

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
імені адмірала Макарова

Ястреба Олексій Петрович

УДК 629.5.012

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ  
ЕСКОРТНИХ БУКСИРІВ**

Спеціальність 05.08.03 – Конструювання і будування суден

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2021

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Нєкрасов Валерій Олександрович**,  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, завідувач кафедри теорії та проектування суден

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Кравцов Віктор Іванович**,  
Національний авіаційний університет, м. Київ, професор кафедри машинознавства

кандидат технічних наук, доцент  
**Давидов Ігор Пилипович**,  
Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, завідувач кафедри теорії та устрою судна

Захист відбудеться "14" травня 2021р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: ауд. 360, пр. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: пр. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025, та на сайті: <http://www.nuos.edu.ua/science2/spetsializovani-vcheni-radi/spetsializovana-vchena-rada-d-38-060-02/2021>

Автореферат розіслано "13" квітня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради Д 38.060.02,  
доктор технічних наук, професор

В. В. Зайцев

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

Морські порти мають суттєве значення в зростанні економіки України. Вигідне географічне розташування та загальносвітова тенденція щодо збільшення великотоннажного флоту забезпечує меншу собівартість транспортування вантажів. Проведення днопоглиблення акваторій та підхідних каналів дозволило збільшити тоннаж суден, які обробляються морськими портами. Збільшення тоннажу призводить до підвищення ризиків, які виникають під час підходу таких суден до акваторій морських портів, особливо з точки зору екологічної безпеки. Великі розміри суден ускладнюють маневрування в умовах складного фарватеру та впливу гідрометеорологічних умов, тому потребують буксирного супроводження, яке реалізується за допомогою ескортних буксирів. Функціонування будь-якого морського порту у даний час неможливо без ескортних буксирів. Буксирний флот морських портів України має достатню кількість буксирів, але велика їх частина має вік більше 30 років. До того ж потужність частини цих буксирів не дозволяє забезпечити надійний та безпечний супровід великотоннажних суден.

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 одна робота, в якій розглядається оптимальне проектування портових буксирів неескортного типу. За останні роки кількість ескортних буксирів, які закупляються морськими портами для поповнення своїх буксирних флотів, щороку зростає. Але до сих пір не існує теоретично обґрунтованих рекомендацій щодо оптимального вибору ескортних буксирів для усієї низки небезпечних суден, які заходять у морський порт.

### **У зв'язку з цим 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 основних задач функціонування.

### **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), що виконувались кафедрою теорії та проектування суден Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) 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», що затверджені постановою Кабінету Міністрів України № 137–209–п (редакція від 28.12.2018), «Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року», затвердженій 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 стадії концептуального проектування, який забезпечує найвищий рівень показників їх функціональної та економічної ефективності.

**Завдання дослідження.** Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно вирішити наступні завдання:

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 з небезпечними вантажами на підходах до морських портів, при русі підхідними каналами та в акваторіях морських портів.

**Предмет дослідження** – методи вибору головних елементів ескортних буксирів.

**Методи дослідження.** Представлений у дисертаційній роботі метод є методом концептуального проектування ескортних буксирів, який будується із застосуванням методів теорії корабля та теорії проектування суден. Регресійні залежності відношень головних розмірів, які формують початкову точку оптимізаційного процесу, отримуються за допомогою статистичних методів обробки даних. При формулюванні і розв'язанні задач функціонування і визначенні показників ефективності та надійності ескортного буксира використовуються 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 ін. Дослідження з проектування буксирних суден викладені в роботах Б.В. Богданова, А. Н. Гуровича, А.К. Осмоловського, А. В. Слуцького, М. І. Спітковського, А. П. Страхова, А.А. Родіонова. Дослідження проблем ескортних буксирів відображені в роботах М.Б. Сліжевського, R. G. Allan, H. Nensen, L. Carral Couce, J.C. Carral Couce, J. Artyszuk.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в створенні методу визначення головних розмірів і характеристик ескортних буксирів для стадій 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 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 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.

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

оптимальних головних розмірів на концептуальній (дослідницькій) стадії 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 проектованого судна;

– цей комплекс програм також може бути використаний на етапах розробки техніко-експлуатаційних вимог та техніко-експлуатаційних обґрунтувань 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. У роботах, написаних в співавторстві здобувачеві належить: [1] виведення структурних залежностей діючих на буксир сил в режимах ескортних операцій, [2] розробка обладнання для визначення характеристик моделі ескортного буксира при проведенні буксирувальних випробувань в дослідовому басейні, [3], [5] формування моделей інженерних та навігаційних якостей ескортного буксира, [4], [6], [7] формування комплексного критерію ефективності та надійності ескортного буксира з урахуванням вимог класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій, [8] формулювання 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 VII міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 12–14 жовтня 2016 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 свідоцтво (в співавторстві) на комп'ютерну програму «EscortTug». Комп'ютерна програма «EscortTugForces» рекомендована Регістром судноплавства до практичного використання при присвоєнні буксиру ескортного класу без проведення натурних випробувань після його побудови.

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

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання роботи, відображена наукова новизна і практична значущість роботи, наведено положення, що виносяться на захист.

У першому розділі розглянуто особливості, сучасний стан та перспективи розвитку ескортних буксирів, обґрунтовано необхідність вирішення проблеми концептуального проектування суден цього типу.

У дослідженні питань концептуального проектування увага зосереджена на азимутальних буксирах ASD типу (Azimuthing stern-drive tugs), що обладнані повноповоротними гвинто-рульовими колонками, та отримали найбільше розповсюдження в морських портах усього світу.

Виконано аналіз основних елементів та характеристик буксирів цього типу. На основі створеної здобувачем бази даних по характеристиках 50 варіантів і проектів ескортних буксирів, побудованих з 2000 по 2020 роки в різних регіонах світу, отримано ряд наступних регресійних рівнянь:

$$\begin{aligned} L_{pp} &= 2e^{-0.7N_e^2} - 0,0012N_e + 29,995; & B &= 0,0183L_{pp}^2 - 0,829L_{pp} + 20,237; \\ d &= 0,0382B^2 - 0,6208B + 6,0984; & D &= 0,114d^2 - 0,0965d + 3,2464; \\ FS &= 5e^{-0.6N_e^2} - 0,034N_e - 131,18; & BP &= 0,0124N_e + 17,258. \end{aligned} \quad (1)$$

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

Виконано аналіз методів створення математичних моделей інженерних та навігаційних якостей буксирів, формулювання та розв'язання задач їх функціонування, використання показників економічної ефективності та надійності, формулювання та вирішення оптимізаційної задачі визначення оптимальних головних розмірів буксирів.

За результатами виконаного огляду наукової літератури та узагальнення досвіду проектування і експлуатації буксирів обрано основні напрямки дослідження щодо вдосконалення процесу концептуального проектування ескортних буксирів і сформовано основні завдання дисертаційної роботи.

**Другий розділ** присвячений формулюванню і розв'язанню задачі функціонування азимутального буксира. Азимутальні буксири ASD типу зазвичай використовуються як портові буксири. Додаткова характеристика особливості буксирів цього типу – наявність розвиненого скега, яка дає можливість поділити комплекс його портових функціональних операцій на основну – ескорткування суден на підходах до морського порту ( $k = 0$ ), та допоміжну – супроводження суден по підхідному каналу і акваторії морського порту, участі в операціях кантування та швартування ( $k = 1$ ).

В роботі введено поняття багатоцільового ескортного буксира, у якого до числа допоміжних операцій додано операції участі у гасінні пожеж на судах і в порту ( $k = 2$ ), стягування аварійних суден з мілини ( $k = 3$ ), буксирування аварійних суден ( $k = 4$ ), і участь у ліквідації аварійних розливів нафтопродуктів в акваторії та біля узбережжя порту ( $k = 5$ ). Варіанти роботи ескортного буксира як багатоцільового, передбачають використання лише частини комплексу допоміжних операцій  $k = 2, 3, 4, 5$ .

Для кожної функціональної операції сформульовано задачу функціонування, знайдено способи її розв'язання і визначення відповідних показників надійності виконання операції та її економічної ефективності. При цьому основну задачу функціонування азимутального буксира – задачу ескорткування судна, складено з:

– системи рівнянь руху буксира за судном, що ескортується, в комплексі географічних та гідрометеорологічних умов розташування порту:

$$\sum_{i=1}^n F_{ji}(x_1, x_2, \dots, x_m, t) = 0, \dots j = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

де  $n$  – кількість типів діючих сил;  $m$  – кількість рівнянь системи;  $x_j$  – характеристики руху буксира, та алгоритму розв'язання системи рівнянь руху. Для трансцендентних рівнянь стаціонарного руху буксира за судном використано алгоритм їх розв'язання у вигляді

$$\sum_{j=1}^m \left[ \sum_{i=1}^n F_{ji}(x_1, x_2, \dots, x_m) \right] = 0, \dots j = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

який реалізовано за допомогою одного з алгоритмів нелінійного програмування;

– показника надійності ескортної операції – ймовірності її виконання в комплексі умов розташування порту, та алгоритму обчислення показника надійності:

$$p_0 = \int_0^{V_{\max}} f(V) dV. \quad (4)$$

де  $f(V)$  – щільність ймовірності довготривалого (режимного) розподілу швидкостей вітру в районі розташування морського порту,  $V_{\max}$  – максимальна середня швидкість вітру вітро-хвильового режиму, при якому буксир ще здійснює ескортну операцію;



– показника економічної ефективності функціональної операції  $P = I - R$ , де  $P$  – прибуток,  $I$  – дохід,  $R$  – витрати, та алгоритми їх обчислення.

При цьому показано, що такі показники економічної ефективності як дохід  $I$  і прибуток  $P$  можуть бути коректно обчислені тільки при аналізі функціонування всього флоту буксирів порту. Це обумовлено тим, що окремий буксир в більшості операцій задіяно разом з іншими буксирами різної потужності. Ескортні операції суден різного дедвейту або водотоннажності також виконуються буксирами різної потужності. Тому у якості основного показника економічної ефективності ескортного буксира обрано витрати  $R$ , які мають місце при його роботі як портового буксира з операціями  $k = 0 + k = 1$ , здійснення яких орієнтовано на обслуговування суден певного діапазону дедвейту.

У зв'язку з тим, що водотоннажність або дедвейт суден, що заходять в порт, є випадковою величиною, то і орієнтацію певного ескортного буксира на обслуговування суден певного діапазону дедвейту здійснено виходячи з представлення цієї випадкової величини відповідним законом розподілу.

У другому розділі також вказано, що означені вище допоміжні задачі функціонування ескортного буксира при  $k = 2, 3, 4, 5$  є аналогічними задачам, які було розглянуто в роботах В.О. Некрасова і Ле Куанг Хунга, що присвячені розв'язанню проблем багатофункціонального рятувального буксира.

**В третьому розділі** здійснюється формування моделі інженерних та навігаційних якостей ескортного буксира. До інженерних властивостей ескортного буксира віднесено масове навантаження, місткість та міцність. В якості навігаційних властивостей розглянуто плавучість, остійність, непотоплюваність, ходовість, керованість та морехідність.

1. Масове навантаження. Будування моделі масового навантаження і розкладання його на складові реалізовано за допомогою відомої структури розбиття суднових робіт на складові SWBS (Ship Work Breakdown Structure), в якій масу ескортного буксира у повному вантажу  $\Delta$  представлено у вигляді

$$\Delta = W_{100} + W_{200} + W_{300} + W_{400} + W_{500} + W_{600} + W_{700} + W_F + W_G, \quad (5)$$

де маси:  $W_{100}$  – конструкцій,  $W_{200}$  – пропульсивної установки,  $W_{300}$  – електричної установки,  $W_{400}$  – систем управління та спостереження,  $W_{500}$  – допоміжних систем,  $W_{600}$  – обладнання та фурнітури,  $W_{700}$  – озброєння;  $W_F$  – змінних вантажів ( $W_{F1}$  – палива та масла;  $W_{F2}$  – запасів прісної води;  $W_{F3}$  – екіпажу та провізії;  $W_{F4}$  – баласту) і  $W_G$  – спеціалізованих систем, які визначено за допомогою регресійних рівнянь, що отримані в результаті обробки статистичних даних по існуючих ескортних буксирах в залежності від їх маси в повному вантажу:

$$\begin{aligned} W_{100} &= 0,5192 \Delta - 24,88; & W_{200} &= 0,00004 \Delta^2 - 0,0473 \Delta + 38,53; \\ W_{300} &= 0,00008 \Delta^2 - 0,1004 \Delta + 35,06; & W_{400} &= 0,0008 \Delta + 0,26; \\ W_{500} &= 0,0334 \Delta + 2,07; & W_{600} &= 0,0685 \Delta + 1,12; & W_{700} &= 0; \\ W_{F1} &= 0,1224 \Delta + 13,37; & W_{F2} &= 0,0001 \Delta + 15,00; & W_{F3} &= 0,0025 \Delta - 0,0582; \\ W_{F4} &= 0,0074 \Delta + 12,35; & W_G &= 0,0657 \Delta + 4,55. \end{aligned} \quad (6)$$

2. Місткість. Модель місткості представлено нерівностями об'ємів приміщень буксира, яке побудовано за відомими формулами теорії проектування суден.

3. Плавучість. Властивість плавучості представлено рівнянням плавучості.

4. Міцність та непотоплюваність. Властивості міцності та непотоплюваності не розглядалися, оскільки ескортні буксири, за допомогою яких були складені регресійні залежності мас, задовольняли вимогам класифікаційних товариств відповідно цих властивостей.

5. Остійність. Модель остійності ескортного буксира визначено за допомогою залежностей, які відповідають вимогам класифікаційних товариств щодо забезпечення виконання ескортних та буксирних операцій.

6. Ходовість. Основну увагу в дисертаційній роботі надано формуванню моделі ходовості буксира в режимі ескортної операції, схему якої представлено на рис. 1.

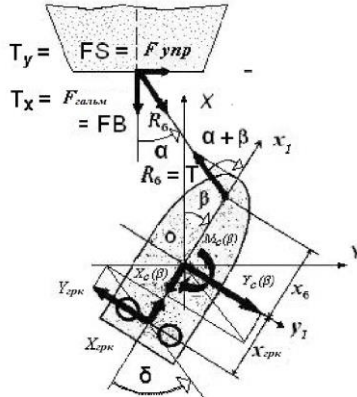


Рисунок 1 – Схема супроводу судна ескортним буксиром:

$R_b$  – зусилля в буксирному канаті;  $x_b$  – відстань до носового буксирного рима;  $\alpha$  – кут буксирного канату;  $\beta$  – кут дрейфу ескортного буксира;  $\delta$  – кут упору гвинто-рульових колонок;  $X_c$  – поздовжня гідродинамічна сила на корпусі ескортного буксира;  $Y_c$  – поперечна гідродинамічна сила;  $M_c$  – гідродинамічний момент;  $X_{грк}$  – поздовжня 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 ( $\beta - \delta$ );  $Y_{грк}$  – 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 ( $\beta - \delta$ );  $x_{грк}$  – відстань до вертикальних осей гвинто-рульових колонок.

Для цього розроблено метод розрахунку характеристик ходовості ескортного буксира, який включає методики визначення гідродинамічних сил, що діють на буксир в режимі ескортної операції, сил, що обумовлені роботою гвинто-рульових колонок, потужності двигунів, які необхідні для забезпечення роботи колонок, складання та розв'язку трансцендентних рівнянь стаціонарного руху буксира.

6.1 Проекції  $X_c(\beta)$ ,  $Y_c(\beta)$  діючої гідродинамічної сили і моменту  $M_c(\beta)$  на осі пов'язані з буксиром системи координат  $ox_1y_1z_1$  (див. рис. 2) представлено у вигляді

$$X_c(\beta) = C_X(\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_L; \quad Y_c(\beta) = C_Y(\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_L; \quad M_c(\beta) = C_M(\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_L L, \quad (7)$$

де  $\rho$  – густина рідини;  $v$  – швидкість буксира;  $A_L$  – занурена площа діаметрального батоксу;  $L$  – довжина по ВЛ.

Коефіцієнти цих проекцій  $C_X(\beta)$ ,  $C_Y(\beta)$  і  $C_M(\beta)$  знайдено в результаті виконання експериментальних досліджень моделей ескортних буксирів в дослідному басейні НУК та використання структурної залежності коефіцієнтів від кута дрейфу  $\beta$ , що змінюється в діапазоні від 0 до 90 град., яка раніше була запропонована Н.І.

Анісімовою при обробці результатів експериментальних досліджень характеристик керованості моделей транспортних суден в аеродинамічній трубі:

$$\begin{aligned} C_x(\beta) &= -0,075 \sin \{ [\pi - \arcsin(C_{x0}/0,075)] [1 - \beta/\psi] \}; \\ C_y(\beta) &= 0,5C_{y\beta} \sin 2\beta \cos \beta + c_2 \sin \beta |\sin \beta|; \\ C_m(\beta) &= C_{m\beta} \cdot \sin 2\beta, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $C_{x0}$  – коефіцієнт опору судна на передньому ходу при швидкості  $v$ ;  $\psi = \psi_1 + \psi_2$  – кут диференту ( $\psi_1, \psi_2$  – статичного і ходового);  $C_{y\beta}, c_2$  і  $C_{m\beta}$  – позиційні похідні коефіцієнтів бічної сили і моменту за кутом дрейфу  $\beta$ , які залежать від геометричних характеристик корпусу. При розгляданні основного тіла корпусу буксира і його скега як єдиного цілого в якості таких характеристик обрані:  $\sigma_d$  – 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  $B$ ;  $L/B$  – відношення довжини  $L$  до ширини  $B$ ;  $C_p$  – коефіцієнт поздовжньої повноти.

Структурна залежність похідних  $C_{y\beta}, c_2$  і  $C_{m\beta}$  від характеристик корпусу буксира з включеним скегом теж прийнята за аналогією зі структурною залежністю коефіцієнтів сил і моментів, яка використовується в теорії керованості суден:

$$\begin{aligned} C_{y\beta} &= \pi (d/L) (a_1/C_p)^{2,5} ((L/B)/a_2)^{0,33} + (\sigma_d - a_3); \\ c_2 &= b_1 (3(d/B))^{0,5} (b_2/C_p)^{1,5} + b_3 (\sigma_d - b_4); \\ C_{m\beta} &= d_1 (d/L) d_2 (d_3 - C_p) + (d_4 - \sigma_d). \end{aligned} \quad (9)$$

Обробка за допомогою цих залежностей даних, представлених вищевказаним рядом ескортних буксирів, які було спроектовано та побудовано в Україні, привела до наступних значень коефіцієнтів  $a_i, b_i$  і  $d_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ):

$$\begin{aligned} a_1 &\approx 0,720; a_2 \approx 2,941; a_3 \approx 0,962; \\ b_1 &\approx 0,722; b_2 \approx 0,853; b_3 \approx 0,851; b_4 \approx 0,953; \\ d_1 &\approx 0,383; d_2 \approx 0,104; d_3 \approx 0,602; d_4 \approx 0,904. \end{aligned} \quad (10)$$

Приклад отриманої розробленим методом апроксимації експериментальних даних по силах в абсолютній системі координат  $OXYZ$ , діючих на корпус буксира при швидкостях його ходу 6, 8 і 10 вузлів, наведено на рис. 2.

6.2 Методику визначення сил, що обумовлені роботою гвинто-рульових колонок, створено на основі апроксимації залежностей проекцій їх упору  $X_{зрк}, Y_{зрк}$  на осі системи координат жорстко пов'язаної з буксиром від кута набігання потоку рідини на гвинто-рульові колонки і швидкості руху буксира, які були надані підприємствами виробниками цієї продукції.

6.3 Необхідну потужність двигунів визначено за допомогою апроксимації залежності відповідної потужності ряду гвинто-рульових колонок від величини їх упору на швартових, яку також надано підприємствами виробниками.

6.4 На основі схеми діючих сил, яка наведена на рис. 1, складено систему стаціонарного руху буксира за судном, що ескортується. Цю систему трансцендентних рівнянь представлено у вигляді

$$\begin{aligned} R_o \cos(\beta + \alpha) + X_c(\beta) + X_{зрк}(\beta - \delta) &= 0; \\ -R_o \cos(\beta + \alpha) + Y_b(\beta) + Y_{зрк}(\delta - \beta) &= 0; \\ -R_o \sin(\beta + \alpha) x_o + M_c(\beta) + Y_{зрк}(\beta - \delta) x_{зрк} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

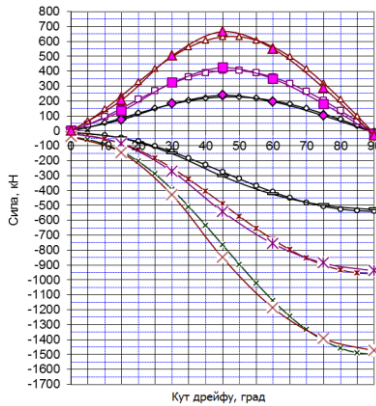


Рисунок 2 – Залежність гідродинамічних сил  $XX$  і  $YY$ , діючих на корпус буксирів TUG60 від кута дрейфу

Апроксимація: —○—  $XX V_s = 6$  вуз., —◇—  $YY V_s = 6$  вуз., —\*—  $XX V_s = 8$  вуз.,  
 —□—  $YY V_s = 8$  вуз., —×—  $XX V_s = 10$  вуз., —△—  $YY V_s = 10$  вуз.  
 Експеримент: ——  $XX V_s = 6$  вуз., експ. НУК., —◇—  $YY V_s = 6$  вуз., експ. НУК.,  
 —\*—  $XX V_s = 8$  вуз., експ. НУК., —□—  $YY V_s = 8$  вуз., експ. НУК.,  
 —×—  $XX V_s = 10$  вуз., експ. НУК., —△—  $YY V_s = 10$  вуз., експ. НУК.

6.5 При заданому значенні швидкості  $V_s$  буксирів і заданому куті буксирного каната  $\alpha$  розв'язок цих рівнянь руху отримано в результаті пошуку глобального мінімуму (нуля) в задачі безумовної оптимізації цільової функції  $F(\beta, \delta, R_\delta)$  незалежних змінних  $\beta, \delta, R_\delta$  наступного вигляду

$$F(\beta, \delta, R_\delta) = \left(\sum F_x\right)^2 + \left(\sum F_y\right)^2 + \left(\sum M_z\right)^2 \quad (12)$$

одним з методів нелінійного програмування – методом Пауелла. У представленому виразі для цільової функції задачі нелінійного програмування (12) компоненти  $\sum F_x, \sum F_y$  і  $\sum M_z$  є лівими частинами рівнянь (11).

Результати розв'язання рівнянь ескортних операцій (11), отриманих викладеним методом, співставлені з даними натурних ескортних випробувань діючих буксирів.

Для ескортного буксирів проекту TUG60LA результати розв'язання рівнянь руху (11) за значеннями керуючої сили  $F_s$ , в яких використані дані викладеного експериментально обґрунтованого методу визначення діючих на корпус буксирів гідродинамічних сил, наведені на рис. 3. На цьому ж рисунку представлені результати натурних випробувань буксирів проекту TUG60LA.

6.6 На основі наведених методів Національним університетом кораблебудування імені адмірала Макарова за замовленням корпорації Transship розроблено програмний комплекс EscortTugForces визначення зусиль та кінематичних характеристик руху буксирів в режимах стаціонарних ескортних операцій, який було схвалено Класифікаційним товариством для використання в якості методики, що дозволяє ще при проектуванні буксирів визначити його клас без проведення натурних випробувань після побудови проекту. Результати розрахунку цим комплексом ескортних характеристик TUG60LA наведено на рис. 4, 5.

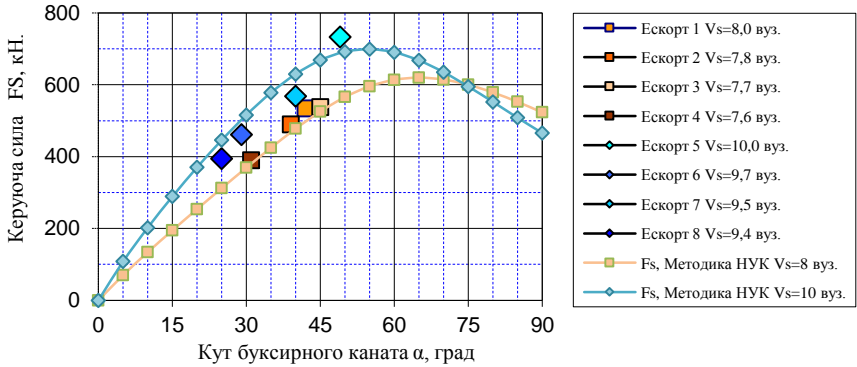


Рисунок 3 – Залежність значень керуючої сили  $F_s$  ескортного буксира проекту TUG60LA від кута буксирного каната, які отримані в результаті натурних ескортних випробувань буксира та обчислень в програмному комплексі EscortTugForces при типових швидкостях руху 8–10 вузлів

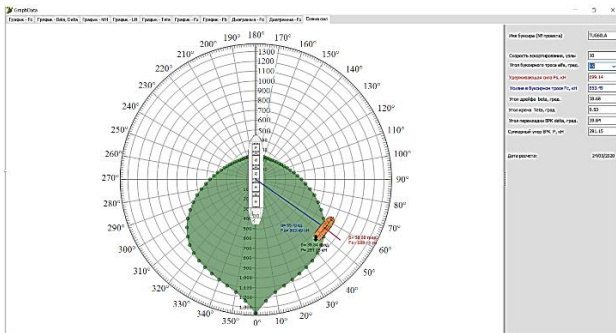


Рисунок 4 – Вікно результатів розрахунку програмним комплексом EscortTugForces характеристик ескорту судна буксиром TUG60LA при  $V_s$  10 вузлів

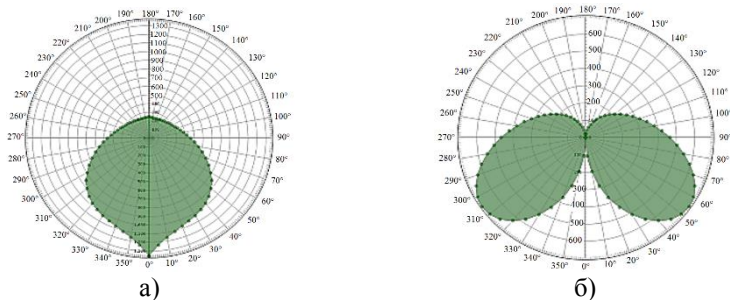


Рисунок 5 – Полярні діаграми отриманої залежності від кута троса  $\alpha$  характеристик стаціонарного ескортного супроводу судна буксиром TUG60LA при  $V_s$  10 вузлів: а) – зусилля  $F_c(\alpha)$  в буксирному тросі; б) – керуючого зусилля  $F_s(\alpha)$

7. Керованість. Додатково до наведених позиційних складових діючих на буксир сил і моментів в модель керованості ескортного буксира в режимі ескортної операції введено вимоги Міжнародної морської організації ІМО щодо забезпечення ескортним буксиром такого значення керуючого зусилля, яке компенсує втрату судном, що ескортується, своєї керованості відносно маневру Зіг-Заг при малих швидкостях руху. Потрібні значення такого зусилля для газозовів і танкерів в залежності від характеристик їх дедвейту наведено на рис. 6.

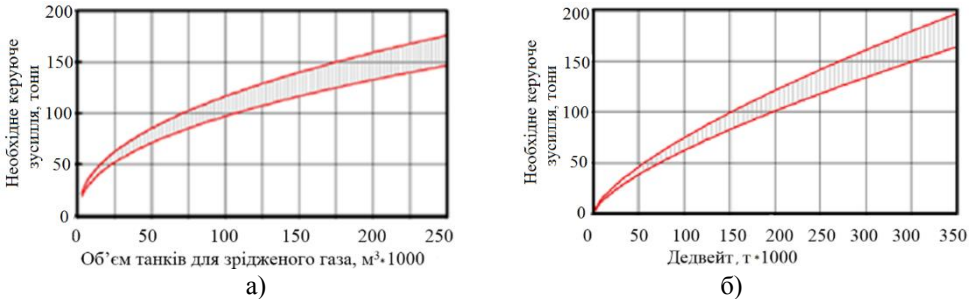


Рисунок 6 – Приклад вимог ІМО до керуючої сили ескортного буксира в залежності від дедвейту судна, що супроводжується, тон: а) газозови; б) танкери

8. Морехідність. При обчисленнях сил і моментів, що діють на буксир в режимі ескортної операції, додатково враховуються вітрові аеродинамічні та хвильові гідродинамічні сили і моменти, які діють на супроводжуване судно, а також на ескортний буксир. При цьому характеристики поривчастого вітру і нерегулярного хвилювання задаються довготривалими режимними розподілами вітру і хвилювання на підходах до акваторії морського порту. Перетворення стаціонарних характеристик вітру і хвилювання в сили і моменти, що діють на ескортний буксир, здійснюється по алгоритмах теорії багатовимірних Марковських процесів, запропонованих В.О. Некрасовим. При цьому задача визначення пульсаційних компонент ескортного супроводу формулюється і вирішується в рамках кореляційної теорії випадкових функцій, яка оперує статистичними моментами першого і другого порядку (математичними сподіваннями і середньоквадратичними відхиленнями). Екстремальні значення діючих сил і моментів оцінюються за правилом «трьох сигм».

При наближеному підході ці компоненти діючих сил визначаються за формулами допоміжної операції супроводу судна  $k = 1$ .

**В четвертому розділі** розглядаються показники ефективності та надійності ескортного буксира. В якості основних критеріїв економічної ефективності та ефективності і надійності обрано критерій мінімуму вартості

$$M[C(U, X)] = \min, \quad (13)$$

та комплексний критерій мінімуму вартості – максимуму надійності

$$\frac{M[C(U, X)]}{P(U, X)} = \min, \quad (14)$$

де  $M[C(U, X)]$  – імовірнісна характеристика (середнє значення) вартості  $C(U, X)$

проектування, побудови, експлуатації та утилізації ескортного буксира на проміжку часу його життєвого циклу, ( $U$  – вектор характеристик умов проектування, побудови та експлуатації,  $X$  – вектор характеристик буксира) що обчислюється за формулою:

$$C(U, X) = CT_{PP} + CT_{II} + CT_{Э} + CT_B + CT_Y, \quad (15)$$

в якій  $CT_{PP}$ ,  $CT_{II}$ ,  $CT_E$ ,  $CT_B$ ,  $CT_Y$  – випадкові величини витрат на проектування, побудову, експлуатацію, відновлення та утилізацію ескортного буксира;  $P(U, X)$  – ймовірність виконання багатоцільовим буксиром обраного комплексу функціональних операцій в заданих умовах експлуатації:

$$P(U, X) = \prod_{i=1}^I P_i, \quad (16)$$

де  $P_i$  – ймовірності виконання ескортним буксиром основної і допоміжних функціональних операцій, що залежать від характеристик випадкового потоку суден, які відвідують морський порт, погодних умов на момент проведення операцій та інших випадкових подій, що пов'язані з аваріями суден.

Згідно з введеною В.О. Некрасовим градацією концептуального проектування суден компоненти  $CT_{PP}$ ,  $CT_{II}$ ,  $CT_B$ ,  $CT_Y$  формули (15) відносяться до так званої продукт-орієнтованої частини цього етапу проектування, яка обумовлюється операціями створення та підтримки життєвого циклу судна в сфері промислового виробництва. Компонента  $CT_E$  є складовою систем-орієнтованого проектування, в якому судно розглядається як складна система призначена для виконання своєї місії.

Ймовірнісні характеристики вартості всіх цих компонент на етапі концептуального проектування визначаються за допомогою співвідношень оцінки вартості CER (Cost Estimation Relationships), які є регресійними залежностями, що отримані в результаті обробки статистичних даних при побудові, експлуатації, реновації та утилізації суден певного типу. В основу системи CER покладається вказана вище структура SWBS. В таблиці 1 наводяться дані оцінки вартості проектування та побудови отриманого оптимального проектного рішення ескортного буксира ОПТУГ для супроводу суден дедвейтної групи 50 000...70 000 тон, що оснований на використанні структури SWBS (5), яка задана регресійними рівняннями (6), та регресійними залежностями оцінки **мінімальної** вартості праці і матеріалів (MIN CER та ECER праці та матеріалів), що використовуються на сучасній середнє європейській суднобудівній верфі.

**У п'ятому розділі** наводиться формулювання оптимізаційної задачі концептуального проектування ескортного буксира.

У найбільш загальному вигляді таке завдання для суден різних типів сформульовано в роботах В.О. Некрасова. Реалізація формулювання такого завдання з урахуванням побудованих моделей якостей ескортного буксира, моделей його функціонування, показників ефективності та надійності є наступною проблемою нелінійного програмування при наявності функціональних і тривіальних обмежень.

Необхідно знайти мінімум цільової функції (14):

$$ЦФ(U, X) = \frac{M[C(U, X)]}{P(U, X)} \rightarrow \min, \quad (17)$$

Таблиця 1 – Результати використання регресійних залежностей розширених (Expanded) систем SWBS та CER при оцінці вартості проектування і побудови багатопільового ескортного буксира ОПТУГ

I	Найменування розділів SWBS	576 т	Співвідношення вартості (CER)					
			SWBS, т	CER праці, люд. год./т	Обсяг праці люд. год.	Оплата праці \$/год	Витрати на працю, \$	CER матеріалів, \$/т
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
	<b>Сума 100-700</b>	417.60						
F	Паливо, вода, екіпаж, постачання, баласт	88.41						
G	Спецобладнання	70.45	89	6270	15	94050.75	11000	774950
	<b>Сума</b>	<b>576.46</b>		<b>28042</b>		<b>420636</b>		<b>4710844</b>
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
	<b>Сума</b>					<b>1051590</b>		<b>4993494</b>
800	Вартість робіт з проектування та планування виробництва верфі	15%				906763		
900	Вартість робіт верфі з побудови, випробувань і здачі буксира замовнику	15%				906763		
	<b>Вартість буксира</b>					<b>7858609</b>		

при обмеженнях:

$$\begin{aligned}
 E_n(X) &\geq 0, & n &= 1, 2, 3; \\
 F_k(X) &\geq [F_k], & k &= 1, 2, \dots, K; \\
 PC_l[Pt] &\leq [PC_l], & l &= 1, 2, \dots, L; \\
 X &\leq X_q, & q &= 1, 2, \dots, Q,
 \end{aligned} \tag{18}$$

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 морехідність буксира;

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

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

$[PC]$  – 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 ГД, тип і склад спеціального обладнання, чисельність екіпажу  $N_{EK}$ , автономність плавання  $N_{AB}$ , район плавання з його погодними умовами, швидкість ескортування, морехідність. Значення цих величин вважаються або заданими замовником, або приймають 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.

За незалежні змінні оптимізаційної задачі концептуального проектування ескортного буксира приймаються наступні параметри:  $x_1 = L$  – довжина буксира;  $x_2 = B$  – ширина;  $x_3 = d$  – осадка;  $x_4 = D$  – висота борту;  $x_5 = C_B$  – 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 обмеження типу

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

де  $n = 8$  – кількість незалежних змінних в даній роботі (табл. 2).

Таблиця 2 – 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 борта, м	$x_4$	3,5	8
Коефіцієнт загальної повноти	$x_5$	0,42	0,6
Потужність головних двигунів, кВт	$x_6$	2000	8500
Висота скега, м	$x_7$	0,5	2
Коефіцієнт загальної повноти скега	$x_8$	0,4	0,9

Розглянуті в таблиці 2 двосторонні обмеження замінюються односторонніми тривіальними обмеженнями:

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

Функціональні обмеження оптимізаційної задачі визначаються вимогами до характеристик морехідних якостей. До основних функціональних обмежень даної задачі відносяться:

– рівняння плавучості

$$\Delta = \sum W_i,$$

де  $\Delta$  – 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 буксирування

$$K_s = \sqrt{\frac{b+c}{a+c}} \geq 1,0,$$

де  $a$  – площа, обмежена кривою  $l(\theta)$  відновлюваних плечей діаграми статичної остійності, прямою, відповідною плечу  $(l+l_h)$ , і кутом крену  $\theta_1 - \theta_{2r}$ ;  $b$  – площа, обмежена кривою  $l(\theta)$  відновлювальних плечей ДСО, прямою, що відповідає плечу  $(l+l_h)$ , кутом максимуму діаграми  $\theta_{max}$  або кута заливання  $\theta_f$ ;  $c$  – площа, обмежена кривою  $l(\theta)$  плечей діаграми і, прямою, що відповідає плечу  $(l+l_h)$ .

– для ескортних буксирів при урахуванні плеча максимального кренувального моменту додатково враховується наступні вимоги:

$$A \geq 1,25B; C \geq 1,4D; \Theta_e \leq 15^\circ,$$

де  $A, B, C, D$  – площі під кривими відновлюваних плечей та плечей кренувального моменту, які обумовлюються вимогами класифікаційних товариств;

– обмеження значень параметрів діаграми статичної остійності

$$l_{\max} \geq 0,25; \theta_{\max} \geq 30; \theta_{\text{зак}} \geq 60,$$

де  $l_{\max}$  – максимальне плече діаграми статичної остійності, м;  $\theta_{\max}$  – 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 у вигляді залежностей, представлених на рис. 6;

– 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 необхідністю виконання умов комфорту, с;  $\tau$  – власний період хитавиці судна, с.

Усі перераховані вище функціональні обмеження представлені односторонніми нерівностями типу  $g_j(X, U) \geq 0$ . Для цього використано наступні формули:

$$g_j(X, U) = \frac{A_j}{a_j(X)} - 1, \text{ при } a_j(X) \leq A_j; \quad g_j(X, U) = \frac{a_j(X)}{A_j} - 1, \text{ при } a_j(X) \geq A_j,$$

де  $a_j(X)$  – значення характеристики судна, що отримане в результаті розрахунків.

Система обмежень, що формує допустиму область пошуку рішення оптимізаційної задачі визначення основних характеристик ескортного буксира, включає 39 рівнянь та нерівностей.

Розв'язок сформульованої оптимізаційної задачі здійснюється за допомогою відомого методу нелінійного програмування – методу Пауелла пошуку мінімуму цільової функції, в якому тривіальні і функціональні обмеження враховуються за допомогою методу штрафних функцій. Схема розв'язку цієї оптимізаційної задачі на етапі дослідницького проектування представлена на рис. 7.

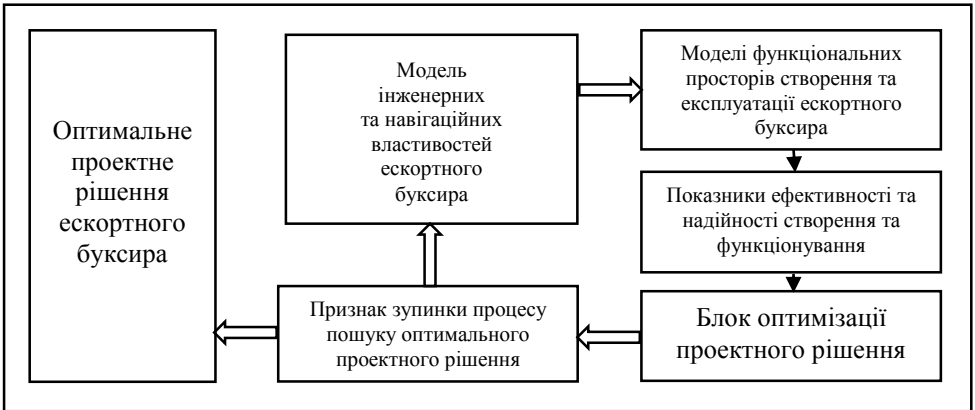


Рисунок 7 – Блок-схема пошуку розв'язку задачі оптимального синтезу ескортного буксира для умов його створення та експлуатації

**У шостому розділі** розглянуто результати вирішення оптимізаційної задачі концептуального проектування ескортного буксира для заданого діапазону дедвейту суден, які відвідують морські порти України.

Приклад реалізації вибору на етапі концептуального проектування головних розмірів оптимального буксира ОПТУГ для ескортного супроводження танкерів з діапазоном їх дедвейту  $DWt = [50\ 000 \dots 70\ 000]$  т в гідрометеорологічних умовах морських портів Північно-Західного району Чорного моря наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Результаті розв'язання оптимізаційної задачі вибору головних елементів багаточільового 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 близьким до нього із існуючих

<b>1. Головні розміри та характеристики</b>	<b>ОПТУГ</b>	<b>TUG60L</b>
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 <sup>3</sup>	559,2	644,0
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	<b>63,0</b>	<b>68,5</b>
Максимальне значення керуючої сили, тони	<b>62,3</b>	<b>72,9</b>
Відповідне гальмівне зусилля, тони	<b>-43,6</b>	<b>-51,0</b>
Кут буксирного троса, що відповідає максимуму керуючої сили, град	<b>55,0</b>	<b>55,0</b>
<b>2. Експлуатаційні показники:</b>		
Середня тривалість портової операції буксира (ескортування судна, супровід його по підхідному каналу, транспортування по акваторії порту, швартування/відшвартування), доба	0,18	-
Потрібне середнє значення керуючої сили буксира для обраної групи суден, які відвідують морський порт, тони	<b>54,5</b>	-
Потрібне максимальне значення керуючої сили буксира для цієї ж групи суден, які відвідують морський порт, тони	<b>62,3</b>	-
<b>Імовірнісні характеристики ескортних операцій:</b>		
Імовірність реалізації портової операції за погодними умовами порту	0,990	-
Імовірність ескорту судна обраної групи по керуючій силі буксира	1,000	-
Сумарна імовірність ескорту обраної групи суден	0,990	-
<b>Імовірнісні характеристики допоміжних операцій:</b>		
Імовірність прибуття ЕБ на місце аварії	0,932	-
Імовірність прибуття ЕБ на місце розливу нафтопродукту	0,932	-
Імовірність прибуття ЕБ на місце пожежі на аварійному судні	0,931	-
Імовірність зняття буксиром аварійного судна з мілини	0,527	-
Імовірність буксирування аварійного судна в базу	0,376	-
Імовірність ліквідації розливів нафтопродуктів	1,000	-
Імовірність водогасіння буксиром пожежі на аварійному судні	0,081	-
Імовірність піногасіння буксиром пожежі на аварійному судні	1,000	-
Імовірність водопіногасіння буксиром пожежі на аварійному судні	0,311	-
Сумарна ймовірність виконання допоміжних операцій	0,530	-
<b>3. Узагальнені експлуатаційно-економічні показники:</b>		
Собівартість добового отримання, \$/доба	857,57	-
Мінімальний тайм-чартерний еквівалент при фрахті, \$/доба	2613,1	-
Вартість проектування та побудови, млн \$	7,86	-
Вартість життєвого періоду, млн \$	17,26	-

В результаті розв'язання по критерію максимуму надійності при мінімумі витрат оптимізаційної задачі визначення головних розмірів і характеристик багатопільового буксира з основною функціональною операцією – ескорт танкерів дедейтом 50000...70000 т в умовах морських портів Північно-Західного району Чорного моря – отримано буксир, розміри та характеристики якого виявилися близькими до характеристик існуючого азимутального буксира ASD типу з тяговим зусиллям 68,5 т.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано низку задач, які забезпечили досягнення поставленої мети наукового дослідження – створення методу визначення головних розмірів і характеристик ескортних буксирів при їх концептуальному проектуванні:

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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### *Публікації, в наукових фахових та міжнародних виданнях*

1. Некрасов В. А., Поздеев В. А., Ястреба А.П. Метод определения гидродинамических сил, действующих на буксир, в режимах эскортных

- операцій. *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. *Експериментальні методи теорії корабля. Тезиси докладов II міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 20 вересня 2013 г.)*. Київ: ІГ НАН України, 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. Ястреба О. П. Комп'ютерна програма «EscortTug» / В. О Некрасов // (Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 68522 від 08.11.2016) / Авторське право і суміжні права, № 43, 2016.

**АНОТАЦІЯ**

Ястреба О. П. Визначення оптимальних головних розмірів ескортних буксирів.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 – конструювання та будовання суден. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2021.

Метою дисертаційного дослідження є розробка методу вибору оптимальних головних розмірів ескортних буксирів на стадії концептуального проектування, який

забезпечує найвищий рівень функціональної та економічної ефективності буксирів цього типу.

Розроблено модель інженерних 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.

Сформульовано задачі функціонування багатоцільового ескортного буксира, в яких основною функціональною операцією обрано обслуговування певним буксиром певного діапазону дедвейту сукупності суден різних типів, які прибувають в морський порт. Надано метод розв'язання основної задачі функціонування.

Обрано комплексний критерій економічної ефективності і надійності виконання буксиром основних функціональних операцій, в який включені вимоги класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки ескортних операцій.

Розроблено метод концептуального проектування ескортного буксира на основі включення в оптимізаційну задачу вибору його головних розмірів і характеристик створених моделей інженерних та навігаційних якостей, задач функціонування та комплексного критерію ефективності та надійності.

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

## SUMMARY

Yastreba O.P. Determination of optimal principal particulars of escort tugs.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.08.03 – designing and building of ships. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2021.

The purpose of the dissertation research is to develop a method for selecting the optimal principal particulars of escort tugs at the stage of conceptual design, which provides the highest level of functional and economic efficiency of this type tugs.

A model of engineering and navigation qualities of an escort tug has been developed, in which a method of determining the hydrodynamic forces acting on the tug hull is developed on the basis of data of towing tests of such tugs in the towing tank of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

The problems of functioning of a multi-purpose escort tug are formulated, in which the main functional operation is the service by the certain tug the certain range of tonnage of a set of ships of different types arriving in a seaport. The method of solving the main problem of functioning is given.

A complex criterion of economic efficiency and reliability of the main functional operations of the tug was chosen, which includes the requirements of classification societies to ensure the safety of escort operations.

The method of conceptual design of the escort tug is developed on the basis of inclusion in the optimization problem of a choice of its principal particulars and characteristics of the created models of engineering and navigation qualities, problems of functioning and complex criterion of efficiency and reliability.

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



## АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Підписано до друку 02.04.2021. Формат 60x84/16.  
Гарнітура "Таймс". Друк офсетний. Ум. друк. арк. 0,9.  
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 298.

---

Поліграфічне підприємство СПД Румянцева Г. В.

54038, м. Миколаїв, вул. Бузника, 5/1.

Свідоцтво МК № 11 від 26.01.2007 р.