerprop Azimuth Thrusters. Steerprop Ltd, 2011. – 11p.
87. Schottel Azimuth thrusters. Schottel, 2016 – 8p.
88. Azimuth thrusters. Rolls-Royce, 2016. – 36p.
89. Немзер А. И., Юрканский А. В., Кутейников М. А., Захаров М. Е. Разработка программного обеспечения для определения максимальной

- удерживающей силы и угла крена эскортных буксиров в соответствии с требованиями правил РС / Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – СПб: РМРС, № 42/43, 2016. – С. 70–74
90. Quadvlieg F., Kaul S. Development of a calculation program for escort forces of stern drive tug boats. The International Tug & Salvage Convention & Exhibition. Rotterdam. April 2006. – 8p.
 91. Свидетельство о типовом одобрении программы № 17-00394-314. Российский морской регистр судоходства, 2017.
 92. Технический отчет о проведении эскортных испытаний буксира «Леопард» TUG60LA. Kirgan Holding S.A., Николаев: 2011.– 9 с.
 93. Технический отчет о проведении эскортных испытаний буксира «Темрюк», Проект TUG70. TUG70.360285.005. – Kirgan Holding S.A., 2012. – 9 с.
 94. Технический отчет о проведении эскортных испытаний буксира «Mirax A», Проект T3150. T3150.360285.005. – Kirgan Holding S.A., 2015. – 13 с.
 95. Краев В.И. Экономические обоснования при проектировании морских судов. 2-е изд. – Л.: Судостроение, 1981. – 280 с.
 96. Don Butler. Guide to Ship Repair Estimates. – Oxford – Auckland – Boston and others: Butterworth–Heinemann, 2000. – 95 p.
 97. Лещинский А.П., Выбор критерия "Стоимость-Эффективность" для оптимизации характеристик судна 3б. наук. праць УДМТУ. Миколаїв: УДМТУ. 1998. № 1 (349). С. 53–58.
 98. Некрасов В. А., Бондаренко О. В. Концепція комплексного оцінювання ефективності та надійності кораблів берегової охорони. Перспективные тренды развития науки: Техника и технологии. Одесса, 2016.
 99. Кротов О.І., Голіков В.І., Єганов О.Ю, Бондаренко О.В. Проектування малотоннажних суден. – Миколаїв: УДМТУ, 2003.– 192 с.
 100. Проектирование судов с использованием ЭВМ. Зарубежный опыт судостроения. – ЦНИИ "Румб", 1979. – 131 с.

101. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

ДОДАТОК А
АЛГОРИТМ МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ
ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ (КОДИ)

```

Unit A3ModelET;
{Модуль математической модели мореходных и инженерных свойств ЭБ}
Interface
uses Dialogs, SysUtils, Math, A4FuncOperations;
const
  g = 9.810;           { Ускорение свободного падения, м/с^2 }
  Gamma = 1.025;       { Плотность морской воды, т/м^3 }
  gammat = 0.86;       { Удельная масса топлива, т/м^3 }
  Ro = 1.025;          { Плотность воды, т/м^3 }
  Rov = 1.23e-3;       { Плотность воздуха, т/м^3 }
type
  Eng = Record
    EngName : string[12]; { Марка двигателя }
    EngNe,   { Мощность, кВт }
    EngRPM,  { Число оборотов, об/мин }
    EngGe,   { Удельный расход топлива, г/(кВт час)}
    EngL,    { Длина двигателя, м }
    EngB,    { Ширина двигателя, м }
    EngH,    { Высота двигателя, м }
    EngM : real; { Масса двигателя, т }
  end; { Record }
  CtlgType = ^Data;
  Data = Record
    Value: Eng;
    Next : CtlgType;
  end; { record }
var //Engine
  EngName, FileName : string;
  EngCtlg, FirstL: CtlgType;
  GenCtlg, FirstL1: CtlgType;
  { количество двигателей в каталоге }
  Ncat : integer;
  MCR, RPM, MassEng, LEng, SFCeng : real;
  ShaftPower1, RPM1, Enginemass1,
  EngLength1, SFC : real;
  Ne, SHP_Econ, SHP_ka, q_max : real;
var //Hull, Skeg
  L, B, T, Hb, Cb, Cw, Cm, Cp, sH, sCb: real;
  LB, BT, HT, Vol, Displ, Capas, Epsilon: real;
var //Weights
  DisplHull, PMachnr, POutFit, PRescue, DisplLight, PCrewPrWater,
  PFuelTO, PFuelSO, PFuelWO, PFuelRO, PFuel, POil,
  PUsefulWeights, Deadweight, DisplDP, DisplFull, Xg, Xg1, Zg, Zg1, Endur: real;
  P1, P2, P3, P4, P5, P9, P14, P15, efsilon : real;

```

```

var
    pk,P6,P7,P8,
    P10,P111,P12,P13,
    P16,P17,P18,P19,
    P2f,P2l,P2l1,P2l2,P2l3,P2l4, P131, P132,
    P2f11,P2f12,P2f13,P2f14,P2f1,P2f2,P2f3,P2f4 :real;
    POilTO,POilSO,POilWO,POilRO,
    Ncrew,Pprovs,Pwater,PElectr,
    z1,z2,z3,z4,z5,z6,z7,z8,z9,z10,
    z11,z12,z13,z14,z15,z16,z17,z18 : real;
    x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8,x9,x10,
    x11,x12,x13,x14,x15,x16,x17,x18 : real;
var //InitialStability
    r,Zc,GM,GM1,tau : real;
var //RidDiagram
    iu, imax, izak : integer;
    teta, Sum : real;
    Lt : array [1..180] of real;
    Ld_max,Ltmax,
    Tetamax,Tetazak : real;
var //Zc1,Zc2,r1,r2:real;
var //TowingHeel
    ct2, T1, rt1, ct1, at1, et1,
    bt1, Ld, delta_K,
    Xf1, Xf2, Kt, Kk2,
    Teta_2r : real;
    Ss, Zh, Xh : real;
    K2tug : real;
var //Seakeeping
    taub,xi : real;
    SeaStatS,Heigh_Wave_3 : real;
    PerdOfRoll : real;
var //SpeedP
    Vs,Vp :real;
    TugForce01,TugForceEV,TugForceVs :real;
var
    ju :integer;
    Tfs,Ats,Abts,hbs,EtaPs,EtaRs,EtaSs,Csterns,Zps,Dps :real;
    c1s,c2s,c3s,c4s,c5s,c6s,c7s,c12s,c13s,c15s,c16s,
    d_1s,iEs,m1s,m2s,lammdas,FnTs :real;
    Res,lgRes,Frs,Cfs,SWs,Rfs,Rapps,Rws,Rbs,Rtrs,
    Ras,Rtots,SHPCalcs,Sapps,k2s,
    Cas,k1s,LRs,lcbs,Xcs,Lpps,ws,t_ws,
    Pes,V1s,Ves,qs,kds,etaks,etads,etavss :real;

```

```

DeltaV1s,DeltaSHPs,
tl1s,DeltaVs,Vol1s,
Cbs,Cws,Cms,Cps :real;
ktf,btf :real;
var //Resistance
Vol2,Tf,At,Abt,hbb,etaP,etaR,etaS,Cstern,Zp,Dp :real;
c1,c2,m3,c3,c4,c5,c6,c7,c12,c13,c15,c16,
d_1,iiE,m1,m2,lammda,FnT :real;
Re,lgRe,Fr,Cf,SW,Rf,Rapp,Rw,Rb,Rtr,
Ra,Rtot,Nes,Ne1,Nep,Sapp,k2,
Ca,k1,LR,lcb,Xc,Lpp,w,t_w,
Pe,V,Vtd,Ztd,Ve,q,kd,etak,etad,etav :real;
DeltaV,DeltaSHP :real;
var //LossSpeedP
ik : integer;
h3,VL,EtaVL,FrshL : real;
AFrL,ACbL,DeltaL,NkL : real;
var //LossSpeed
ii : integer;
EtaVs,EtaVp : real;
Vv,EtaVv,Frsh : real;
AFr,ACb,Delta,Nk : real;
var
SeaStatLS: real;
{ Чтение каталога двигателей из файла }
Procedure ReadEngCtlg(FileName:string;
var EngCtlg,FirstL:CtlgType);
{ Запись каталога двигателей в файл }
Procedure SaveEngCtlg(FileName:string;
var EngCtlg,FirstL:CtlgType);
{ Выбор двигателя по каталогу }
Procedure ChooseEngine(EngCtlg,FirstL:CtlgType;SHP:real;
var ShaftPower1,RPM1,EngineMass1,EngLength1,SFCeng:real;
var EngName:string);
{ Удаление каталога двигателей из оперативной памяти }
DelEngCtlg(EngCtlg,FirstL:CtlgType);
{ Описание формы корпуса и формирование соотношения вместимости
судна}
Procedure Hull(L,B,T,Hb,Cb:real;
var Displ,LB,BT,HT,Cw,Cm,Cp,Epsilon:real);
{ Расчет скорости свободного хода судна
и тяговых усилий при заданной мощности ЭУ судна }
Procedure SpeedP(L,B,T,Cb,Cw,Cm,Cp,SHP_ka,EVelocity:real;
var Vs,Vp,TugForce01,TugForceVs,TugForceEV:real);

```

```

    {var: скорость свободного хода, скорость эскортирования;
    тяга на стопе, тяга при свободном ходе и тяга при скорости
    эскортирования}
    { Расчет величины потери скорости на волнении заданного района
    плавания}
    Procedure LossSpeedP(h3,Vs,EVelocity,L,Cb:real;
var EtaVs,EtaVp:real);
    { Определение массовой нагрузки и формирование соотношения
    плавучести судна}
    Procedure
    Weights(Displ,L,B,Hb,Vs,Vp,SHP_ka,Enginemass1,SFCeng,ProvsEndr,
    EvrTarrPDPP,EvrTimeCircleTrip,TimeOper:Real;
var DisplHull,PMachnr,POutFit,PRescue,DisplLight,PCrewPrWater,
    {PFuelTO,PFuelSO,PFuelWO,PFuelRO,PFuel,POil,}
    UsefulWeights,Deadweight,DisplDP,DisplFull,Xg,Zg,Endur:real);
    { Определение параметров начальной остойчивости и построение
    соотношения обитаемости судна }
    Procedure InitialStability(L,B,Hb,T,Cb,Cw,Zg:real; var GM,r,Zc,tau:real);
    { Определение параметров остойчивости судна при больших углах крена}
    Procedure RidDiagram(B,Hb,T,r,Zg,Zc:real;
var Ltmax,TetaMax,TetaZak,Ld_max:real);
    {Построение соотношения остойчивости судна при рывке буксирного
    троса }
    Procedure TowingHeel(Cb,L,B,Hb,T,Zg,GM,Ld_max:real; var K2tug:real);
    {Построение соотношения мореходности судна }
    Procedure Seakeeping(Vs,Vp:real; var PerdOfRol:real);
    Определение сопротивления движению ЭБ при скорости свободного хода
    на тихой воде, Nes - потребная мощность двигателей }
    Procedure Resistance(L,B,T,Cb,Cw,Cm,Cp,Vs,Vp:real; var Nes:real);
    { Определение потерь скоростей хода Vs,Vp на волнении, заданном
    исходными данными задачи проектирования}
    Procedure LossSpeed(L,Cb,Vs,Vp:real; var EtaVs,EtaVp:real);
    Implementation
    uses A1Main,A2MnDtMFE,u5aEcnmIndx,u1Task,u2Trensp,P2Genert;
    Procedure SaveEngCtlg;
    { Запись каталога двигателей в файл }
var
    err : integer;
    f_ctlg : file of Eng;
    s : string;
    s1 : string[10];
Begin
    try
        AssignFile(f_ctlg,FileName);

```

```

    {$i-} rewrite(f_ctlg); {$I+}
    EngCtlg:=FirstL;
    while EngCtlg^.Next <> nil do
begin
    write(f_ctlg,EngCtlg^.Value);
    EngCtlg:=EngCtlg^.Next; { переход к следующему }
    end;
    finally
    CloseFile(f_ctlg);
    end;
End; { Procedure SaveEngCtlg }
    Procedure ReadEngCtlg;
    { Чтение каталога двигателей из файла }
var
    err : integer;
    f_ctlg : file of Eng{CtlgType};
    s : string;
    s1 : string[10];
Begin
    try
    AssignFile(f_ctlg,FileName);
    {$i-} reset(f_ctlg); {$I+}
    try
    New(EngCtlg);
    Ncat:=0; { Ncat-количество двигателей в каталоге }
    err := FileSize(f_ctlg);
    FirstL:=EngCtlg;
    while not Eof(f_ctlg) do
begin
    read(f_ctlg,EngCtlg.Value);
    Ncat:=Ncat+1; { Ncat-количество двигателей в каталоге }
    if Not Eof(f_ctlg) then
begin
    New(EngCtlg^.Next);
    EngCtlg:=EngCtlg^.Next;
    end {if Not Eof(f)}
    else EngCtlg^.Next:=nil; {введение признака конца списка}
    end;
    except on EConvertError do case Lang_type of 0 : MessageDlg(' Ошибка
преобразования числа',mtError,[mbOK],0);
    1 : MessageDlg(' Error conversion',mtError,[mbOK],0);
    end;
    else Raise
    end;
end;

```

```

finally
    CloseFile(f_ctlg);
    end; { while }
End; { Procedure ReadEngCtlg }
Procedure ChooseEngine(EngCtlg,FirstL:CtlgType; SHP:real;
var ShaftPower1,RPM1,EngineMass1,EngLength1,SFCeng:real;
var EngName:string);
    { Выбор двигателя по каталогу }
Begin
    EngCtlg:=FirstL;
    while {((-SHP + EngCtlg^.Value.EngNe)/SHP<= -0.05) }
    (SHP - EngCtlg^.Value.EngNe > 0.05*SHP)
    { or (RPM1 - EngCtlg^.Value.EngRPM)>= 0.0001)}
    and (EngCtlg^.Next <> nil) do
        EngCtlg:=EngCtlg^.Next; { поиск нужного двигателя }
    if EngCtlg^.Next <> nil then { если двигатель подобран }
begin
    ShaftPower1:=EngCtlg^.Value.EngNe; M1:=EngCtlg^.Value.EngRPM;
    EngineMass1:=EngCtlg^.Value.EngM;
    EngLength1:=EngCtlg^.Value.EngL/1000;
    SFCeng:=EngCtlg^.Value.EngGE;    EngName:=EngCtlg^.Value.EngName;
    end
    else
begin {если двигателя с такой мощностью нет в каталоге }
    case Lang_type of 0 : MessageDlg('Двигателя с такой мощностью
'+FloatToStrF(ShaftPower1,ffFixed,10,2)+'          нет          в
каталоге'#10#13'Программа будет закрыта',mtError,[mbOk, mbCancel],0);
    1:      MessageDlg('The engine by such power
'+FloatToStrF(ShaftPower1,ffFixed,10,2)+' is not in the catalogue'#10#13'The
program will be closed',mtError,[mbOk, mbCancel],0);
        end;
        Abort;
        end; { while }
    End; { Procedure ChooseEngine }
    Procedure DelEngCtlg;
        { Удаление из памяти каталога двигателей }
var
    PrevL : CtlgType;
Begin
    PrevL:=FirstL;
    while PrevL <> nil do
begin
    EngCtlg:=PrevL;
    PrevL:=PrevL^.Next;

```

```

Dispose(EngCtlg); { освобождение памяти }
end; { while }
End; { Procedure DelEngCtlg }
Procedure Hull; {(L,B,T,Hb,Cb:real;
var Displ,LB,BT,HT,Cw,Cm,Cp,Epsilon:real);}
{Главные размерения эскортного буксира(ЕТ)}
// const Gamma=1.025;      { плотность морской воды, т/м^3 }
{ Независимые переменные:
L   - длина судна, м
B   - ширина судна, м
T   - осадка судна, м
Hb  - высота борту судна, м
Cb  - коэффициент общей полноты судна
Ne  - мощность ЭУ судна, кВт
sH  - высота скега, м
sCb - коэффициент общей полноты скега}
Begin
Vol:=Cb*L*B*T;
Displ:=1.025*Vol;
LB:=L/B;
BT:=B/T;
HT:=Hb/T;
Cw:=0.525*Cb+0.65; // ЕТ
Cm:=1.31*Cb/Cw+0.13; // ЕТ
Cp:=Cb/Cm;
{*L:=54.00; B:=14.95; T:=4.815; Hb:=5.8; Cb:=0.746; Vol:=2900; S:=619;
Cw:=0.81+0.011*exp((1/3)*ln(L*B*T))/T; Cp:=Cb/Cm;
Cm:=0.306+1.05*Cb; *}
// Вместимость ЕТ определяется подпалубным объемом
Capas:={NNLoadsContainers*}7.3
// Соотношение вместимости: Epsilon > 0;
Epsilon:=0.6*L*B*Cw - Capas;
// Вывод результатов
if FlagOut then
begin
case Lang_type of 0 :
begin
Child.RichEdit1.Lines.Add(' ');
Child.RichEdit1.Lines.Add('ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДНА:');
Child.RichEdit1.Lines.Add('Длина судна, м =
'+FloatToStrF(L,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Ширина, м = '+FloatToStrF(B,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Осадка, м = '+FloatToStrF(T,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Высота борта, м =

```

```

'+FloatToStrF(Hb,ffFixed,10,2));
hild.RichEdit1.Lines.Add(' Коэффициент общей полноты Cb = '
+FloatToStrF(Cb,ffFixed,10,3));
Child.RichEdit1.Lines.Add(' Коэффициент полноты мидель-шпангоута Cm
= ' +FloatToStrF(Cm,ffFixed,10,3));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Коэффициент полноты ватерлинии Cw =
'+FloatToStrF(Cw,ffFixed,10,3));
    end;
1 : begin
Child.RichEdit1.Lines.Add(' ');
Child.RichEdit1.Lines.Add(' MAIN DIMENTIONS:');
Child.RichEdit1.Lines.Add(' Length, м = '+FloatToStrF(L,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add(' Breadth, м = '+FloatToStrF(B,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add(' Draught, м = '+FloatToStrF(T,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add(' Depth, м = '+FloatToStrF(Hb,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add(' Block coefficient Cb = '
+FloatToStrF(Cb,ffFixed,10,3));
Child.RichEdit1.Lines.Add(' Middle section coefficient Cm = '
+FloatToStrF(Cm,ffFixed,10,3));
Child.RichEdit1.Lines.Add(' Waterline area coefficient Cw = '
+FloatToStrF(Cw,ffFixed,10,3));
    end;
    end; { case }
    end; { Вывод результатов }
End; { Procedure Hull}
Procedure
Weights;//(Displ,L,B,Hb,Vs,Vp,SHP_ka,Enginemass1,SFCeng,ProvsEndr,Ti
meOper:real;//
var DisplHull,PMachnr,POutFit,PRescue,DisplLight,PCrewPrWater,
//{PFuelTO,PFuelSO,PFuelWO,PFuelRO,Pfuel,Poil,} //
PUsefulWeights,Deadweight,DisplDP,DisplFull,Xg,Zg,Endur:real);
{ Расчет составляющих весовой нагрузки ET
Vs - скорость полного хода судна, узлы
Vp - скорость буксировки, узлы
ProvsEndr - автономность плавания, сутки
Rm = Endur - дальность плавания, мили
Displ - водоизмещение  $L \cdot B \cdot T \cdot C_b$ , т
DisplFull - масса судна, т
SHP_ka - мощность выбранного главного двигателя при полной нагрузке,
кВт
SHP_econ - мощность выбранного главного двигателя
при экономической скорости хода, кВт
Enginemass1 - масса выбранного двигателя, т
SFCeng - удельный расход топлива выбранного двигателя,

```

```

SwchMaterial - тип материала корпуса }
Begin
P1:=0.5192*Displ-24.88; { Масса корпуса, т }
P2:=0.0685*Displ + 1.12; { Масса судовых устройств, т }
P3:=0.0334*Displ+2.07; { Масса вспомогательных систем, т }
P4:=0.0237*SHP_ka ; { Масса энергетической установки, т }
P4:=0.00004*Displ*Displ+0.0473*Displ+38.53;
P5:=0.00008*Displ*Displ-0.1004*Displ+35.06; { Масса электросистемы, т }
P6:=0.0008*Displ+0.26; { Масса средств управления и наблюдения, т }
P7:=0.001*Displ; { Масса запасных частей, т }
P8:=0.008*Displ; { Масса запаса водоизмещения, т }
P9:=0.003*Displ; { Масса постоянных жидких грузов, т }
P10:=0.001*Displ; { Масса снабжения, имущества, т }
P11:=0.0074*Displ +12.35; { Масса балласта, т }
{ Масса спецоборудования для выполнения эскортных операций, т }
P12:=0.0577*TugForce01;
{ Масса специального оборудования для тушения пожаров, т }
P131:=0.0087*Numgun*Gunpower+0.0075*Numgunfoam*Gunfoampower;
{ Масса пенообразователя, т }
{ P132:= 1.1/75*Gunfoampower*30; k=75; }
P132:= 1.1*0.5*Numgunfoam*Gunfoampower*0.03;
P13:=P131+P132;
{ Масса специального оборудования для ликвидации разливов нефти, т }
//P14:=0.0068*SlickBarLength+0.0085*NumSlickBarPump*SlickBarPump;
P14:=0.0;
{ Масса корпуса, ЭУ, основного оборудования буксира и оборудования
для выполнения вспомогательных операций, т }
DisplHull:=P1;
PMachnr:=P4;
PElectr:=P5;
POutFit:= P2+P3+P5+P6+P7+P8+P9+P10+P11+P12;
PRescue:=P13+P14;
{ Водоизмещение порожнем, т }
DisplLight:= P1+P2+P3+P4+P5+P6+P7+P8+P9+P10+P11+P12+P13+P14;
Ncrew:=NumbCrew;
{ Масса провизии, т }
Pprovs:=0.003*Ncrew*ProvsEndr;
{ Масса экипажа с багажом, провизии, т }
P15:=0.125*Ncrew+0.003*Ncrew*ProvsEndr;
{ Масса запасов пресной воды, т }
P16:=0.250*Ncrew*ProvsEndr;
Pwater:=0.250*Ncrew*ProvsEndr;
{ Масса экипажа с багажом, провизии, запасов пресной воды, т }
PCrewPrWater:= P15+P16;

```

```

{ Масса запасов топлива и масла, т }
{ q_econ:=0.000198; Расход топлива т/[кВт час] }
{Масса запасов топлива для выполнения основных и всп.операций, т }
P2f11:=0.75*SHP_ka*SFCeng*ProvsEndr*24.0;
P2f11:=P2f11/1000000; //Исходя автономности плавания эконходом, т
{ Масса запасов топлива для обеспечения стоянки, т }
P2f12:=0.1*SHP_ka*SFCeng*(1/24)*24.0;
P2f12:=P2f12/1000000; // В порту базы во время 1-го кругового рейса - 1
    час на 1 круговой рейс
P2f13:=0.3*SHP_ka*1/24*24.0; // При ожидании судна во время 1-го
    кругового рейса
P2f13:=P2f13/1000000; // т
P2f1:=P2f12+P2f13; // т
{ Масса запасов масла, т}
P2l1:=0.05*P2f1;
{ Масса запасов топлива для выполнения операций движения во время
    кругового рейса, т }
P2f2:=SHP_ka*SFCeng/1000000*EvrTarrPDPP*24;
{ Масса запасов масла, т}
P2l2:=0.05*P2f2;
{ Масса запасов топлива для выполнения технических операций во время
    кругового рейса, т }
P2f3:=0.5*SHP_ka*SFCeng/1000000*(EvrTimeCircleTrip-
    EvrTarrPDPP)*24;
{ Масса запасов масла, т}
P2l3:=0.05*P2f3;
{ Масса запасов топлива для выполнения вспомогательной операции
    (спасательной, тушения пожара и т.д.), т }
P2f4:=SHP_ka*SFCeng/1000000*TimeOper; {на прибытие и
    позиционирование во время операции}
    SHP_ka := NumEngin*MCR;
MCR - максимальная длительная мощность, кВт
SFCeng:=q_max:=0.000216; расход топлива т/[кВт час]
SHP_ka,q_Max,TimeOper - мощность ЭУ, удельный расход топлива на
    полном ходу и среднее время занятости в 1-ой спасательной операции в
    году
SHP_Econ,qEcon,TimeOper-мощность ЭУ на экономичном ходу,
    удельный расход топлива на экономичном ходу и количество часов
    вспомогательной операции }
{ Масса запасов масла, т}
P2l4:=0.05*P2f4;
{ Масса запасов топлива и масла на выполнение одного кругового рейса
    и одной вспомогательной операции, т }
PFuelTO:=P2f1; { на выполнение стоянки за 1 круговой рейс }

```

```

POilTO:=P2l1;
PFuelSO:=P2f2; { на выполнение движения за 1 круговой рейс }
POilSO:=P2l2;
PFuelWO:=P2f3; { на выполнение технических операций за 1 круговой
рейс }
POilWO:=P2l3;
PFuelRO:=P2f4; { на выполнение 1-ой спасательной операции }
POilRO:=P2l4;
PFuel:= CoefSeaMargn*(PFuelTO+PFuelSO+PFuelWO+PFuelRO);
POil:= CoefSeaMargn*(POilTO+POilSO+POilWO+POilRO);
P17:=PFuel;
P18:=POil;
{ Водоизмещение по походному для выполнения эск-ной операции, т }
DisplDP:=DisplLight+P10+P14+P15+P2f11;
{ Масса перевозимых полезных грузов, т }
//P19:= EvrSumMassLoads;
P19:=0.0;
//PUsefulWeights:=P19;
{ Дедвейт, т }
Deadweight:=P10+P14+P15+P2f11+P19;
{ Водоизмещение полное, т }
DisplFull:=DisplLight+P10+P14+P15+P2f11+P19;
{ Дальность плавания, мили }
Endur:=ProvsEndr*24.0*Vp;
    z1:=0.638*Hb;    z2:=1.116*Hb;    z3:=0.845*Hb;    z4:=0.499*Hb;
    z5:=0.918*Hb;    z6:=1.864*Hb;    z7:=0.576*Hb;    z8:=0.658*Hb;
    z9:=0.379*Hb; z10:=0.857*Hb; z11:=0.000*Hb; z12:=1.160*Hb;
    z13:=1.100*Hb; z14:=0.370*Hb;
    z15:=0.843*Hb; z16:=0.337*Hb; z17:=0.715*Hb; z18:=0.829*Hb;
{ Аппликата ЦТ судна, м } {Zg:=0.7*Hb;}
Zg:=(P1*z1+P2*z2+P3*z3+P4*z4+P5*z5+P6*z6+P7*z7+P8*z8+P9*z9+
    P10*z10+P11*z11+P12*z12+P13*z13+P14*z14+P15*z15+P16*z16+
    P17*z17 + P18*z18)/DisplFull;
Zg1:=Zg;
{{ Абсцисса ЦТ судна, м } {Xg:=0.1*L/2;}}
    x1:=0.076*L/2;    x2:=0.310*L/2;    x3:=0.117*L/2;    x4:=-0.452*L/2;
    x5:=0.109*L/2; x6:=0.209*L/2; x7:=-0.410*L/2; x8:=0.024*L/2;
    x9:=-0.230*L/2; x10:=0.245*L/2; x11:=0.000*L/2; x12:=0.330*L/2;
    x13:=0.080*L/2; x14:=0.040*L/2;
    x15:=0.365*L/2; x16:=0.579*L/2; x17:=-0.468*L/2; x18:=-0.384*L/2;
    Xg:=(P1*x1+P2*x2+P3*x3+P4*x4+P5*x5+P6*x6+P7*x7+P8*x8+P9*x9
    +P10*x10+P11*x11+P12*x12+P13*x13+P14*x14+P15*x15+P16*x16+
    P17*x17+P18*x18)/DisplFull;
    Xg1:=Xg;

```

```

    { Невязка уравнения плавучести }
    efsilon:=abs((Displ-DisplFull)/DisplFull);
    if FlagOut then
begin
    case Lang_type of 0:
begin
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Масса корпуса, т. =
'+FloatToStrF(P1,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Масса судовых устройств, т ..... =
'+FloatToStrF(P2,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Масса судовых систем, т ..... =
'+FloatToStrF(P3,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Масса энергетической установки, т .. =
'+FloatToStrF(P4,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Масса специального оборудования, т . =
'+FloatToStrF(PRescue,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Водоизмещение порожнем, т ..... =
'+FloatToStrF(DisplLight,ffFixed,10,3));
    //Child.RichEdit1.Lines.Add('Масса постоянных жидких грузов, т .. =
'+FloatToStrF(P9,ffFixed,10,2));
    //Child.RichEdit1.Lines.Add('Запас водоизмещения, т =
'+FloatToStrF(P8,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Масса экипажа с багажом, провизии, т =
'+FloatToStrF(P14,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Масса запасов пресной воды, т ..... =
'+FloatToStrF(P15,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Масса запасов топлива, масла, т .... =
'+FloatToStrF(P17,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Масса полезного груза, т ..... =
'+FloatToStrF(P18,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Водоизмещение полное , т ..... =
'+FloatToStrF(DisplFull,ffFixed,10,3));
    end;
    1 : begin
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Mass of hull, t ..... =
'+FloatToStrF(P1,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Mass of installation, t ..... =
'+FloatToStrF(P2,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Mass of mechanical installation, t ..... =
'+FloatToStrF(P3,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Mass of supply, t ..... =
'+FloatToStrF(P4,ffFixed,10,2));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Mass of rescue system, t ..... =
'+FloatToStrF(PRescue,ffFixed,10,2));

```

```

Child.RichEdit1.Lines.Add('Light displacement, t ..... =
'+FloatToStrF(DisplLight,ffFixed,10,3));
//Child.RichEdit1.Lines.Add('Mass of constant liquid loads, t =
'+FloatToStrF(P9,ffFixed,10,2));
// Child.RichEdit1.Lines.Add('Margin of displacement, t ..... =
'+FloatToStrF(P6,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Mass of crew, provisions, t ..... =
'+FloatToStrF(P14,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Mass of stores bash and culinary water, t =
'+FloatToStrF(P15,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Mass of stores of fuel, oil, t ..... =
'+FloatToStrF(P17,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Mass of usefull weight, t ..... =
'+FloatToStrF(P18,ffFixed,10,2));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Displacement full, t ..... =
'+FloatToStrF(DisplFull,ffFixed,10,3));
end;
end; { case }
end;
End; { Procedure Weights }
Procedure InitialStability;{(L,B,Hb,T,Cb,Cw,Zg:real; var GM,r,Zc,tau:real);}
{Расчет начальной метацентрической высоты и периода свободных
бортовых колебаний судна}
begin
Zc2:= (1.5-(Cb/Cw))/(2-(Cb/Cw))*T; {аппликата ЦВ судна, м}
r2:=1.05*Cw*Cw/Cb*B*B/12/T; {попер-ый метацентрический радиус, м}
Zc1:=(0.372-0.168*Cw/Cb)*T;
Zc:=(2.5-Cb/Cw)*T/3;
r1:=sqr(B)*(0.0902*Cw-0.02)/(T*Cb);
r:=sqr(B)*(0.06*Cw+0.0243)/(T*Cb);
GM:=Zc + r - Zg;
GM1:=GM;
if (GM < 0.05) then GM:=0.05; {начальная метацентрическая высота}
{tau:=2*sqrt(1/GM*(sqr(B)*sqr(Cw)/11.4+sqr(Hb)/12));} {период качки}
tau:=0.75*B/sqrt(GM);
{tau:=0.58*sqrt(sqr(B)+4*sqr(Zg)); }
if FlagOut then
begin
case Lang_type of 0 :
begin
Child.RichEdit1.Lines.Add('Аппликата ЦВ судна, м =
'+FloatToStrF(Zc,ffFixed,10,3));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Поперечный метацентрический радиус, м =
'+FloatToStrF(R,ffFixed,10,3));

```

```

Child.RichEdit1.Lines.Add('Начальная метацентрическая высота, м =
'+FloatToStrF(GM,ffFixed,10,3));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Период бортовой качки, с =
'+FloatToStrF(tau,ffFixed,10,3));
end;
1 : begin
Child.RichEdit1.Lines.Add('Z-coordinate of a center of buoyancy of the ship,
m = '+FloatToStrF(Zc,ffFixed,10,3));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Transversal metacentric radius, m =
'+FloatToStrF(R,ffFixed,10,3));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Initial metacentric height, m =
'+FloatToStrF(GM,ffFixed,10,3));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Period of a rolling, s =
'+FloatToStrF(tau,ffFixed,10,3));
end;
end;{ case }
end;
End; { Procedure InitialStability }
Function CalcDiagrm(teta,B,Hb,T,r,Zg,Zc:real):real;
var
    r90, y90, f1,f2,f3,f4,f5,zc90_zc :real;
begin
    f1:=sin(teta*pi/180)-1/8*sin(4*teta*pi/180)-1/32*(35*sin(2*teta*pi/180)-
    9*sin(6*teta*pi/180));
    f2:=-1/8*sin(4*teta*pi/180)+1/32*(35*sin(2*teta*pi/180)-
    9*sin(6*teta*pi/180));
    f3:=1/8*sin(4*teta*pi/180)-1/32*(sin(2*teta*pi/180)-3*sin(6*teta*pi/180));
    f4:=1/8*sin(4*teta*pi/180)+1/32*(sin(2*teta*pi/180)-3*sin(6*teta*pi/180));
    f5:=sin(teta*pi/180);
    y90:=0.5*B*(1-0.972*T/Hb);
    zc90_zc:=0.64*(1-1.032*T/Hb)*Hb;
    r90:=r*sqr(zc90_zc/y90)*(zc90_zc/y90);
    CalcDiagrm:=zc90_zc*f1+y90*f2+r*f3+r90*f4-(Zg-Zc)*f5;
    end;{ CalcDiagrm }
    Procedure RidDiagram; {(B,Hb,T,r,Zg,Zc:real;
var
    Ltmax,TetaMax,TetaZak,Ld_max :real);}
    { Расчет плеч диаграммы статической остойчивости (Рида)
    по Власову-Благовещенскому
    Breadth - ширина судна, м
    Depth - высота борта корабля, м
    HeightCntrBuoync - аппликата центра величины, м
    HeightCntrGrvt - аппликата центра тяжести, м }
begin

```

```

    Ltmax := 0;
    TetaMax := 0;
    imax := 0;
    for iu:=1 to 120 do
begin
    teta := iu;
    Lt[u]:= CalcDiagrm(teta,B,Hb,T,r,Zg,Zc);
    if Lt[iu] >= Ltmax then { поиск максимального плеча и угла максимума
        ДСО }
begin
    Ltmax := Lt[iu];
    imax := iu;
    end;
    if (Lt[iu] - 0.0001) > 0 then { поиск угла заката диаграммы Рида [ДСО]}
begin
    izak:=iu;
    end;
    end;{for u}
    Tetamax := int(imax); // угол максимума
    Tetazak := int(izak); // угол заката
    if Lt[izak] > 0 then tetazak := int(izak) + Lt[izak]/(Lt[izak]+ abs(Lt[izak+1]))
    else Tetazak := Int(izak); // уточнение угла заката
    Sum := 0 ;
    for iu:=1 to imax-1 do // вычисление интегральной суммы
    Sum:= Sum + 2*Lt[iu];
    Sum:= Sum + Lt[imax];
    Ld_max := pi*Sum/180/2;
    if FlagOut then
begin
    case Lang_type of 0 :
begin
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Угол заката ДСО, град =
'+FloatToStrF(TetaZak,ffFixed,10,3));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Максимальное плечо ДСО, м =
'+FloatToStrF(LtMax,ffFixed,10,3));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Угол, соответствующий максимальному
плечу, град = '+FloatToStrF(TetaMax,ffFixed,10,3));
    end;
    1 : begin
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Angle of vanishing stability, deg =
'+FloatToStrF(TetaZak,ffFixed,10,3));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Maximum righting lever arm, m =
'+FloatToStrF(LtMax,ffFixed,10,3));

```

```

Child.RichEdit1.Lines.Add('Angle appropriate to a maximum lever arm, deg =
'+FloatToStrF(TetaMax,ffFixed,10,3));
end;
end; { if FlagOut }
end;
End; { Procedure RidDiagram }
Procedure TowingHeel;{ (Cb,L,B,Hb,T,Zg,GM,Ld_max:real; var
K2tug:real)}
// проверка остойчивости судна на действие рывка буксирного троса
// при выполнении морских буксировок
// Данные для расчета
// L - длина судна, м
// B - ширина судна по КВЛ, м
// T - осадка судна, м
// Hb - высота борта судна, м
// Zg - аппликата центра масс, м
// GM - начальная поперечная метацентрическая высота, м
// Ld_max - ордината диаграммы динамической остойчивости при угле
максимума ДСО
// Zh - возвышение точки подвеса буксирного гака над основной
плоскостью
// Xh - продольное расстояние между точкой подвеса буксирного гака и
центром тяжести судна, измеренное по горизонтали
function Tab_X2(Xf2:real) : real;
const
Table_X2: array [1..2,1..6] of real = ((0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70),
(0.75, 0.82, 0.89, 0.95, 0.97, 1.00));
var
j : integer;
u : real;
begin
j:=1;
if Xf2 > Table_X2[1,6] then u:= Table_X2[2,6]
else begin
while (X2 - Table_X2[1,j])>0 do j := j + 1;
if (j = 1) then u := Table_X2[2,j]
else if(Xf2 = Table_X2[1, j]) then u := Table_X2[2,j]
else
u:=((Xf2-Table_X2[1,j-1])*(Table_X2[2,j]-Table_X2[2,j-1]))/(Table_X2[1,j]-
Table_X2[1,j-1])+Table_X2[2,j-1];
end;
Tab_X2:= u;
end;
function Tab_X1(Xf1:real) : real;

```

```

const
Table_X1 : array [1..2,1..14] of real =
  (( 2.4, 2.6, 2.8, 3.0, 3.2, 3.4, 3.5, 3.6, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5),
  (1.00, 0.96, 0.93, 0.90, 0.86, 0.82, 0.80, 0.79, 0.78, 0.76, 0.72, 0.68, 0.64,
  0.62));
var
  j : integer;
  u : real;
begin
  j:=1;
  if Xf1 > Table_X1[1,14] then u:= Table_X1[2,14]
  else begin
    while (Xf1 - Table_X1[1,j])>0 do j := j + 1;
    if (j = 1) then u := Table_X1[2,j]
    else if(Xf1 = Table_X1[1, j]) then u := Table_X1[2,j]
    else u:= ((Xf1 - Table_X1[1,j-1])*(Table_X1[2,j]-Table_X1[2,j-1]))/(Table_X1[1,j]-Table_X1[1,j-1])+Table_X1[2,j-1];
    end;
    Tab_X1:= u;
    end;
    function Tab_S(S :real) : real;
const
  Table_S : array [1..2,1..10] of real =
    (( 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20),
    (0.100, 0.100, 0.098, 0.093, 0.079, 0.065, 0.053, 0.044, 0.038, 0.035));
  var
    j : integer;
    u : real;
  begin
    j:=1;
    if S > Table_S[1,6] then u:= Table_S[2,10]
    else begin
      while (S - Table_S[1,j])>0 do j := j + 1;
      if (j = 1) then u := Table_S[2,j]
      else if(S = Table_S[1, j]) then u := Table_S[2,j]
      else u:= ((S - Table_S[1,j-1])*(Table_S[2,j]-Table_S[2,j-1]))/(Table_S[1,j]-Table_S[1,j-1])+Table_S[2,j-1];
      end;
      Tab_S:= u;
      end;
    begin
      Zh:= Hb + 1.15; //возвышение точки подвеса буксирного гака над
      //основной плоскостью, м;

```

```

Xh:= 1.5; //продольное расстояние между точкой подвеса буксирного
гака // и центром тяжести судна, измеренное по горизонтали, м;
(* контрольный пример L := 17.12; B := 8.2; T := 2.17; Xh := 3.445;
Zh := 3.35; Zg := 2.67; GM := 1.83; Cb := 0.576; Ld_max := 0.099; *)
ct2 := 0.373 + 0.023*B/T - 0.043*L/100.0;
if GM > 0 then
T1 := 2.0*ct2*B/sqrt(GM)
else T1 := 0.0;
rt1 := 0.73 + 0.6* (Zg - T)/T;
at1 := (0.2 + 0.3*sqr(2.0*T/B) + Zg/B)/(1 + 2.0*T/B);
ct1 := 4.55*Xh/L;
et1 := 0.145 + 0.2*Zg/B + 0.06*B/2.0/T;
bt1 := ((Zh/B) - at1)/et1;
// at1 := 0.3988;
// ct1 := 0.9156;
// bt1 := 0.0301;
// et1 := 0.3240;
Ld := {0.0976}0.2*(1.0 + 2.0*T/B)*sqr(bt1)/((1.0+sqr(ct1))*(1.0 + sqr(ct1) +
sqr(bt1)));
X1 := Tab_X1(B/T);
X2 := Tab_X2(Cb);
Ss := Tab_S(T1);
Kt := 1.0;
Teta_2r := 109.0*Kt*Xf1*Xf2*sqr(rt1*Ss);
if GM > 0 then
delta_K := 0.03* Teta_2r*((1.0 + sqr(ct1))/bt1 - 1.0/et1*(at1 -
Zg/B))*sqr(GM/(1.0 + 2.0*T/B));
if (Ld_max > 0.0) AND (Ld > 0.0) then
Kk2 := sqrt(Ld_max/Ld) - delta_K
else Kk2 := 0.0;
if FlagOut then
begin
case Lang_type of
0 : Child.RichEdit1.Lines.Add('Критерий по рывку буксирного троса =
'+FloatToStrF(Kk2,ffFixed,10,3));
1: Child.RichEdit1.Lines.Add('Criteria of towing =
'+FloatToStrF(Kk2,ffFixed,10,3));
end;
end; // if FlagOut
K2tug:=Kk2;
end;{TowingHeel}
Procedure Seakeeping; {(Vs,Vp:real;var PerdOfRol:real); }
{ Процедура оценки мореходности судна }
begin

```

```

xi:=0; {курсовой угол}
{ Связь бальности моря (SeaState)с расчетной высотой волны (3%
обеспеченности):
if SeaState <= 4 then Heigh_Wave_3:=0.256*exp(1.5*ln(SeaState))
else
if SeaState > 4 then Heigh_Wave_3:=0.064*exp(2.5*ln(SeaState)); }
{ При Heigh_Wave_3:=LognormRand(4,4); медианное значение
Heigh_Wave_3:=4.0 м }
{ SeaState - значение задано исходными данными }
SeaStatS := SeaState;
if SeaStatS = 4 then Heigh_Wave_3:=2 else
if SeaStatS = 5 then Heigh_Wave_3:=3.5 else
if SeaStatS = 6 then Heigh_Wave_3:=6 else
if SeaStatS = 7 then Heigh_Wave_3:=8.5 else
if SeaStatS >=8 then Heigh_Wave_3:=11;
taub:=cos(xi);
PerdOfRol:= 2.7*Heigh_Wave_3/(sqrt(Heigh_Wave_3)+ 0.12*Vs*taub);
{ PeriodofRoll - период бортовой качки }
end;{Seakeeping}
Procedure SpeedP; {(L,B,T,Cb,Cw,Cm,Cp,SHP_ka,EVelocity:real;
var Vs,Vp,TugForce01,TugForceVs,TugForceEV:real);}
{Процедура расчета скорости хода судна на тихой воде при заданной
мощности ЭУ}
label 1;
Begin
Tfs:=T; Ats:=0.2;
EtaRs:=0.95; EtaSs:=0.88; EtaPs:=0.56;
Abts:=0.0; hbs:=0.0;
Zps:= 2.0; Dps:=0.6*T;
Csterns:= 10.0;
Lpps:=L;
Cbs:=Cb;
Cws:=Cw;
Cms:=Cm;
Cps:=Cp;
V1s:=6.0;
Vol1s:=L*B*T*Cb;
DeltaVs:=0.5;
For ju:=1 to 100 do
Begin
Ves:=1852.0/3600.0*V1s; {скорость хода m/s}
if (L < 10.0) then L:=10.0;
Frs:=Ves/sqrt(g*L);
Res:=Ves*L/1.188e-6;

```

```

lgRes:=ln(Res)/ln(10.0);
Xcs:=0.17*(Cbs-0.40);
lcbs:=Xcs*Lpp/L+50.0*(1.0-Lpps/L);
LRs:=L*(1.0-Cps+0.06*Cps*lcbs/(4.0*Cps-1.0));
c13s:=1.0+0.003*Csterns;
tls:=T/L;
tl1s:=T/L-0.02;
f tls < 0.02 then c12s:=0.479948;
if tls < 0.05 then c12s:=48.2*exp(2.078*ln(tl1s))+0.479948;
if tls > 0.05 then c12s:=exp(0.2228446*ln(tls));
k1s:=-1.0+c13s*(0.93+c12s*exp(0.92497*ln(B/LRs))*exp(-
0.521448*ln(0.95-Cps))*exp(0.6906*ln(1.0-Cps+0.0225*lcbs)));
{1. Сопротивление трения корпуса, Rf (кН)}
Cfs:=0.455/exp(2.58*ln(lgRes)); {коэффициент трения корпуса}
SWs:=L*(2.0*T+B)*sqrt(Cms)*(0.453+0.4425*Cbs-0.2862*Cms-
0.00346*B/L+0.3696*Cws)+2.38*Abts/Cbs;
{смоченная поверхность корпуса, м^2}
Rfs:=0.5*Ro*sqrt(Ves)*SWs*Cfs;
{2. Сопротивление выступающих частей, Rapp (кН)}
Sapps:=0.08548*SWs; {0.03030смоченная поверхность выступающих
частей, м^2}
k2s:=2.0; {коэффициент сопротивления выступающих частей}
Rapps:=0.5*Ro*sqrt(Ves)*Sapps*(1.0+k2s)*Cfs;
{3. Волновое сопротивление, Rw (кН)}
if (B/L < 0.11) then c7s:=0.229577*exp(0.33333*ln(B/L))
else if (B/L < 0.25) then c7s:=B/L
else c7s:=0.5-0.0625*L/B;
d_1s:=-0.9;
iEs:= 125.67*B/L-162.25*sqrt(Cps)+234.32*Cps*sqrt(Cps)+0.155087*Xcs;
c1s:= 2223105*exp(3.78613*ln(c7s))*exp(1.07961*ln(T/B))*exp(-
1.37565*ln(90.0-iEs));
if Abts <> 0.0 then
c3s:=0.56*exp(1.5*ln(Abts))/(B*T*(0.31*sqrt(Abts)+Tfs-hbs))
else c3s:=0.0;
c2s:=exp(-1.89*sqrt(c3s));
c5s:=1.0-0.8*Ats/(B*T*Cms);
if (exp(3.0*ln(L))/(Vol1s))<512.0 then c15s:=-1.69385
else
f(exp(3.0*ln(L))/Vol1s)<1227.0 then
c15s:=1.69385+(L/exp(0.3333*ln(Vol1s))-8.0)/2.36
else c15s:=0.0;
m2s:=c15s*sqrt(Cps)*exp(-0.1/sqrt(Frs));
if (L/B)<12.0 then lammdas:=1.446*Cps-0.03*L/B
else lammda:=1.446*Cps-0.36;

```

```

if Cps<0.8 then c16s:=8.07981*Cps-
13.8673*sqr(Cps)+6.984388*sqr(Cps)*Cps
else c16s:=1.73014-0.7067*Cps;
m1s:=0.0140407*L/T-1.75254*exp(1.0/3.0*ln(Vol1s))/L-4.79323*B/L-c16s;
Rws:=
c1s*c2s*c5s*(Vol1s)*g*Ro*exp(m1s*exp(d_1s*ln(Frs)))+m2s*cos(lammdas
/sqr(Frs)); {волновое сопротивление, кН}
Rws:=Rws*1.8; // приближенный переход к буксирам
If Rws<=0.0 then Rws:=0.0;
{4. Волновое сопротивление бульба, Rb (кН)}
Rbs:=0.0;
{5. Сопротивление транца, Rtr (кН)}
FnTs:=Ves/sqrt(2.0*g*Ats/(B+B*Cws));
if FnTs<5.0 then c6s:=0.2*(1.0-0.2*FnTs)
else c6s:=0.0;
Rtrs:=0.5*Ro*sqr(Ves)*Ats*c6s;
{6. Корректировка сопротивления, Ra (кН)}
if (Tfs/L)<=0.04 then c4:=Tfs/L else c4s:=0.04;
Cas:=0.006*exp(-0.16*ln(L+100.0))-
0.00205+0.003*sqr(L/7.5)*sqr(sqr(Cbs))*c2s*(0.04-c4s);
Ras:=0.5*Ro*sqr(Ves)*Sws*Cas; {корректировка сопротивления, кН}
{7. Полное сопротивление судна, Rtot (кН)}
Rtots:= 1.3*(Rfs*(1.0+k1s)+Rapps+Rws+Rbs+Rtrs+Ras);
{8. Буксировочная мощность, Pe, (кВт)}
Pes:=Ves*Rtots;
{9. Мощность ЭУ, NeS (кВт)}
ws:=0.11+0.16/2.0*Cbs*Cbs*sqr(exp(1.0/3.0*ln(Vol1s))/Dps)-0.1*(Frs-
0.2); {коэффициент попутного потока}
t_ws:=0.6*ws*(1.0+0.67*ws); {коэффициент засасывания}
t_ws:=0.23; {для ЕТ винтов в насадке}
// t_ws:=0.22; {для ЕТ открытых винтов }
qs:=1.275/((1.0-t_ws)*sqr(1.0-ws));
kds:=sqr(Dps*Ves);
etads:=1.5/(1.0+sqr(1.0+2.0*qs*Rtots/Gamma/kds)); {КПД движителей}
// if etads < 0.6 then etads:= 0.6;
etaks:=(1.0-t_ws)/(1.0-ws); {КПД корпуса}
etavss:=etaRs*etaSs; {КПД редуктора и валопровода}
SHPCalcs:=Pes/(etads*etaks*etavss); {мощность главного двигателя,
кВт}
//if ((SHPCalcs >= 0.8*SHP_ka) and (SHPCalcs <= 0.85*SHP_ka))then
Vpbp:=V1s;
DeltaSHPs:=(SHP_ka-SHPCalcs)/(SHP_ka);
DeltaV1s:=DeltaVs*DeltaSHPs;
V1s:=V1s+DeltaV1s;

```

```

if SHP_ka-SHPCalcs < 10.0 then goto 1;
End; {For ju:=1 to 100}
1: Vs:=V1s;
Vp:=EVelocity;
// Начало. Расчет тяги ВРК на швартовом режиме и при скоростях хода
буксира Vp и Vs;
{ TugForce01 - тяга 2-х ВРК в швартовом режиме, тонны }
{ TugForceEV - тяга 2-х ВРК при скорости эскортирования EVelocity = Vp
, тонны }
{ TugForceVs - тяга ВРК при скорости полного хода , тонны }
{ Суммарная тяга 2-х ВРК на швартовном режиме, тонны }
TugForce01:=1.07*(0.0141*Ne+5.4438); //Damen
{ Суммарная тяга 2-х ВРК при буксировке со скоростью Vs, кВт }
btf:=-0.0002679528*Vs*Vs*Vs + 0.0052390669*Vs*Vs - 0.0790887837*Vs
+ 0.9999882219;
TugForceVs:=TugForce01*btf;
{ Влияние скорости хода на тягу }
{ Суммарная тяга 2-х ВРК при буксировке со скоростью Vp, кВт }
Vtd:=Vp/Vs*100.0;
Ztd:=- (2.3438228*1e-6)*exp(4*ln(Vtd))+(3.4179099*1e-4)*exp(3*ln(Vtd))
-0.0188832*exp(2*ln(Vtd))-0.1797863*Vtd+99.7844755;
TugForceEV:=100.0*Ne/Ztd/9.815/0.514/Vp; // Гурович
ktf:=-0.0002679528*Vp*Vp*Vp + 0.0052390669*Vp*Vp -
0.0790887837*Vp + 0.9999882219;
TugForceEV:=TugForce01*ktf; //Damen
// Конец. Расчет тяги ВРК при скорости эскортирования Vp=EVelocity;
End; {SpeedP}
Procedure LossSpeedP;{(h3,Vs,Vp,L,Cb:real; var EtaVs,EtaVp:real);}
// Величины потери скорости свободного хода эскортирования на волнении
заданной интенсивности
Begin
VL:=Vs;
ik:=0;
Repeat
ik:=ik+1;
if (L < 10.0) then L:=10.0;
FrshL:= 0.51472*VL/sqrt(g*L);
AFrL:=1.0 + 1.5*exp(-3.0*(FrshL - 0.2));
DeltaL:=2.5*sin(5.0*(L - 50.0)/100.0);
if DeltaL < 0.0 then DeltaL:=0.0;
ACbL:=(1.0+DeltaL)*exp(((L/50.0)*(L/(100.0*sqr(Cb))))+0.3)*ln(L/150.0));
NkL:=1.0+(L-50.0)/100.0;
if h3 < 0.25 then h3:=0.25;
EtaVL:=exp(-AFrL*ACbL*exp(NkL*ln(10.0*h3/L)));

```

```

    if VL=Vs then EtaVs:=EtaVL else EtaVp:=EtaVL;
    VL:=Vp;
    Until ik=2;
    {if FlagOut then
begin
    case Lang_type of 0 :
begin
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Коэффициент потери полной скорости на
    волнении = '+FloatToStrF(EtaVs,ffFixed,10,6)+'
    '+FloatToStrF(Vs,ffFixed,10,6));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Коэффициент потери экономической скорости
    на волнении = '+FloatToStrF(EtaVp,ffFixed,10,6)+'
    '+FloatToStrF(Vp,ffFixed,10,6));
    end;
    1 : begin
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Coefficient of loss of full speed in waves = '+
    FloatToStrF(EtaVs,ffFixed,10,6)+' '+FloatToStrF(Vs,ffFixed,10,6));
    Child.RichEdit1.Lines.Add('Coefficient of loss of economy speed in waves =
    '+FloatToStrF(EtaVp,ffFixed,10,6)+' '+FloatToStrF(Vp,ffFixed,10,6));
    end;
    end; //case
    end; }
End; {LossSpeedP}
Procedure Resistance; {(L,B,T,Cb,Cw,Cm,Cp,Vp:real; var Vs,Nes:real);}
{ Расчет сопротивления ЕТ и мощности ЭУ при скорости свободного
хода}
Begin
    // Cstern = 10; Abt= 0; hbb=0; At =2.075; Tf =3.21 ; Dp=2.24; {OPV1000}
    // PDp =1.25; Zp = 2; EtaP =0.56; {Propeller} etaS=0.90; {Pd/Ps}
    //label label1;
    At:=0.08*Cm*B*T; { Площадь транца }
    Abt:=0; hbb:=0; { Параметры бульба }
    Cstern:=10;
    etaR:=0.95; etaS:=0.88;
    Zp:=2;
    //Tf:=T;
    Vol2:=L*B*T*Cb;
    // Ve:=1852/3600*V; {скорость хода m/s}
    //Начало.Расчет мощности двигателей, затрачиваемой
    // на развитие скорости свободного полного хода Vs=12 узлов;
    //Vs:=12.0;
    Ve:=0.514*Vs;
    if (L < 10.0) then L:=10.0;
    Fr:=Ve/sqrt(g*L);

```

```

Re:=Ve*L/1.188e-6;
lgRe:=ln(Re)/ln(10.0);
Lpp:=L;
Xc:=0.17*(Cb-0.40);
lcb:=Xc*Lpp/L+50*(1.0-Lpp/L);
LR:=L*(1.0-Cp+0.06*Cp*lcb/(4*Cp-1.0));
if T/L>0.05 then c12:=exp(0.2228446*ln(T/L))
else if T/L>0.02 then c12:=48.20*exp(2.078*ln(T/L-0.02))+0.479948
else c12:=0.479948;
c13:=1.0+0.003*Cstern;
k1:=-1.0+c13*(0.93+c12*exp(0.92497*ln(B/LR))*exp(-0.521448*ln(0.95-
Cp))*exp(0.6906*ln(1.0-Cp+0.0225*lcb)));
{1. Сопротивление трения корпуса, Rf (kH)}
Cf:=0.455/exp(2.58*ln(lgRe)); {коэффициент трения корпуса}
SW:=L*(2.0*T+B)*sqrt(Cm)*(0.453+0.4425*Cb-0.2862*Cm-
0.00346*B/L+0.3696*Cw)+2.38*Abt/Cb;
{смоченная поверхность корпуса, м^2}
Rf:=0.5*Ro*sqr(Ve)*SW*Cf;
{2. Сопротивление выступающих частей, Rapp (kH)}
Sapp:=0.03030{0.08548}*SW; {смоченная поверхность выступающих
частей, м^2}
k2:=2.0; {коэффициент сопротивления выступающих частей}
Rapp:=0.5*Ro*sqr(Ve)*Sapp*(1.0+k2)*Cf;
{3. Волновое сопротивление, Rw (kH)}
if (B/L < 0.11) then c7:=0.229577*exp(0.33333*ln(B/L))
else if (B/L < 0.25) then c7:=B/L
else c7:=0.5-0.0625*L/B;
iiE:= 125.67*B/L-162.25*sqr(Cp)+234.32*Cp*sqr(Cp)+0.155087*Xc;
if (iiE > 60.0) then iiE:=60.0;
c1:= 2223105*exp(3.78613*ln(c7));
if (c7 < 0.1) then c1:=0.01;
c1:=c1*exp(1.07961*ln(T/B));
if (iiE < 0.1) then iiE:=10.0;
c1:=c1*exp(-1.37565*ln(90.0-iiE));
if Abt <> 0 then c3:=0.56*exp(1.5*ln(Abt))/(B*T*(0.31*sqr(Abt)+Tf-hbb))
else c3:=0.0; c2:=exp(-1.89*sqr(c3)); c5:=1-0.8*At/(B*T*Cm);
if (Vol2< 10.0) then Vol:=10.0;
if (exp(3.0*ln(L))/(Vol2))<512.0 then c15:=-1.69385
else if (exp(3.0*ln(L))/Vol2)<1227.0 then c15:=1.69385
+(L/exp(0.3333*ln(Vol2))-8.0)/2.36
else c15:=0.0;
m2:=c15*sqr(Cp)*exp(-0.1/sqr(Fr));
if (L/B)<12.0 then lammda:=1.446*Cp-0.03*L/B
else lammda:=1.446*Cp-0.36;

```

```

if Cp<0.8 then c16:=8.07981*Cp-13.8673*sqr(Cp)+6.984388*sqr(Cp)*Cp
else c16:=1.73014-0.7067*Cp;
m1:=0.0140407*L/T-1.75254*exp(0.3333*ln(Vol2))/L-4.79323*B/L-c16;
d_1:=-0.9;
Rw:= c1*c2*c5*(Vol2)*g*Ro*exp(m1*exp(d_1*ln(Fr)))
+m2*cos(lammda/sqr(Fr));
If Rw<=0.0 then Rw:=0.0;
{4. Волновое сопротивление бульба, Rb (кН)}
Rb:=0.0;
{5. Сопротивление транца, Rtr (кН)}
FnT:=Ve/sqrt(2.0*g*At/(B+B*Cw));
if FnT<5.0 then c6:=0.2*(1.0-0.2*FnT)
else c6:=0.0;
Rtr:=0.5*Ro*sqr(Ve)*At*c6;
{6. Корректировка сопротивления, Ra (кН)}
if (Tf/L)<=0.04 then c4:=Tf/L else c4:=0.04;
Ca:=0.006*exp(-0.16*ln(L+100.0))-
0.00205+0.003*sqr(L/7.5)*sqr(sqr(Cb))*c2*(0.04-c4);
Ra:=0.5*Ro*sqr(Ve)*Sw*Ca; {корректировка сопротивления, кН}
{7. Полное сопротивление судна, Rtot (кН)}
Rtot:=Rf*(1.0+k1)+Rapp+Rw+Rb+Rtr+Ra;
{8. Буксировочная мощность, Pe (кВт)}
Pe:=Ve*Rtot;
{9. Мощность ЭУ, NeS (кВт)}
{Dp:=(0.6-0.75)T; Диаметр винта}
Dp:=0.6*T;
{Коэффициент попутного потока}
// w:=0.23; {А.Н.Гурович, Проект. Спасат. Судов w=0.22-0.24}
// w:=0.165*Cb*Cb*sqr(exp(1/3*ln(Vol2))/Dp)-0.3*Cb*(Fr-0.2);
// w:=0.11+0.16/2*Cb*Cb*sqr(exp(1/3*ln(Vol2))/Dp)-0.1*(Fr-0.2);
// w:=0.3095*Cb+10.0*Cb*(1+k1)*Cf-0.23*Dp/sqr(B*T);
w:=0.11+0.16/2.0*Cb*Cb*sqr(exp(0.3333*ln(Vol2))/Dp)-0.1*(Fr-
0.2); {коэффициент попутного потока}
{Коэффициент засасывания}
{А.Н.Гурович, Проектирование Спасательных Судов}
t_w:=0.15-0.18 при свободном ходе и t_w:=0.05-0.07 при буксировке}
t_w:=0.6*w*(1+0.67*w);
// t_w:=0.325*Cb-0.1885*Dp/sqr(B*T);
// t_w:=0.22; {для ЕТ открытых винтов }
// t_w:=0.32; {для ЕТ винтов в насадке}
t_w:=0.15;
q:=1.275/((1.0-t_w)*sqr(1.0-w));
kd:=sqr(Dp*Ve);
etad:=1.5/(1.0+sqr(1.0+2.0*q*Rtot/Gamma/kd)); { КПД движителя }

```

```

// if etad < 0.6 then etad := 0.6;
etak:=(1.0-t_w)/(1.0-w); { КПД корпуса }
etav:=etaR*etaS; { КПД редуктора и валопровода }
Nes:=Pe/(etad*etak*etav); { Мощность главных двигателей, кВт }
Ne1:=Nes/Zp; { Мощность одного главного двигателя
при скорости Vs, кВт }
// Конец. Расчет мощности двигателей, затрачиваемой
// на развитие скорости свободного полного хода Vs;
End; { Procedure Resistance }
Procedure LossSpeed;{(L,Cb,Vs,Vp,:real; var EtaVs, EtaVp:real);}
{ Величина потери скорости на волнении заданного района плавания }
{ SeaState - значение задано исходными данными }
Begin
  SeaStatLS := SeaState;
  if SeaStatLS <= 3 then h3:=1.25 else
  if SeaStatLS = 4 then h3:=2 else
  if SeaStatLS = 5 then h3:=3.5 else
  if SeaStatLS = 6 then h3:=6 else
  if SeaStatLS = 7 then h3:=8.5 else
  if SeaStatLS >=8 then h3:=11;
  Vv:=Vs;
  ii:=0;
  Repeat
  ii:=ii+1;
  Frsh:= 0.51472*Vv/sqrt(g*L);
  AFr:=1.0 + 1.5*exp(-3.0*(Frsh - 0.2));
  Delta:=2.5*sin(5*(L - 50)/100);
  if Delta < 0 then Delta:=0;
  ACb:=(1+Delta)*exp(((L/50)*(L/(100*sqr(Cb)))+0.3)*ln(L/150));
  Nk:=1.0+(L-50)/100;
  if h3 < 0.25 then h3:=0.25;
  EtaVv:=exp(-AFr*ACb*exp(Nk*ln(10*h3/L)));
  if Vv=Vs then EtaVs:=EtaVv else EtaVp:=EtaVv;
  Vv:=Vp;
  Until ii=2;
  if FlagOut then
begin
  case Lang_type of
  0 : begin
  Child.RichEdit1.Lines.Add('Коэффициент потери полной скорости на
волнении = '
+ FloatToStrF(EtaVs,ffFixed,10,6)+' '+FloatToStrF(Vs,ffFixed,10,6));
  Child.RichEdit1.Lines.Add('Коэффициент потери экономической скорости
на волнении = '

```

```

+FloatToStrF(EtaVp,ffFixed,10,6)+' '+FloatToStrF(Vp,ffFixed,10,6));
end;
1 : begin
Child.RichEdit1.Lines.Add('Coefficient of loss of full speed in waves = '
+ FloatToStrF(EtaVs,ffFixed,10,6)+' '+FloatToStrF(Vs,ffFixed,10,6));
Child.RichEdit1.Lines.Add('Coefficient of loss of economy speed in waves = '
+FloatToStrF(EtaVp,ffFixed,10,6)+' '+FloatToStrF(Vp,ffFixed,10,6));
end;
end;{ case }
end; { if FlagOut then }
End; { Procedure LossSpeed }
End.

```

```

Unit ModelSE;
{Модуль математической модели системы уравнений эскорта}
interface
uses
Forms, Dialogs, Buttons, Messages, SysUtils, Controls, Math, ap, spline3,
PowellET;
const
g=9.815;
NumbPoints1 = 18;
type
MyPowell1 = object(OptimPowell1) { MyPowell1 - целевая функция }
function GoalFunction1(var X1: VariablesType):real;virtual;
end;
msv=array[0..NumbPoints1]of extended;
//msv1=array[0..NumbVars1]of extended;
// procedure XAxisGetXVal(Sender: TObject; Serie: TChartSerie; Value:
double; var AValue: string);
var
MyObject1 : MyPowell1;
FileName1 : string;
Rez_Plan1 : text;
NumbRest1 : byte;
SignChoose1 : array[1..NumbRestMax1] of integer;
f_txt1 : TextFile;
f_gen1 : File of real;
FlagOut1 : boolean;
Lang_type1 : integer;
NumbTest1 : integer;
// Form1: TForm1;
{ishodnie dannie - korpus}

```

```

{l,b,}ta,tf,alpfa,delta,bm,xg,zg,GM,v0,v01,
ro,xv0,xvv0,x_nrym,z_nrym,x_vrk,z_vrk:double;
{ishodnie dannie - skeg}
l_s,b_s,ta_s,tm_s,tf_s,alpfa_s,delta_s,bm_s,xg_s,xv0_s,xvv0_s:double;
xb,yb,mb,be:msv;
xb_s,yb_s,mb_s:msv;
xbs,ybs,mbs:msv;
Rx,Ry,MR,Xc,Yc,Mc,Xvrk,Yvrk,Mvrk:msv;
M_krR,M_krYc,M_krYvrk:msv;
L_kr,Teta1,FB,FS,M_kr:msv;
Be_S,Del_S,RopeS:msv;
// FBf,FSf,M_krf : array [1..NumbPoints1] of real;
// Rope_Chart : array[0..72] of extended;
// alpfa_Array_Chart : array[0..72] of integer;
//Rope_Chart, Fb_Chart, FS_Chart, beta_Chart,
//delta_Chart, P_Chart, Teta_Chart : array[0..2*NumbPoints1] of extended;
//alpfa_Array_Chart : array[0..2*NumbPoints1] of integer;
Fx_max,Fy_max,Fx_stop,TugForce02:double;
{koefficienti}
psi2,ala,cmww,cybb,c2,c3,m1,m2,m3,m4,psix, Y_1:double;
psi2_s,ala_s,cmww_s,cybb_s,c2_s,c3_s,m1_s,m2_s,m3_s,m4_s,psix_s:double;
e;
{peremennie}
//i:integer;
output:textfile;
X_arg, Y_Fit, Coeff_x, Coeff_y, Coeff_m : TReal1DArray;
k:double; {угол набегания потока на BPK}
Func1, Rb,rb1,rb2,rb3M, PsinM, del,alf,bet :double;
pcos,psin,zks,zkas:double;
xx,yy,Mz:double;
Func2, f11,f21,f31:double;
MaxSteerPull,BrakeForceMax,HeelMomentMax,RopeAngleMax:real;
X1:double;
k11h:double;
Procedure
SteerForceETug(L,B,T,Hb,Cb,Cw,Cm,Cp,Vp,Xg,Zg,GM,TugForce01,sH,sC
b:real;
var BrakeForceMax,MaxSteerPull,HeelMomentMax,RopeAngleMax:real);
Procedure optim1(Rb,del,alf,bet,x_nrym,x_vrk:double;var
unc1,pcos,psin:double);
Procedure calc1();
//Procedure ETTowing(FB,FS,M_kr:array of extended; NumbPoints1:Integer;
//var BrakeForceMax,MaxSteerPull,HeelMomentMax:real;
RopeAngleMax:Integer);

```

```

implementation
uses
  A1Main,A3ModelET,uRezult,A4FuncOperations,RestrictionsET;
var
  PenaltyAdd1 : double;
  {=====}
  Procedure
    SteerForceETug;{(L,B,T,Hb,Cb,Cw,Cm,Cp,Vp,Xg,Zg,GM,TugForce01,sH,s
    Cb:real;
var BrakeForceMax,MaxSteerPull,HeelMomentMax,RopeAngleMax:real);}
var k_nn: integer;
    NumbStage1 :ShortInt;
    Fmin1,Fx1 :real;
    i,j, Err :integer;
    S :string;
    Ch :TModalResult;
var
    k_n,k_nmax:integer;
    FSmax,FBmax,HMmax : real;
begin
  //try
  {l:=L; b:=B;} ta:=T; tf:=T; alfa:=Cw; delta:=Cb; bm:=0.9*Cm; v01:=Vp;
  Fx_stop:=TugForce01*9.815;
  x_nrym:=0.86*L/2;  z_nrym:=1.79*Hb;  x_vrk:=-0.75*L/2;  z_vrk:=1.1;
  ro:=1.025;
  l_s:=0.59*L; b_s:=0.06*B; ta_s:=0.07*T+sH; tm_s:=sH; tf_s:=0.11*T+sH;
  alfa_s:=0.86; delta_s:=sCb; bm_s:=0.90; xg_s:=0.17*L/2;
  For k_nn:=0 to NumbPoints1 do
begin
  alf:=5*k_nn;
  Calc1();
  FlagOut1 := false;
  NumbTest1:=1;{инициализация объекта}
  MyObject1.Init( Variables1, {массив переменных}
  ScalesVars1, {массив масштабных множителей}
  SignDiscVars1, {массив признаков дискретности переменных:1,иначе: 0}
  ReqrmntDisc1, {1-требование целочисленности включено,0-выключено}
  WeightFactor1, {штрафной коэффициент при целочисленных
ограничениях} ParmtrBeta1, {значение Beta-функции}
  MaxMin1,{MaxMin : shortint; (+1) -поиск минимума, (-1) -максимума}
  NumbRest1, {NumbRest1 : byte; кол-во ограничений модели}
  NumbVars1, {NumbVars : byte; кол-во независимых переменных}
  Convergation1, {Convergation : byte; признак прекращения оптимизации
(2)- ужесточ.штраф} {1-сразу после сходимости}

```

```

{2-процесс повторяется при увелич.штрафе}
PrintOrNo1 {2}, {PrintOrNo : byte; вывод на экран промежут.
результатов}
{0 - вывод промеж. результатов не производить}
{2 - результаты оптимизации по итерациям}
{1 - (2) + значения допусков}
Accuracy1, {Accuracy : real; точн.достиж.экстремума одномерн.поиска}
Accur_Discr1, {точн.достижения целочисленности переменной}
FirstStep1, {FirstStep : real; начальное значение шага по переменным}
FineFactor1); {FineFactor : real; штрафной коэфф. << 1.0}
for I:=1 to NumbVars1 do Variables1[i]:=PowellET.Variables1[i];
MyObject1.Call_OptimPowell1; {вызов процедуры оптимизации методом
Пауэлла} //
for I:=1 to MyObject1.NumbVars1 do
MyObject1.Variables1[i]:=MyObject1.Variables1[i]*MyObject1.ScalesVars1
[i];
//Fmin1:=Target(MyObject1.Variables1); { P—PSP°C‡PμPSPëPμ P|Pα PI
PsPiC,PëPjP°P»CЪPSPsPN₂ C,PsC‡PëPμ P±PμP· CfC‡PμC,P°
C€C,CЪP°C,,PSPsPN₂ PrPsP±P°PIPePë}
RopeS[k_nn]:=MyObject1.Variables1[1]*1;
Be_S[k_nn]:=MyObject1.Variables1[2]*1;
Del_S[k_nn]:=MyObject1.Variables1[3]*1;
Rx[k_nn]:=rb1;
Ry[k_nn]:=rb2;
MR[k_nn]:=rb3M;
Xc[k_nn]:=xx;
Yc[k_nn]:=yy;
Mc[k_nn]:=Mz;
Xvrk[k_nn]:=Pcos;
Yvrk[k_nn]:=Psin;
Mvrk[k_nn]:=PsinM;
f11:=rb1+xx+Pcos;
f21:=rb2+yy+Psin;
f31:=rb3M+Mz+PsinM;
func2:= sqr(f11)+ sqr(f21)+ sqr(f21);
//zkas:=(ta+tf)/2.0*(4.0-b/((ta+tf)/2.0)+0.02*power((b/((ta+tf)/2.0)-5.35),3));
zkas:=1.0*((ta+tf-2*tm_s)/2.0)*(4.0-b/(((ta+tf-
2*tm_s)/2.0))+0.02*power((b/(((ta+tf-2*tm_s)/2.0))-5.35),3));
//zkas:= 0.5*((ta+tf-2*tm_s)/2.0);
M_krR[k_nn]:=-(-
MyObject1.Variables1[1]*sin(degtorad(alf)+degtorad(bet))*z_nrym);
M_krYc[k_nn]:=-splineinterpolation(coeff_y,bet)*zkas;
M_krYvrk[k_nn]:=-psin*z_vrk;

```

```

M_kr[k_nn]:=(-(
MyObject1.Variables1[1]*sin(degtorad(alf)+degtorad(bet))*z_nrym)-
splineinterpolation(coeff_y,bet)*zkas-psin*z_vrk;
//L_kr[k_nn]:=M_kr[k_nn]/(l*b*(ta+tf)/2*delta*ro+l_s*b_s*(ta_s+tf_s)*delta
_s*ro)/9.815;
L_kr[k_nn]:=M_kr[k_nn]/(l*b*(ta+tf)/2*delta*ro)/9.815;
Teta1[k_nn]:=L_kr[k_nn]/GM*57.3;
FS[k_nn]:= MyObject1.Variables1[1]*sin(degtorad(alf));
FB[k_nn]:= - MyObject1.Variables1[1]*cos(degtorad(alf));
    end;
begin
    FSmax := 0;
    for k_n:=0 to NumbPoints1 do
    begin
        BrakeForceMax:= FB[k_n];
        if FS[k_n] >= FSmax then // поиск максимального значения управляющей
            силы
        begin
            FSmax := FS[k_n];
            FBmax := FB[k_n];
            HMmax := M_kr[k_n];
            k_nmax := k_n;
            end; //if
            end;{for k_nn}
        RopeAngleMax := k_nmax*5.0;          // угол буксирного троса,
        соответствующий максимуму управляющей силы
        MaxSteerPull := FSmax;
        BrakeForceMax:= FBmax;
        HeelMomentMax:= HMmax;
        end;
        TugForce02:=Fx_stop/9.815;
        end; // SteerForceETug
        {=====}
        //
        ETTowing(FB,FS,M_kr,NumbPoints1,BrakeForceMax,MaxSteerPull,HeelM
        omentMax, RopeAngleMax); // B A4FuncOperations
        // ETTowig
        Procedure ETTowing;{(FB,FS,M_kr:array of extended; NumbPoints1:Integer;
var BrakeForceMax,MaxSteerPull,HeelMomentMax:real;RopeAngleMax:Integer);
var
    k_n,k_nmax:integer;
    FSmax,FBmax,HMmax : real;
begin
    FSmax := 0;

```

```

    for k_n:=0 to NumbPoints1 do
begin
    BrakeForceMax:= FB[k_n];
    if FS[k_n] >= FSmax then // поиск максимального значения управляющей
        силы
begin
    FSmax := FS[k_n];
    FBmax := FB[k_n];
    HMmax := M_kr[k_n];
    k_nmax := k_n;
    end; //if
    end; {for k_nn}
    RopeAngleMax := k_nmax*5; // угол буксирного троса, соответствующий
        максимуму управляющей силы
    MaxSteerPull := FSmax;
    BrakeForceMax:= FBmax;
    HeelMomentMax:= HMmax;
    end; // ETTowig
    function Penalty(X: VariablesType; Restrictions: RestrictType1;
        NumbRestInEq, NumbRestEq : Integer; FineFactor1 :double):double;
var
    J : integer;
    SumPenalty{, MaxPenalty} : extended;
begin //
    SumPenalty:=0;
    for J:=1 to NumbRestInEq do //C€C,CЪP°C,,PSC<Pμ PrPsP±P°PIPePë Pc
        C†PμP»PμPIPsPN¿ C,,C†PSPeC†PëPë PsC, PsPiCЪP°PSPëC†PμPSPëPN¿
        if Restrictions1[J] < 0.0 then
            SumPenalty := SumPenalty + sqr(Restrictions1[J]/FineFactor1);
            Penalty := SumPenalty;
            end; //Penalty
    function MyPowell1.GoalFunction1(var X1: VariablesType) : real;
        {C†PμP»PμPIP°CЦ C,,C†PSPeC†PëCЦ PïPsP»CЪP·PsPIP°C,PμP»CЦ}
        label 1;
var
    I : integer;
    Func1,DiscPen1, FracX1, BetaFunc1 : double;
begin
    Inc(NumbCallFunc1);
    PenaltyAdd1 := 0;
    for I:=1 to NumbVars1 do X1[I] := X1[I] * ScalesVars1[I];
    { PïPμCЪPμPIPsPr PI CЪPμP°P»CЪPSC<Pμ P·PSP°C†PμPSPëCЦ }
    Rb := X1[1];
    bet := X1[2];

```

```

del := X1[3];
optim1(Rb,del,alf,bet,x_nrym,x_vrk, func1,pcos,psin);
Func1 := Func1;
goto 1;
// funogr1(Restrictions1,refu1);
for I:=1 to NumbRest1 do { внешние штрафные добавки к целевой
  функции задачи решения уравнений движения}
  if Restrictions1[I] < 0.0 then
    Func1 := Func1 + sqr(Restrictions1[I]/FineFactor1);
  //1: if MyObject1.NumbCallFunc1 > 1 then
begin
  Restrictions1[1]:=X1[1];
  Restrictions1[2]:=X1[2];
  Restrictions1[3]:=X1[3];
  Restrictions1[4]:=0.05-func1;
  if NumbRest1 <> 0 then
    PenaltyAdd1:= Penalty(X1,Restrictions1,NumbRest1, 0,FineFactor1); {
    внутренние штрафные добавки к целевой функции}
    PenaltyAdd1:= 0.0;
    end;
    //Result := Func1;
    { PhCтC,PePjPeP·PeCтCтPμPjPePμ PiPμCтPμPjPμPSPSPePμ Pe
    C...P°CтP°PeC,PμCтPeCтC,PePePe CтCтPrPSP° }
    //Func1 := Test1(X1); //Form1.Target(X1); //
    //Func1:=Func1*MaxMin1;
    if NumbCallFunc1 > 1 then
begin
  Func1 := Func1 + PenaltyAdd1;
  {CтCтPμC,C,CтPμP±PsPIP°PSPePNeCтPμP»PsCтPeCтP»PμPSPSPsCтC,
  PePePSPμP·P°PIPeCтPePjCтPj PiPμCтPμPjPμPSPSCтPj}
  if ReqrmtDisc1 > 0 then
begin
  DiscPen1 := 0;
  for I:=1 to NumbVars1 do
begin
  if SignDiscVars1[I] > 0 then { PμCтP»Pe PiPμCтPμPjPμPSPSP°Cт
  CтPμP»PsCтPeCтP»PμPSPSP°Cт }
begin
  FracX1 := frac(X1[I]){ - trunc(X[I])}; { PrCтPsP±PSP°Cт CтP°CтC,CH X
  }
  if (FracX1 < Accur_Discr1) or (FracX1 > 1.0-Accur_Discr1) then BetaFunc1
  := 0 {P·PSP°CтPμPSPePμ Beta-C,,CтPSPeCтPePe}
  else BetaFunc1 := exp(ParmtrBeta1 * ln(4 * FracX1 * (1 - FracX1)));
  DiscPen1 := DiscPen1 + BetaFunc1;

```

```

    end; {if SignDiscVars[I] > 0}
    end; {for I:=1 to NumbVars1}
Func1:=Func1 + DiscPen1*WeightFactor1;
    end;{if ReqrmntDisc1 > 0 then}
    end; {if NumbCallFunc1 > 1}
GoalFunction1 := Func1;
for I:=1 to NumbVars1 do X1[I]:= X1[I]/ScalesVars1[I];
    end; {MyPowell1.GoalFunction}
function Test1(X1: VariablesType):double;
var
    //i : integer;
    //J : integer;
    Func1 :double;
begin //
    Rb := X1[1];
    bet := X1[2];
    del := X1[3];
    optim1(Rb,del,alf,bet,x_nrym,x_vrk, func1,pcos,psin);
    Func1 := Func1;
    if MyObject1.NumbCallFunc1 > 1 then
begin
    Restrictions1[1]:=X1[1];
    Restrictions1[2]:=X1[2];
    Restrictions1[3]:=X1[3];
    Restrictions1[4]:=0.05-func1;
    if NumbRest1 <> 0 then
    PenaltyAdd1:= Penalty(X1,Restrictions1,NumbRest1, 0,FineFactor1);
    end;
    {else }Result := Func1;
    end;
    function vrk_X(Fx_stop,v0,k,del:double):double;
        {Проекция вектора упора BPK на ось OX поточной системы координат,
        по отношению к которой этот вектор отклонен на угол (вета +(-дельта)),
        где вета
        - угол дрейфа буксира, дельта - угол поворота BPK}
        var vv0, k2vrk, st0, vrk_X0, SumThrustV :double;
begin
    // Для BPK Rolls-Royce
    vv0:=v0/0.514;
    st0:= -0.000267952840*power(vv0,3) + 0.005239066935*power(vv0,2)
    - 0.079088783671*vv0 + 0.999988221853;
    SumThrustV:=Fx_stop*st0;
    // y = -0.00000000000088378x6 + 0.00000000030260354x5 -
    0.0000003653956175x4

```

```

//      +      0.0000186310671599x3      -      0.0003921823557040x2      +
0.0020960360694993x + 1.0000000000000000
{y1      =      0.0000000000265632x6      -      0.0000000066365107x5      +
0.0000006127712778x4
- 0.0000262853906108x3 + 0.0005143686824880x2 - 0.0040792454103666x
+ 1.0016876073557900;}
{y2      =      0.0000000000288065x6      -      0.0000000241542072x5      +
0.0000083514138947x4
- 0.0015224972635888x3 + 0.1541482381656530x2 - 8.2041621907960300x
+ 179.8324769022830000;}
{y3      =      0.0000000000447307x6      -      0.0000000111334967x5      +
0.0000010267057095x4
- 0.0000442000183036x3 + 0.0008720471838899x2 - 0.0071141202539593x
+ 1.0025968297119300;}
y4      =      0.0000000000479512x6      -      0.0000000402679269x5      +
0.0000139456093728x4
-      0.0025468141148872x3      +      0.2583393442807310x2      -
13.7764026092697000x + 301.8799509879960000;}
//if del < 91 then
      k2vrk:=      (-0.0000000000088378*power(del,6)      +
0.0000000030260354*power(del,5) //1
      -      0.0000003653956175*power(del,4)      +
0.0000186310671599*power(del,3)
      - 0.0003921823557040*power(del,2) + 0.0020960360694993*power(del,1)
+ 1.0000000000000000);
{k2vrk:=      (0.0000000000447307*power(del,6)      -
0.0000000111334967*power(del,5) //3
      + 0.0000010267057095*power(del,4) - 0.0000442000183036*power(del,3)
+ 0.0008720471838899*power(del,2) - 0.0071141202539593*power(del,1)
      + 1.0025968297119300) }
{k2vrk:=      3.23667517236361E-12*power(k,6)      -      1.74166324915004E-
09*power(k,5)
      +      3.42982475266254E-07*power(k,4)      -
0.0000295960178907581*power(k,3)
+ 0.00103965257808936*power(k,2) - 0.0123332374185878*power(k,1) +
1.0}
//else
{k2vrk:=      (0.0000000000288065*power(del,6)      -
0.0000000241542072*power(del,5) //2
      + 0.0000083514138947*power(del,4) - 0.0015224972635888*power(del,3)
+ 0.1541482381656530*power(del,2) - 8.2041621907960300*power(del,1)
+ 179.8324769022830000); }
{k2vrk:=      (0.0000000000479512*power(del,6)      -
0.0000000402679269*power(del,5) //4

```

```

+ 0.0000139456093728*power(del,4) - 0.0025468141148872*power(del,3)
+ 0.2583393442807310*power(del,2) - 13.7764026092697000*power(del,1)
+ 301.8799509879960000); }
{k2vrk:=0.00000000000323667517236361*power(k,6)
0.00000000174166324915004*power(k,5)
+
0.000000342982475266254*power(k,4)
0.0000295960178907581*power(k,3)
+ 0.00103965257808936*power(k,2) - 0.0123332374185878*k + 1.0;}
//k2vrk:= 1.0;
{x3 = 0.0000000000009995x6 + 0.000000000000301x5 -
0.0000000119839284x4
- 0.0000000005946557x3 - 0.0002433315325547x2 + 0.0000026357246128x
+ 1.0000000000000000 }
if vv0 < 7.0 then //xb6
vrk_X0:= (0.0000000000009995*power(k,6)
0.000000000000301*power(k,5)
- 0.0000000119839284*power(k,4) - 0.0000000005946557*power(k,3)
- 0.0002433315325547*power(k,2) + 0.0000026357246128*power(k,1)
+ 1.0000000000000000)
else if vv0 < 9.0 then //xb8
{x2 = 0.0000000000002672x6 + 0.00000000000085304x5 +
0.0000000087915590x4
- 0.0000001290789546x3 - 0.0004560573933423x2 + 0.0002122502568961x
+ 1.0000000000000000}
vrk_X0:=(0.0000000000002672*power(k,6)+
0.00000000000085304*power(k,5) + 0.0000000087915590*power(k,4)
- 0.0000001290789546*power(k,3)- 0.0004560573933423*power(k,2)
+ 0.0002122502568961*k + 1.0000000000000000)
else if vv0 > 9.0 then //xb10
{x1 = 0.0000000000002497x6 + 0.0000000000004110x5 +
0.0000000200522136x4
- 0.0000000079000530x3 - 0.0007077726833985x2 + 0.0000333949770639x
+ 1.0000000000000000}
vrk_X0:=(0.0000000000002497*power(k,6)
0.0000000000004110*power(k,5)+ 0.0000000200522136*power(k,4)
- 0.0000000079000530*power(k,3)- 0.0007077726833985*power(k,2)
+ 0.0000333949770639*k + 1.0000000000000000);
vrk_X:=SumThrustV*vrk_X0*k2vrk;
end;
{function vrk_y(v0,k:double):double;
begin
if abs(v0-4)<0.2 then

```

```

vrk_x:=fx_max*(-0.000000112*power(k,5)+0.000026004*power(k,4)-
0.001336422*power(k,3)-
0.075792821*power(k,2)+1.040121711*k+161.089844497)/162
else
vrk_x:=fx_max*(-0.000000201*power(k,5)+0.000053504*power(k,4)-
0.004019334*power(k,3)+0.018558593*power(k,2)-
0.045486465*k+122.927371332)/122;
end;}
{x1 = 0.00000000000002497x6 + 0.00000000000004110x5 +
0.0000000200522136x4 - 0.0000000079000530x3 - 0.0007077726833985x2
+ 0.0000333949770639x + 1.0000000000000000
x2 = 0.00000000000002672x6 + 0.000000000000085304x5 +
0.0000000087915590x4 - 0.0000001290789546x3 - 0.0004560573933423x2
+ 0.0002122502568961x + 1.0000000000000000
x3 = 0.00000000000009995x6 + 0.0000000000000301x5 -
0.0000000119839284x4 - 0.0000000005946557x3 - 0.0002433315325547x2
+ 0.0000026357246128x + 1.0000000000000000
y1 = 0.0000000002476112x5 - 0.0000000000002800x4 -
0.0000080583249458x3 + 0.0000000033292680x2 + 0.0770831818392491x
y2 = 0.0000000001534107x5 - 0.0000000001450277x4 -
0.0000052592666737x3 + 0.0000019617689679x2 + 0.0527686644717401x
y3 = 0.0000000000000001x6 + 0.0000000001175612x5 -
0.0000000000017889x4 - 0.0000041073949277x3 + 0.0000000088003690x2
+ 0.0412018582743607x}
{=====}
function vrk_Y(Fx_stop,v0,k,del:double):double;
{Проекция вектора упора ВРК на ось ОУ поточной системы координат,
по отношению к оси ОХ которой этот вектор отклонен на угол (вета +(-
дельта)), где вета
- угол дрейфа буксира, дельта - угол поворота ВРК}
var vv0, k2vrk, st0, vrk_Y0, SumThrustV:double;
begin
// Для ВРК Rolls-Royce
vv0:=v0/0.514;
st0:= -0.000267952840*power(vv0,3) + 0.005239066935*power(vv0,2)
- 0.079088783671*vv0 + 0.999988221853;
SumThrustV:=Fx_stop*st0;
//if del < 91 then
k2vrk:= (-0.00000000000088378*power(del,6) +
0.0000000030260354*power(del,5) //1
- 0.0000003653956175*power(del,4) + 0.0000186310671599*power(del,3)
- 0.0003921823557040*power(del,2) + 0.0020960360694993*power(del,1)
+ 1.0000000000000000);

```

```

{k2vrk:=          (0.0000000000447307*power(del,6)          -
0.0000000111334967*power(del,5) //3
+ 0.0000010267057095*power(del,4) - 0.0000442000183036*power(del,3)
+ 0.0008720471838899*power(del,2) - 0.0071141202539593*power(del,1)
+ 1.0025968297119300)}
{k2vrk:= 3.23667517236361E-12*power(k,6) - 1.74166324915004E-
09*power(k,5)
+3.42982475266254E-07*power(k,4) - 0.0000295960178907581*power(k,3)
+ 0.00103965257808936*power(k,2) - 0.0123332374185878*power(k,1) +
1.0}
//else
{k2vrk:=          (0.0000000000288065*power(del,6)          -
0.0000000241542072*power(del,5) //2
+ 0.0000083514138947*power(del,4) - 0.0015224972635888*power(del,3)
+ 0.1541482381656530*power(del,2) - 8.2041621907960300*power(del,1)
+ 179.8324769022830000); }
{k2vrk:=          (0.0000000000479512*power(del,6)          -
0.0000000402679269*power(del,5) //4
+ 0.0000139456093728*power(del,4) - 0.0025468141148872*power(del,3)
+ 0.2583393442807310*power(del,2) - 13.7764026092697000*power(del,1)
+ 301.8799509879960000);}
{k2vrk:=0.00000000000323667517236361*power(k,6)          -
0.00000000174166324915004*power(k,5)
+          0.000000342982475266254*power(k,4)          -
0.0000295960178907581*power(k,3)
+ 0.00103965257808936*power(k,2) - 0.0123332374185878*k + 1.0;}
//k2vrk:= 1.0;
if vv0 < 7.0 then //yb6
{y3      =      0.0000000000000001x6      +      0.0000000001175612x5      -
0.0000000000017889x4
- 0.0000041073949277x3 + 0.0000000088003690x2 + 0.0412018582743607x
}
vrk_Y0:=          (0.0000000000000001*power(k,6)          +
0.0000000001175612*power(k,5) - 0.0000000000017889*power(k,4)
- 0.0000041073949277*power(k,3) + 0.0000000088003690*power(k,2)
+ 0.0412018582743607*k)
else if vv0 < 9.0 then //yb8
{y2      =      0.0000000001534107x5      -      0.0000000001450277x4      -
0.0000052592666737x3
+ 0.0000019617689679x2 + 0.0527686644717401x }
vrk_Y0:=(0.0000000001534107*power(k,5)-
0.0000000001450277*power(k,4)
- 0.0000052592666737*power(k,3)+ 0.0000019617689679*power(k,2)
+ 0.0527686644717401*k)

```

```

else if vv0 > 9.0 then //yb10
{y1      =      0.0000000002476112x5      -      0.0000000000002800x4      -
0.0000080583249458x3
+ 0.0000000033292680x2 + 0.0770831818392491x }
vrk_Y0:=(0.0000000002476112*power(k,5)-
0.0000000000002800*power(k,4)
- 0.0000080583249458*power(k,3)+ 0.0000000033292680*power(k,2)
+ 0.0770831818392491*k);
vrk_Y:=SumThrustV*vrk_Y0*k2vrk;
end;
{function vrk_y(v0,k:double):double;
begin
if abs(v0-4)<0.2 then
vrk_y:=fy_max*(-0.000000081*power(k,5)+0.000033543*power(k,4)-
0.004687336*power(k,3)+0.114688274*power(k,2)+14.764680654*k-
1.959464839)/660
else
vrk_y:=fy_max*(0.000000215*power(k,5)-0.000029237*power(k,4)-
0.000294552*power(k,3)-0.019362518*power(k,2)+17.658725009*k-
1.160342830)/712.215;
end;}
{=====}
procedure          optim1(Rb,del,alf,bet,x_nrym,x_vrk:double;var
Func1,pcos,psin:double);
var
f1,f2,f3,
temp1,temp2:double;
begin
xx:=splineinterpolation(coeff_x,bet);
yy:=splineinterpolation(coeff_y,bet);
Mz:=splineinterpolation(coeff_m,bet);
//Xc:=xx;
//Yc:=yy;
//Mc:=Mz;
temp1:=vrk_X(Fx_stop,v0,(bet-del),del);
temp2:=vrk_Y(Fx_stop,v0,(bet-del),del);
Pcos:=temp1*cos(degtorad(bet))+temp2*sin(degtorad(bet));
Psin:=-temp1*sin(degtorad(bet))+temp2*cos(degtorad(bet));
rb1:=rb*cos(degtorad(alf+bet));
rb2:=-rb*sin(degtorad(alf+bet));
rb3M:=-rb*sin(degtorad(alf+bet))*x_nrym;
PsinM:=Psin*x_vrk;
f1:=rb1+xx+Pcos;
f2:=rb2+yy+Psin;

```

```

f3:=rb3M+Mz+PsinM;
Func1:=sqr(f1)+sqr(f2)+sqr(f3);
end;
{Проекции составляющих позиционной гидродинамической силы и
позиционного момента на оси системы координат охуz, жестко связанной
с буксиром}
{ETFx:= fbodyforces_x(HullSpeed,Xbmax,bet);
ETFyf:= fbodyforces_y(HullSpeed,Ybmax,bet);
ETMzf:= fbodyforces_m(HullSpeed,Mbmax,bet);}
{Проекции составляющих вектора упора ВРК на оси поточной системы
координат OXYZ}
{ATFXf:= fvrkforces_X(HullSpeed,Thrustall0,bet-del);
ATFYf:= fvrkforces_Y(HullSpeed,Thrustall0,bet-del); }
{Проекции составляющих вектора упора ВРК на оси системы
координат охуz, жестко связанной с буксиром}
{Pox:=ATFXf*cos(degtorad(bet))+ATFYf*sin(degtorad(bet));
Poy:=-ATFXf*sin(degtorad(bet))+ATFYf*cos(degtorad(bet));
Moz:=Poy*XThrustall; }
{Проекции вектора натяжения буксирного троса на оси системы
координат охуz, жестко связанной с буксиром}
{Fropex:=Frope*cos(degtorad(alf+bet));
Fropey:=-Frope*sin(degtorad(alf+bet));
Fropem:=-Frope*sin(degtorad(alf+bet))*XTowingRope;}
{Проекции составляющих вектора упора ВРК на оси системы координат
охуz, жестко связанной с буксиром}
{Проекции всех действующих сил на оси системы координат охуz,
жестко связанной с буксиром}
{f1:=Frope*cos(degtorad(alf+bet))+ETFx+Pcos;
f2:=-Frope*sin(degtorad(alf+bet))+ETFy+Psin;
f3:=-Frope*sin(degtorad(bet+alf))*XTowingRope+ETMz+Psin*XThrustall;
FF1:=Fropex+ETFx+Pox;
FF2:=Fropey+ETFy+Poy;
FF3:=Fropem+ETMz+Moz;}
//YThrustall,ZThrustall
{=====}
procedure koefficient(l,b,ta,tf,alpfa,delta,bm,xg,v0,g:double;
var psi2,ala,cmww,cybb,c2,c3,m1,m2,m3,m4,psix:double);
var a,aa1,bb1,cc1,aa2,bb2,aa3,bb3:double;
fi,lb,fr,tm,TmL,psi1,xg1,U,Dau,U0,Gfi,GG,Gu,Gv0,Gm4,Gs:double;
begin
{if v0 < 4.5 then
delta:=delta*0.55
else
delta:=delta*0.45;}

```

```

fi:=delta/bm;
lb:=l/b;
fr:=v0/sqrt(g*l);
tm:=(ta+tf)/2;
TmL:=tm/l;
psi1:=(ta-tf)/l;
xg1:=xg/l;
{pac4et psi2}
if fr<0.34 then psi2:=0 //a
else if fr<0.42 then begin //6
if xg1<=-0.015 then begin
aa1:=525*sqr(xg1)+32.35*xg1+1.032;
bb1:=345*sqr(xg1)+22.95*xg1-0.661;
cc1:=50.7*sqr(xg1)+3.725*xg1+0.1017;
end
else begin
aa1:=810*sqr(xg1)+24.6*xg1+0.853;
bb1:=-620*sqr(xg1)-19.9*xg1-0.565;
cc1:=121*sqr(xg1)+3.84*xg1+0.0925;
end;
psi2:=aa1*sqr(fr)+bb1*fr+cc1;
end
else if fr<0.46 then begin //B
if xg1<-0.02 then begin
aa1:=-5*sqr(xg1)-0.55*xg1+0.151;
bb1:=2.5*sqr(xg1)-0.055*xg1-0.058;
end
else if xg1<0 then begin
aa1:=-0.375*xg1+0.153;
bb1:=2*sqr(xg1)+0.03*xg1-0.0583;
end
else begin
aa1:=-0.375*xg1+0.153;
bb1:=1.5*xg1*2+0.005*xg1-0.0583;
end;
psi2:=aa1*fr+bb1;
end
else if fr<0.54 then begin //r
if xg1<-0.04 then begin
aa1:=0.75*xg1+0.12;
bb1:=-0.55*xg1-0.043;
end
else if xg1<=0.01 then begin
aa1:=0.5*xg1+0.112;

```

```

bb1:=-0.42*xg1-0.0391;
  end
else begin
  aa1:=0.25*xg1+0.11;
  bb1:=-0.2967*xg1-0.0379;
  end;
psi2:=aa1*fr+bb1;
  end
else if fr>0.61 then begin           //Д
  aa1:=-1.875*xg1-0.1917;
  bb1:=2.4*xg1+0.277;
  cc1:=-0.9083*xg1-0.0730;
  psi2:=aa1*sqr(fr)+bb1*fr+cc1;
  end;                               //
  aa1:=0;
  bb1:=0;
  //cc1:=0;
  a:=0.975+0.054*(psi1+psi2)/TmL;
  ala:=l*tm*a;
  Cmww:=(0.739+8.7*TmL)*(1.61*sqr(a)-2.873*a+1.33);
  {cybb}
  if a>1 then a:=1; //a
  if lb<6 then begin
    if a<0.95 then begin
      aa1:=375*sqr(a)-725.8*a+349.5;
      bb1:=3000*sqr(a)-5702*a+2723;
      end
    else if a<0.97 then begin
      aa1:=150*sqr(a)-293.5*a+141.97;
      bb1:=800*sqr(a)-1560*a+773.5;
      end
    else if a<=1 then begin
      aa1:=-1.137*sqr(a)+0.24*a-0.753;
      bb1:=-4.667*a+17.57;
      end;
    end
  else if lb<8 then begin           //6
    if a<0.95 then begin
      aa1:=1000*sqr(a)-1898*a+900;
      bb1:=1800*sqr(a)-3494*a+1705;
      end
    else if a<0.97 then begin
      aa1:=175*sqr(a)-339.8*a+163.9;
      bb1:=-30*a+38.42;

```

```

end
else if a<=1 then begin
aa1:=-0.5*a-0.485;
bb1:=516.7*sqr(a)-1032*a+523.7;
end;
end
else begin {if lb<=10 then}           //B
if a<0.95 then begin
aa1:=350*sqr(a)-664.5*a+314.96;
bb1:=3600*sqr(a)-6928*a+3339;
end
else if a<0.97 then begin
aa1:=-1.5*a+0.985;
bb1:=2000*sqr(a)-3894*a+1901;
end
else if a<=1 then begin
aa1:=-1.5*a+0.985;
bb1:=316.67*sqr(a)-629.5*a+318;
end;
end;
U:=aa1*lb+bb1;
aa2:=16.67*sqr(TmL)-11.92*TmL+0.06;
bb2:=-261.1*sqr(TmL)+213.6*TmL-2.468;
Dau:=aa2*U+bb2;
aa3:=0.2392*sqr(fi)-0.4009*fi+0.1815;
bb3:=0.4033*sqr(fi)-0.6965*fi+0.3263;
Cybb:=aa3*Dau+bb3;           //
{pac4et c2}
aa1:=54.46*fi-59.43;
bb1:=-31.44*fi+46.8;
U:=aa1*a+bb1;
if U<2 then begin           //a
aa2:=-0.0105*sqr(U)-0.0585*U+0.985;
bb2:=0.06*sqr(U)-0.65*U+2.91;
end
else if U<5 then begin
aa2:=0.001*sqr(U)-0.079*U+0.98;
bb2:=-0.0267*sqr(U)-0.41*U+2.78;
end
else if U>=5 then begin
aa2:=-0.005*sqr(U)-0.015*U+0.81;
bb2:=0.03*sqr(U)-0.89*U+3.764;
end;
Dau:=aa2*LB+bb2;

```

```

if TmL<0.04 then begin                                     //B
aa3:=sqr(TmL)+0.85*TmL+0.0311;
bb3:=-55*sqr(TmL)+7.85*TmL+0.124;
end
else if TmL<0.06 then begin
aa3:=sqr(TmL)+0.615*TmL+0.0405;
bb3:=40*sqr(TmL)-0.1*TmL+0.29;
end
else begin
aa3:=-5*sqr(TmL)+1.05*TmL+0.036;
bb3:=-10*sqr(TmL)+2.5*TmL+0.314;
end;
c2:=aa3*Dau+bb3;                                         //
{pac4et c3}                                              //a
if fi<0.72 then begin
aa1:=24.65*sqr(fi)-29.67*fi+7.547;
bb1:=-60.44*sqr(fi)+74.61*fi-9.255;
end
else if fi<0.95 then begin
aa1:=5.917*fi-5.3;
bb1:=-10.08*fi+20.34;
end;
U:=aa1*LB+bb1;
aa2:=2.569*sqr(TmL)-0.5805*TmL+0.00183;
bb2:=-27.7*sqr(TmL)+6.428*TmL-0.01749;
c3:=aa2*U+bb2;                                           //
{pac4et m1}
U0:=0;
Gfi:=0;
Gv0:=0;
//GG:=0;
Gs:=0;
Gu:=0;
if fi<0.7 then begin                                     //a
U0:=-235.0*sqr(a)+474.2*a-235.8;
Gfi:=-74.67*sqr(fi)+110.9*fi-39.64;
end
else if fi<0.95 then begin
U0:=-210.0*sqr(a)+422.9*a-212.14;
Gfi:=12*sqr(fi)-8.8*fi+1.6817;
end;
U:=U0+gfi;
if U<4 then begin
Gu:=-1.3*U+2.6;

```

```

Gv0:=0.01792*sqr(lb)+0.1275*lb+6.113;
end
else if U>=4 then begin
Gu:=-1.3*U+7.8;
Gv0:=0.02333*sqr(lb)-0.045*lb+1.187;
end;
GG:=Gv0+Gu;
aa1:=-0.1317*sqr(TmL)+0.05358*TmL+0.000181;
bb1:=-2.361*sqr(TmL)+0.8653*TmL-0.000161;
m1:=aa1*GG+bb1; // {pac4et m2}
m2:=-ln(1.023*a)/(11.6*a-9.29); // {pac4et m3}
if a>1 then a:=1;
aa1:=31.26-9.0146*exp(0.066947*lb);
bb1:=8.6245*exp(0.071419*lb)-31.26;
U:=(aa1*a+bb1)/(a-1.029);
aa2:=(exp(8.20939*fi)*0.7728*0.001-1.873)*0.001;
bb2:=(-exp(7.47893*fi)*0.4404*0.01+5.709)*0.01;
m3:=aa2*U+bb2;
Gm4:=0; {pac4et m4}
if TmL<=0.028 then Gm4:=-71.88*sqr(TmL)+4.238*TmL-0.066
else if TmL<=0.04 then m4:=-9.375*sqr(TmL)+0.8875*TmL-0.0212
else if TmL>0.04 then m4:=-3.833*sqr(TmL)+0.415*TmL-0.01117;
if fi<0.55 then fi:=0.55;
if fi>1 then fi:=1;
if fi<0.64 then U0:=-140.62*sqr(fi)+180.62*fi-53.35
else if fi<0.74 then U0:=-56.67*sqr(fi)+75.10*fi-20.2
else if fi<0.85 then U0:=-216.7*sqr(fi)+312.8*fi-108.51
else if fi<0.95 then U0:=-216.7*sqr(fi)+312.8*fi-108.51
else if fi<1.00 then U0:=-216.7*sqr(fi)+312.8*fi-108.51; {fi>0.85 - ?}
if a<0.96 then Gs:=1900*sqr(a)-3696*a+1796
else if a<=1 then Gs:=391.7*sqr(a)-810.4*a+416.4;
U:=U0+Gs;
Gu:=0.00827*U-0.017;
m4:=Gm4+Gu;
psix:=90*(1+70*sqr(1-a));
end;
Procedure Resistance1(l,b,ta,tf,alpfa,delta,bm,v0:double; var xvv0:double);
var Lh,Bh,Th,Cwh,Cbh,Cmh,Cph :double;
VsMh,Vph,Vol2h :double;
Tfh,Ath,Abth,hbulh,Csternh,Zph,Dphs :double;
c1h,c2h,m3h,c3h,c4h,c5h,c6h,c7h,c12h,c13h,c15h,c16h,
d_1h,iiEh,m1h,m2h,lammdah,FnTh :double;
Reh,lgReh,Frh,Rtrh,k11h,k22h,Cfh,SWh,Rfh,Rapph,Rwh,Rbh,
Rah,Rtoth,Nesh,Ne1h,Sapph,

```

```

    Cah,LRh,lcbh,Xch,Lpph,Veh           :double;
Begin
    Lh:=l;
    Bh:=b;
    Th:=(ta+tf)/2;
    Cwh:=alpfa;
    Cbh:=delta;
    Cmh:=bm;
    Cph:=Cbh/Cmh;
    if (Cph > 0.94) then Cph:=0.94;
    VsMh:=v0/0.514;
    Ath:=0.01; { Площадь транца }
    Abth:=0; hbulh:=0; { Параметры бульба }
    Csternh:=10;
    Tfh:=Th;
    Vol2h:=Lh*Bh*Th*Cbh;
    // Начало
    Veh:=0.514*VsMh;
    if (Lh < 10.0) then Lh:=10.0;
    Frh:=Veh/sqrt(g*Lh);
    Reh:=Veh*Lh/1.188e-6;
    lgReh:=ln(Reh)/ln(10.0);
    Lpph:=Lh;
    Xch:=0.17*(Cbh-0.40);
    lcbh:=Xch*Lpph/Lh+50*(1.0-Lpph/Lh);
    LRh:=Lh*(1.0-Cph+0.06*Cph*lcbh/(4*Cph-1.0));
    if Th/Lh>0.05 then c12h:=exp(0.2228446*ln(Th/Lh))
    else if Th/Lh>0.02 then c12h:=48.20*exp(2.078*ln(Th/Lh-0.02))+0.479948
    else c12h:=0.479948;
    c13h:=1.0+0.003*Csternh;
    k11h:=-1.0+c13h*(0.93+c12h*exp(0.92497*ln(Bh/LRh))*exp(-
    0.521448*ln(0.95-Cph))
    *exp(0.6906*ln(1.0-Cph+0.0225*lcbh)));
    {1. Сопротивление трения корпуса, Rf (кН)}
    Cfh:=0.455/exp(2.58*ln(lgReh)); {коэффициент трения корпуса}
    SWh:=Lh*(2.0*Th+Bh)*sqrt(Cmh)*(0.453+0.4425*Cbh-0.2862*Cmh-
    0.00346*Bh/Lh+0.3696*Cwh)+2.38*Abth/Cbh;
    {смоченная поверхность корпуса, м^2}
    Rfh:=0.5*Ro*sqr(Veh)*SWh*Cfh;
    {2. Сопротивление выступающих частей, Rapp (кН)}
    Sapph:=0.03030{0.08548}*SWh; {смоченная поверхность выступающих
    частей, м^2}
    k22h:=2.0; {коэффициент сопротивления выступающих частей}
    Rapph:=0.5*Ro*sqr(Veh)*Sapph*(1.0+k22h)*Cfh;

```

```

{3. Волновое сопротивление,  $R_w$  (кH)}
if (Bh/Lh < 0.11) then c7h:=0.229577*exp(0.33333*ln(Bh/Lh))
else if (Bh/Lh < 0.25) then c7h:=Bh/Lh
else c7h:=0.5-0.0625*Lh/Bh;
//iiEh:=1+89*exp(-power((Bh/Lh),0.80856)*power((1-Cwh),0.30484)*
//power((1-Cph-0.0225*lcbh),0.6367)*power((LRh/Bh),0.34574)*
//power((100*Vol2h/Lh/Lh/Lh),0.16302));
iiEh:=125.67*Bh/Lh-
162.25*sqr(Cph)+234.32*Cph*sqr(Cph)+0.155087*Xch;
if (iiEh > 60.0) then iiEh:=60.0;
if (iiEh < 0.1) then iiEh:=10.0;
c1h:= 2223105*power((c7h),3.78613);
c1h:=c1h*power((90.0-iiEh),-1.37565);
c1h:=c1h*power((Th/Bh),1.07961);
if (c7h < 0.1) then c1h:=0.01;
      if      Abth      <>      0      then
        c3h:=0.56*exp(1.5*ln(Abth))/(Bh*Th*(0.31*sqrt(Abth)+Tfh-hbulh))
      else c3h:=0.0;
c2h:=exp(-1.89*sqrt(c3h));
c5h:=1-0.8*Ath/(Bh*Th*Cmh);
if (Vol2h< 10.0) then Vol2h:=10.0;
if ((Lh*Lh*Lh)/(Vol2h))<512.0 then c15h:=-1.69385
else if ((Lh*Lh*Lh)/Vol2h)<1227.0 then c15h:=-1.69385
+(Lh/exp(0.3333*ln(Vol2h))-8.0)/2.36
else c15h:=0.0;
m2h:=c15h*0.4*exp(-0.034/power((Frh),3.29));
//m2h:=c15h*sqr(Cph)*exp(-0.1/sqr(Frh));
if (Lh/Bh)<12.0 then lammdah:=1.446*Cph-0.03*Lh/Bh
else lammdah:=1.446*Cph-0.36;
      if      Cph<0.8      then      c16h:=8.07981*Cph-
        13.8673*sqr(Cph)+6.984388*sqr(Cph)*Cph
      else c16h:=1.73014-0.7067*Cph;
m1h:=0.0140407*Lh/Th-1.75254*power((Vol2h),0.33333)/Lh-
4.79323*Bh/Lh-c16h;
d_1h:=-0.9;
Rwh:=
c1h*c2h*c5h*(Vol2h)*g*Ro*exp(m1h*power((Frh),d_1h)+m2h*cos(lammdah/sqr(Frh)));
If Rwh<=0.0 then Rwh:=0.0;
{4. Волновое сопротивление бульба,  $R_b$  (кH)}
Rbh:=0.0;
{5. Сопротивление транца,  $R_{tr}$  (кH)}
FnTh:=Veh/sqrt(2.0*g*Ath/(Bh+Bh*Cwh));
if FnTh<5.0 then c6h:=0.2*(1.0-0.2*FnTh)

```

```

else c6h:=0.0;
Rtrh:=0.5*Ro*sqr(Veh)*Ath*c6h;
{6. Корректировка сопротивления, Ra (кН)}
if (Tfh/Lh)<=0.04 then c4h:=Tfh/Lh else c4h:=0.04;
Cah:=0.006*exp(-0.16*ln(Lh+100.0))
-0.00205+0.003*sqr(Lh/7.5)*sqr(sqr(Cbh))*c2h*(0.04-c4h);
Rah:=0.5*Ro*sqr(Veh)*Swh*Cah; {корректировка сопротивления, кН}
{7. Полное сопротивление судна, Rtot (кН)}
Rtoth:=Rfh*(1.0+k11h)+Rapph+Rwh+Rbh+Rtrh+Rah;
xvv0:=Rtoth;
  End; { Procedure ResistanceH }
procedure
sily(l,b,ta,tf,alpfa,delta,bm,xg,v0,g,ro,c2,c3,cybb,ala,psix,m1,m2,m3,m4,xv0:r
eal;
var xb,yb,mb,be:msv); {xv0 - soprotivlenije}
  // Силы в связанной системе координат
  {const pi=3.141593;}
var fi,lb,fr,tm,tml,psi1,xg1,cx0:real;
  xx:extended;
  j:integer;
  xbb,cxb,cyb,cmb,be1:msv;
begin
  fi:=delta/bm;
  lb:=l/b;
  fr:=v0/sqrt(g*l);
  tm:=ta+tf/2;
  tml:=tm/l;
  psi1:=(ta-tf)/l;
  xg1:=xg/l;
  cx0:=xv0/((ro/2)*sqr(v0)*ala);
  if (cx0 > 0.075) then cx0:=0.075;
  for j:=0 to NumbPoints1 do begin
    be[j]:=5*j;
    xx:=cx0/0.075;
    xbb[j]:=(pi-arcsin(xX))*(1-(be[j]/psix)); {ArcSin := ArcTan ( X / Sqrt ( 1 - X
      * X ) )}
    be1[j]:=degtorad(be[j]);
    cxb[j]:=-0.075*sin(xbb[j]);
    cyb[j]:=0.5*cybb*sin(2*be1[j])*cos(be1[j])+c2*power(sin(be1[j]),2)+c3*po
      wer(sin(2*be1[j]),4);
    cmb[j]:=m1*sin(2*be1[j])+m2*sin(be1[j])+m3*(sin(2*be1[j]))*power(sin(2*
      be1[j]),3)+m4*power(sin(2*be1[j]),4);
    xb[j]:=cxb[j]*(ro/2)*sqr(v0)*ala;
    yb[j]:=cyb[j]*(ro/2)*sqr(v0)*ala;

```

```

mb[j]:=cmb[j]*(ro/2)*sqr(v0)*ala*l;
{x_abs[i]:=xb[i]*cos(be1[i])-yb[i]*sin(be1[i]);
y_abs[i]:=yb[i]*cos(be1[i])+xb[i]*sin(be1[i]);
m_abs[i]:=mb[i];}
end;
end;
procedure calc1();
var j:integer;
begin
  {ishodnye vkladka korpus}
  v0:=v01*0.514;
  koeficient(l,b,ta,tf,alpfa,delta,bm,xg,v0,g,psi2,ala,cmww,cybb,c2,c3,m1,m2,
  m3,m4,psix);
  {if v01 < 9 then
  delta_s:=delta_s*0.788
  else
  delta_s:=delta_s*0.885;}
  koeficient(l_s,b_s,ta_s,tf_s,alpfa_s,delta_s,bm_s,xg_s,v0,g,psi2_s,ala_s,cmw
  w_s,cybb_s,c2_s,c3_s,m1_s,m2_s,m3_s,m4_s,psix_s);
  Resistance1(l,b,ta,tf,alpfa,delta,bm,v0,xvv0);
  {if v01 < 9 then
  delta_s:=delta_s/0.788
  else
  delta_s:=delta_s/0.885;}
  Resistance1(l_s,b_s,ta_s,tf_s,alpfa_s,delta_s,bm_s,v0,xvv0_s);
  sily(l,b,ta,tf,alpfa,delta,bm,xg,v0,g,ro,c2,c3,cybb,ala,psix,m1,m2,m3,m4,xvv0
  ,xb,yb,mb,be);
  sily(l_s,b_s,ta_s,tf_s,alpfa_s,delta_s,bm_s,xg_s,v0,g,ro,c2_s,c3_s,cybb_s,ala_
  s,psix_s,m1_s,m2_s,m3_s,m4_s,xvv0_s,xb_s,yb_s,mb_s,be);
  for j:=0 to NumbPoints1 do begin;
  xbs[j]:=xb[j]+xb_s[j];
  ybs[j]:=yb[j]+yb_s[j];
  mbs[j]:=mb[j]+mb_s[j]+yb[j]*xg+yb_s[j]*xg_s;
  end;
  assignfile(output,'rezult1.txt');
  rewrite(output);
  for j:=0 to NumbPoints1 do
  write(output,be[j]:5:2,":3);
  writeln(output);
  for j:=0 to NumbPoints1 do
  write(output,xb_s[j]:5:2,":3);
  writeln(output);
  for j:=0 to NumbPoints1 do
  write(output,yb_s[j]:5:2,":3);

```

```

writeln(output);
for j:=0 to NumbPoints1 do
write(output,mb_s[j]:5:2,".3);
writeln(output);
for j:=0 to NumbPoints1 do
write(output,xb[j]:5:2,".3);
writeln(output);
for j:=0 to NumbPoints1 do
write(output,yb[j]:5:2,".3);
writeln(output);
for j:=0 to NumbPoints1 do
write(output,mb[j]:5:2,".3);
writeln(output);
for j:=0 to NumbPoints1 do
write(output,xbs[j]:5:2,".3);
writeln(output);
for j:=0 to NumbPoints1 do
write(output,ybs[j]:5:2,".3);
writeln(output);
for j:=0 to NumbPoints1 do
write(output,mbs[j]:5:2,".3);
writeln(output);
closefile(output);
{interpol}
SetLength(X_arg, NumbPoints1+1);
SetLength(Y_fit, NumbPoints1+1);
SetLength(Coeff_x, NumbPoints1+1);
SetLength(Coeff_y, NumbPoints1+1);
SetLength(Coeff_m, NumbPoints1+1);
for j:=0 to NumbPoints1 do
begin
  X_arg[j]:=be[j] ;
  Y_fit[j]:=xbs[j] ;
  end;
  BuildAkimaSpline(X_arg,Y_fit,NumbPoints1+1, Coeff_x);
  for j:=0 to NumbPoints1 do
begin
  Y_fit[j]:=ybs[j] ;
  end;
  BuildAkimaSpline(X_arg,Y_fit,NumbPoints1+1, Coeff_y);
  for j:=0 to NumbPoints1 do
begin
  Y_fit[j]:=mbs[j] ;
end;
end;

```

```
BuildAkimaSpline(X_arg,Y_fit,NumbPoints1+1, Coeff_m);  
{Y_1 :=SplineInterpolation(Coeff_y, 15);}  
end;  
end.
```

Додаток Б

База даних ескортних буксирів

№	Назва	Проект	Водотонна ажність, т	Довжина макс., м	Довжина між п'п.,м	Ширина, м	Осадка, м	Висота борту зі скегом м	Висота борту, м	Швидкіст ь, вуз.	Тяга, т	Керуюча сила, т	Потужніс ть ГД, кВт	Екіпаж, чол.	Побудовн ик	Рік побудува ння
1	Пантера	TUG60L	704	30,87	29	11,2	3,93	5,52	4,88	14,5	68,2	81,5	3730	8	Краншип	2010
2	Ягуар	TUG60L	704	30,87	29	11,2	3,93	5,52	4,88	14,5	68,5	81,5	3730	8	Краншип	2010
3	Леопард	TUG60L A	704	30,87	29	11,2	3,93	5,52	4,88	14,5	63,2	80	3730	8	Краншип	2011
4	Панда	TUG55P A	733	30,87	29	11,6	3,95	5,45	4,6	12,5	53	73,1	3000	8	Краншип	2011
5	Капитан Меркулов	TUG31	704	30,87	29	11,2	3,93	5,52	4,88	14,4	67,8	81,5	3730	8	Краншип	2012
6	Барс	TUG50	505,8	27	26,1	10,2	3,8	4,98	4,3	13	51	-	3000	7	Краншип	2010
7	Темрюк	TUG70	849,5	33,45	31,9	12,2	4,1	5,98	4,9	12,5	80,9	101,4	4700	10	Краншип	2012
8	Лигер	TUG31	704	30,87	29	11,2	3,93	5,52	4,98	14,5	64	81,5	3730	8	Краншип	2013
9	Ирбис	TUG31	704,5	30,87	29	11,2	3,93	5,52	4,98	14,5	67,8	81,5	3730	8	Краншип	2014
10	Миракс	TUG31	704	30,87	29	11,2	3,93	5,52	4,98	14,5	69,2	79,5	3730	8	Краншип	2015
11	Диракс	TUG31	729	30,87	29	11,2	3,98	5,52	4,93	14,5	69,2	79,5	3730	8	Краншип	2015
12	Пур	T3150A	731	30,87	29	11,2	4,03	5,51	4,98	14	70,2	83,3	3840	8	Краншип	2016
13	Тамбей	T3150A	731	30,87	29	11,2	4,03	5,51	4,98	14	69,2	83,3	3240	8	Краншип	2016
14	Юрибей	T40105	1715	39,5	35	14	6	7,9	7,1	14,4	96,9	203,4	8088	12	Краншип	2017
15	Надым	T3687	1383	36	33,8	13	5,46	7,8	6,71	13,7	87,4	-	6400	10	Краншип	2018
16	WTUG80		970	35,4	27,9	14	4,6	6,65	5,5	14	80	100	5200	8	Wartsila	-
17	Сатурн	G06L	633	31,6	29	10	3,4	4,8	4,4	12,3	50	-	3080	10	ЧСЗ	2001
18	Юпитер	G06C	650	31,8	29,1	10,5	3,3	4,8	4,2	11,3	35	-	2028	9	ЧСЗ	2000
19	Марс	G06K	656	31,8	29,3	10,4	3,35	4,8	4,35	12	45	-	2760	10	ЧСЗ	2000
20	Н.Kanter	G07B	723	33	30,46	12,1	3,7	5,63	4,6	12,5	55	74	3200	10	ЧСЗ	2004
21	Русич	16609/1	450	28,5	26,5	9,33	3,5	4,8	4,1	11	40	-	2610	8	Пелла	2004
22	Таймень	16609	514	28,5	26,1	9,33	3,3	4,9	4,3	12,5	52	-	3370	8	Пелла	2004
23	Эридан	1233	736	34,2	31,8	12,7	3,7	5,63	4,6	12,5	60	-	3730	10	Пелла	2004
24	Аскольд	21110	930	36,65	33,6	12,5	4,42	6,2	5,72	13,5	64	64	3960	5	Пелла	2005

25	Marshall	TG19	732	37,7	33,6	12,1	3,6	5,7	5,2	12	55	-	3650	6	Hat-San	2018
26	Kamsar	2813	645	27,6	25,8	12,93	4	5,2	6	13	85	75	5050	6	Damen	2018
27	Владимир Иванов	3212	880	32,7	30,6	12,8	4	5,35	5,73	13,3	69	-	4200	8	Damen	2010
28	Mars	3212	793	32,7	30,3	12,8	3,85	5,35	5,6	14,4	82,2	-	5050	8	Damen	2017
29	Малик	3412	900	34,4	31,1	12,82	4	5,75	5,35	13	70	-	4700	6	Damen	2017
30	Suiderzee	2810	564	28,67	26,9	10,43	3,5	4,6	4,91	13,9	61,2	-	3680	6	Damen	2016
31	Тис	2810	531	28,67	26,8	10,43	3,4	4,6	4,72	13,8	63,5	-	3730	6	Damen	2017
32	Геннадий Савельев	2810	612	28,67	27	10,43	4,6	6,2	5,02	12,5	50,2	-	3132	8	Damen	2010
33	Евгений Яковцев	2810	611	28,67	27	10,43	4,6	6,2	4,95	12,8	50,9	-	3132	8	Damen	2010
34	Кижуч	3010	590	29,84	27,6	10,43	3,9	4,6	4,9	13,2	60,1	-	3840	6	Damen	2017
35	70 tBP	-	-	32,6	28,6	13	5	6,1	5,7	12,5	70	-	4044	6	QINGDA O	-
36	80 tBP	-	-	32,6	28,6	13	4,6	6,1	5,7	12	80	-	4412	6	QINGDA O	-
37	65 tBP	-	-	30,8	25,6	11	4,6	6,1	5,2	12	65	-	3678	6	QINGDA O	-
38	65 tBP	-	-	30,8	25,6	11	4	5,7	4,9	12	65	-	3600	8	QINGDA O	-
39	80 tBP	-	-	32,6	28,6	11,6	4,5	6,1	5,7	12,5	80	-	4412	10	QINGDA O	-
40	70 tBP	-	-	30,8	28,6	11	4,6	6,1	5,16	13	70	-	4020	6	QINGDA O	-
41	113 tBP	-	-	36	33,4	13	5,4	6,9	6,5	15	113	122	6000	10	RA	2014
42	62 tBP	-	-	32,5	28,6	11,2	4,1	5	6	13,6	62	-	3660	8	Damen	2002
43	Дир	ПЕ-65	862	33,5	31,5	12,1	4,4	6	5,1	13,5	65	76	3730	8	Пелла	2010
44	RAas2900	RA2900S X	-	29,4	27,6	13,3	4,4	5,5	6,3	12,5	90	-	5400	8	Sanmar	2012
45	RAas3400	RA3400	-	34	31,7	14,5	4,88	6,2	6,4	13	85	-	5440	8	Sanmar	-
46	RAas2800	RA28/60	-	28,2	26,5	12,6	3,9	5,3	4,9	12,5	60	-	3530	8	Sanmar	-
47	RAas2800	RA28/70	-	28,2	26,5	12,6	4	5,3	5,4	13	70	-	4000	8	Sanmar	-
48	RAas2800	RA28/80	-	28,2	26,5	12,6	4,1	5,3	5,7	14	80	-	5050	8	Sanmar	-
49	RAas3200	RA3200S X	-	32	29,8	12,8	4,36	5,37	5,8	14	81	-	5050	8	Sanmar	-
50	IMT60	16610	736	33	31,15	12,1	3,9	5,63	4,8	12	60	70	3200	8	-	-

Додаток В

Авторське свідоцтво на комп'ютерну програму «EscortTug»

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 68522

Комп'ютерна програма "EscortTug"
(вид, назва службового твору)

Автор(и) Нскрасов Валерій Олександрович, Бондаренко Олександр Валентинович, Ястреба Олексій Петрович
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, пр-т Героїв Сталінграду, 9, м. Миколаїв, 54025
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

08.11.2016

Дата реєстрації





Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.о. Голови А.А. Малиш

Додаток Г

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

«Затверджую»

Ректор Національного
університету кораблебудування
імені адмірала Макарова

канд. техн. наук, проф.

Трушляков Є. І.

2020 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Результатів дисертаційної роботи **Ястреби Олексія Петровича**
«Визначення оптимальних головних розмірів ескортних буксирів»

Результати дисертаційної роботи Ястреби Олексія Петровича використовуються в навчальному процесі при викладанні дисципліни «Динаміка корабля та ТЗОО» студентам кораблебудівного навчально-наукового інституту спеціальності «Суднобудування».

Директор кораблебудівного навчально-наукового інституту,
к.т.н., проф.

Бондаренко О. В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ

«АСАБА ДИЗАЙН ЦЕНТР»

Хальнов С. М.

“19” травня 2020 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

результатів дисертаційної роботи Ястреби Олексія Петровича за темою
«Визначення оптимальних головних розмірів ескортних буксирів»

Наукові дослідження, які виконані Ястребою О. П. і відображені в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, присвячені визначенню оптимальних головних розмірів ескортних буксирів знайшли практичне застосування в ТОВ "АСАБА ДИЗАЙН ЦЕНТР" . Розроблені Ястребою О. П. методи розрахунку діючих зусиль, які виникають на корпусі ескортного буксиру під час виконання ескортних операцій, та програма визначення головних розмірів ескортних буксирів «EscortTug» були використані для вдосконалення та розширення функціоналу спеціалізованого програмного забезпечення для розрахунків розмірів буксирів.

Головний конструктор,
заст. директора

Чухно Ю. В.

Додаток Д

Список публікацій за темою дисертації

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, в яких викладено основні наукові результати дисертації

1. Некрасов В.А., Поздеев В.А., Ястреба А.П. Метод определения гидродинамических сил, действующих на буксир, в режимах эскортных операций. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. Миколаїв, 2010. № 6. С. 41–46.
2. Некрасов В.А., Дробот Д.А., Череватенко С.А., Ястреба А.П. Определение характеристик эскортных буксиров на основе данных модельных испытаний в опытовом бассейне Национального университета кораблестроения. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2013. № 1 (37). С. 8–17.
3. Бондаренко А.В., Некрасов В.А., Ястреба А.П. Концепция выбора оптимального состава буксирного флота порта. Водный транспорт: *Збірник наукових праць КДАВТ*. Київ, 2015. № 2 (23). С. 7–14.
4. Бондаренко А.В., Некрасов В.А., Ястреба А.П. Расчетные и нормативные методы повышения эффективности буксирного обеспечения морских портов Украины. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2015. № 3. С. 42–57.
5. Бондаренко А.В., Некрасов В.А., Ястреба А.П. Методика выбора оптимального состава обеспечения порта. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. СПб., 2015. Вып. 4 (32). С. 43–52.
6. Bondarenko O., Nekrasov V., Yastreba O. Effectives harbor tug fleet: problem formulation and methodology of its solution. *Brodogradnja. Shipbuilding*. 2016. № 2. P. 34–46.
7. Bondarenko O., Nekrasov V., Yastreba O. Effectives and optimization of harbor tug fleet. Transport and Telecommunication Institute. Latvia, 2018. № 2. P. 140–150.

8. Yastreba O. Method for determination of escort tugs main dimensions characteristics at conceptual designs stage. Shipbuilding & marine infrastructure. 2018. № 2 (10). P. 27–35.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

9. Дробот Д.А., Череватенко С.А., Некрасов В.А., Ястреба А.П. Оборудование для экспериментального определения характеристик эскортных буксиров и методика пересчета результатов модельных испытаний на натуре. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Другої міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 20-річчю незалежності України* (Миколаїв, 5–7 жовтня 2011 р.). Миколаїв: НУК, 2011 р. С. 88–90.
10. Ястреба А.П. Определение сил , действующих на эскортный буксир, в режиме стационарных эскортных операций. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю* (Миколаїв, 23–25 травня 2012 р.). Миколаїв: НУК, 2012 р. С. 74–76.
11. Дробот Д.А., Череватенко С.А., Некрасов В.А., Ястреба А.П. Совершенствование оборудования опытового бассейна НУК им. адмирала С.О. Макарова. *Експериментальные методы теории корабля. Тезисы докладов II международной научно-технической конференции* (Киев, 20 сентября 2013 г.). Киев: ИГ НАН Украины, 2013 г. С. 19.
12. Некрасов В.А., Бондаренко А.В., Ястреба А.П. Модель функционирования флота портовых буксиров. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали V міжнародної науково-технічної конференції* (Миколаїв, 8–10 жовтня 2014 р.). Миколаїв: НУК, 2014 р. С. 85–87.

13. Некрасов В.А., Ястреба А.П. Формулировка оптимизационной задачи выбора главных размерений эскортного буксира. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 20–22 травня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 46–47.
14. Некрасов В.А., Бондаренко А.В., Ястреба А.П. Современные методы определения эффективности, оптимизации состава и формирования требований к буксирным флотам морских портов Украины. *Морська інфраструктура України: проблеми та перспективи розвитку*: матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції (Миколаїв, 3–4 грудня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 13–24.
15. Некрасов В.А., Демидов Е.Д., Бондаренко А.В., Ястреба А.П. Создание программного обеспечения для определения усилий, действующих на буксир в режимах стационарных эскортных операций. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 12–14 жовтня 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016 р. С. 14–17.
16. Некрасов В.А., Бондаренко А.В., Ястреба А.П. Определение оптимальных главных размерений эскортных буксиров морских портов Украины. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 23–24 травня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018 р. С. 9–7.
17. Ястреба А.П. Основные зависимости характеристик корпуса эскортных буксиров. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з

міжнародною участю (Миколаїв, 20–21 травня 2020 р.). Миколаїв: НУК, 2020 р. С. 85–89.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

18. Некрасов В.О., Бондаренко О.В., Ястреба О.П. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68522 Державної служби інтелектуальної власності України. Комп'ютерна програма «EscortTug». Авторське право і суміжні права, № 43, 2016. Дата реєстрації 08.11.2016.