

10.31653/smf50.2025.26-41

Голіков В.А., Данилов К.С., Шумілова К.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

**ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНТЕЙНЕРОВИЗІВ НА
МІЖКОНТИНЕНТАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ****Постановка проблеми в загальному вигляді.**

Система Silverstream® – це система повітряного змащення. Вона складається з комплексу компресорів, які подають повітря до набору блоків випуску повітря (ARU), зазвичай встановлених у плоскому низу корпусу через трубопровідну мережу з дистанційно керованими клапанами. Вимоги до повітряного потоку блоків ARU залежать від осадки та швидкості судна. Тиск, який повітря має подолати, приблизно дорівнює гідростатичному тиску води під корпусом, з додатковим запасом для подолання втрат на тертя в трубопровідній системі. Система Silverstream® налаштована на автоматичний запуск, коли судно досягає специфічної мінімальної швидкості, за якої її застосування є вигідним. Система автоматично зупиняється, як тільки швидкість падає нижче цього порогу.

Запит практики: необхідність оптимізації руху судна для зниження загального опору корпусу, зменшення потужності енергетичної установки (ЕУ) та підтримання заданої швидкості на маршруті для безпечного керування судном.

Об'єкт дослідження – процес руху судна морськими шляхами.

Предмет дослідження – параметри руху судна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Ефективність використання технології повітряного змащення Silverstream підтверджено такими відомими компаніями, як Grimaldi Group, Carnival Corporation, а також Shell Trading, які повідомляють про скорочення викидів, витрат на паливо та енергоефективність флоту [1].

Система Silverstream змінює взаємодію між хвилею та судном і створює килим з мікро-пухирців, який покриває днище судна, в результаті чого зменшується опір тертя, що значно знижує витрату палива та пов'язані з цим викиди. Таке інноваційне рішення використовує силу повітря [2].

В джерелі [3] представлено унікальні особливості системи повітряного змащення, а саме: 5-10% чистої економії палива та викидів; зниження опору тертя (плоского дна); зсув рідини (унікальна особливість); зниження потужності валу + збільшення швидкості судна; паливо-агностичне рішення (економія енергії незалежно від типу палива); проста установка; нове будівництво та модернізація в звичайному сухому доці; міцні та елегантні (в т.ч. запатентовані ARU); управління та автоматизація в залежності від швидкості судна/осадки.

Актуальність проблеми скорочення викидів парникових газів розглянуто в дослідженні [4]. Проаналізовано потенційну економію енергії завдяки застосуванню технології повітряного змащення на торгових судах. В роботі запропоновано спрощену емпіричну модель, яка охоплює три різні технології повітряного змащення, на основі експериментальних результатів і припущень, прийнятих в існуючих дослідженнях. Зазначено, що площа поверхні днища судна, покрита повітрям, важлива для ефективності системи повітряного змащення, згідно з аналізом чутливості.

Розробка суден з повітряним змащенням для скорочення викидів парникових газів, економії витрат на пальне, за рахунок зниження опору тертя, пов'язана з високими цінами на нафту і глобальним потеплінням [5]. В великому водному тунелі SSMB було експериментально досліджено зниження опору тертя завдяки повітряному змащенню з повітряними шарами, генерованими на нижній поверхні плоскої пластини; вимірювались зміни локального опору тертя за різних витрат повітря, що нагнітається. Результати показали, що повітряне мастило з повітряними шарами може бути корисним для зниження опору тертя за певних умов нагнітання повітря. Також були проведені випробування опору і самохідності для балкера 66 тис. DWT в буксирувальному танкері SSMB для оцінки очікуваної чистої економії енергії.

Відповідно до вимог, встановлених Міжнародною морською організацією (ІМО) щодо нульового чистого викиду газів в атмосферу з морських суден до 2050 року в джерелі [6] розглянуто один з перспективних методів підвищення ефективності суден – впорскування повітря, який створює мастильну плівку між корпусом і водою, знижуючи загальний опір. У дослідженні використовувалося програмне забезпечення OpenFOAM для аналізу методу впорскування повітря в корпусі Duisburg Test Case (DTC), контейнеровоза в масштабі 1:59.

Оптимальна конфігурація досягла 14,13% чистої економії енергії, тоді як найгірша конфігурація замість цього збільшила споживання енергії. Дисперсійний аналіз (ANOVA) підтвердив зв'язок між параметрами та ефективністю, а результати показали важливість коригування параметрів методу.

Зниження опору тертя шляхом впорскування повітря в роботі [7] зосереджено на судні внутрішнього плавання, яке випробовували як у масштабі моделі, так і в натуральну величину, з повітряним мастилом та без нього. В дослідженні не було виявлено помітного впливу повітряно-бульбашкового змащення під час випробувань опору тертя ні в модельному варіанті, ні в натуральну величину, і не вдалося визначити істотного впливу повітряно-бульбашкового змащення на випробування маневреності та морехідності моделі.

Натепер, незважаючи на ефективність процесу впорскування повітря, спостерігається відсутність досліджень, що визначають кореляцію між ключовими параметрами (товщина повітряного шару, кут впорскування, швидкість судна та координати на етапі планування маршруту). Тому дане дослідження спрямоване на пошук методу оптимізації руху судна з урахуванням шляхових обмежень для підвищення енергоефективності флоту.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Метою дослідження є підвищення інформаційного забезпечення процесу управління судном на маршруті під дією зовнішніх збурень шляхом включення до складу системи управління навігаційних пристроїв для оперативного розрахунку параметрів руху судна.

Наукова гіпотеза – гарантовано точне та безпечне управління на маршруті досягається динамічним позиціонуванням судна на лінії шляху у просторі та площині засобами активного управління при наявності збурень й шляхових обмежень.

Робочі гіпотези наукового дослідження:

завантаження та стискання вхідних навігаційних даних у скалярній та векторній формах для автоматичної обробки досягається при активній участі людини;

графоаналітична ідентифікація процесів судноводіння досягається з урахуванням внутрішніх та зовнішніх впливів;

логістична формалізація законів стабілізації судна досягається при широтному відхиленні від заданого курсу на площині.

Наукове положення: безпека процесу управління судном на маршруті забезпечується розробкою та застосуванням інноваційних

підходів до оптимізації руху судна. Це охоплює вивчення та аналіз елементів руху на різних етапах плавання, включаючи планування маршруту, обсервацію та зміну швидкості. Шляхом розробки алгоритмів стабілізації та вибору оптимальної швидкості з урахуванням різних факторів, таких як збурення та шляхові обмеження, забезпечується ефективне та безпечне керування судном.

Наукова значимість: розширення теоретичного та методологічного розуміння прямолінійного поступального рівномірного руху судна та його впливу на сучасне морське транспортне сполучення.

Практична цінність: можливість використання розробленого алгоритму для оптимізації маршрутів судноплавства, підвищення точності прогнозування руху суден та зменшення ризику аварійної ситуації на морі. Це сприяє підвищенню ефективності та безпеки морських перевезень, що є критичним для розвитку та функціонування світової торгівлі та економіки.

Методи дослідження: в дослідженні використано методику графо-аналітичного розрахунку початкових параметрів руху судна на основі застосування векторного аналізу з візуалізацією на картографічній основі; способи динамічного вибору оптимальної швидкості ходу судна та стабілізації руху судна із застосуванням системного (комплексного) підходу до врахування впливу факторів навколишнього середовища на процес судноводіння.

Питання, які розглядаються в дослідженні наступні:

- Як працює система?
- Як безпечно експлуатувати установку в нормальних умовах роботи?
- Вимоги з обслуговування.

Згідно з технологією система Silverstream® створює «килимок» з мікро-бульбашок по всій площі плоского днища судна. Цей килимок з мікро-бульбашок значно зменшує опір тертя цієї частини корпусу.

Внаслідок зниження загального опору корпусу зменшується потужність валу ЕУ, необхідна для підтримання заданої швидкості у порівнянні з тими ж умовами експлуатації судна, коли система Silverstream® не працює.

Чисте зниження споживання енергії (тобто зменшення потужності валу ЕУ, яке компенсується додатковою допоміжною потужністю, потрібною для роботи системи Silverstream®) веде до зменшення споживання палива та загальної потужності в кіловатах, що в

свою чергу дозволяє знизити експлуатаційні енергетичні витрати та кількість шкідливих викидів [8].

Система Silverstream® складається з наступних основних компонентів, які можуть відрізнятися за кількістю та конфігурацією, залежно від конкретної установки:

- ARU (блоки випуску повітря), інтегровані в нижню обшивку корпусу.

- Компресори з інтегрованими приводами з регульованою швидкістю (VSD).

- Керуюча шафа, розташована в компресорній кімнаті, з можливістю підключення віддалених робочих місць та відповідною кабельною системою.

- Повітряний розподільчий трубопровід, клапани ALS та Y-образні з'єднання (рис. 1). Далі наведено опис основних апаратних компонентів системи Silverstream®.

Робота системи полягає у наступному: після увімкнення системи Silverstream® її стан відображається за допомогою візуальних інтерфейсів (mimics) на доступних робочих місцях (рис. 2).

Стан системи характеризується наступним чином:

1. **Вимкнено (Powered Off):** коли живлення CMS відключено, реле безпеки у шафі CMS забезпечує аварійну зупинку всіх компресорів, а клапани ALS не можуть бути відчинені дистанційно.

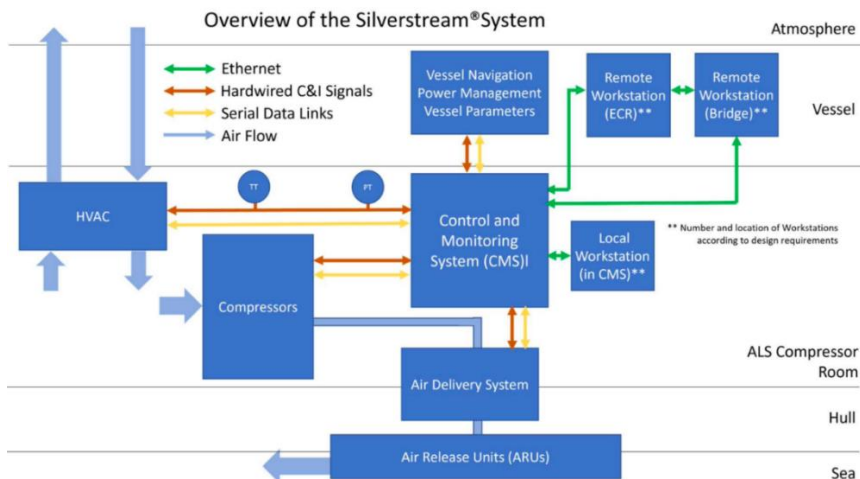


Рис. 1. Структурна система ALS Silverstream®

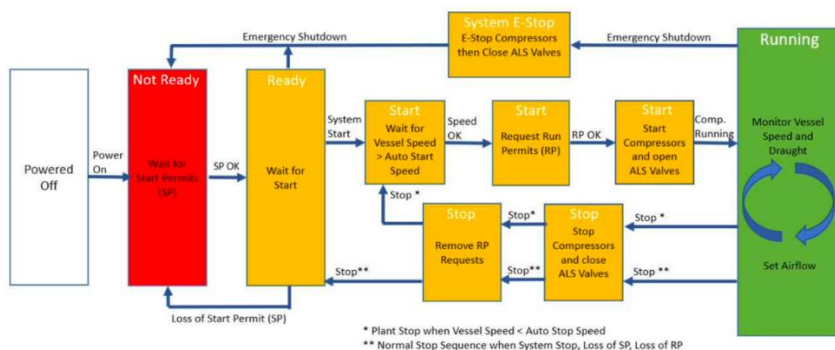


Рис. 2. Функціональна схема системи

2. **Не готово (Not Ready):** система увімкнена, але не може працювати, поки не виконані всі вимоги для старту (StartPermits), наприклад, поки не скасовано всі умови аварійної зупинки (E-Stops).

3. **Система готова (System Ready):** всі вимоги для старту (SP) виконані, але установка не буде запущена, поки на одному з робочих місць керування не буде натиснуто кнопку «Старт».

4. **Запуск системи (System Start):** після натискання кнопки «Старт» або отримання команди на запуск від віддаленої системи керування (наприклад, IAS) система переходить у звичайну послідовність запуску. Система очікує, поки швидкість судна не перевищить поріг автоматичного запуску. Після цього CMS запитує дозволу на роботу (RunPermits) від відповідних систем (PMS та HVAC). Після отримання цих дозволів компресори запускаються згідно з послідовністю запуску, тобто компресори запускаються парами з інтервалами у 10 секунд, щоб не перевантажувати систему живлення або систему керування клапанами, а клапани ALS відкриваються.

5. **Система працює (System Running):** після запуску компресорів і відкриття клапанів ALS система регулює подачу повітря відповідно до осадки та швидкості судна.

6. **Автоматична зупинка (Auto Stop):** звичайна зупинка може статися, коли швидкість судна опускається нижче порогу автоматичної зупинки, а кнопка «Стоп» не натиснута. У цьому випадку система зупиняється згідно з описаною послідовністю, і вона чекатиме на підвищення швидкості вище порогу автоматичного запуску, після чого система знову запуститься.

7. **Зупинка системи (System Stop):** під час звичайної зупинки установка вимикається, якщо:

- 1) натиснуто кнопку «Стоп» або отримано команду на зупинку від віддаленої системи керування (наприклад, IAS);
- 2) втрачається принаймні один дозвіл на старт;
- 3) втрачається принаймні один дозвіл на роботу.

8. **Аварійне відключення системи (System Emergency Shutdown):** при активації аварійного відключення активуються контури аварійної зупинки компресорів (E-Stop), клапани ALS закриваються, і система переводиться у стан «Не готово». Після усунення аварійної ситуації систему необхідно знову запустити згідно із звичайною процедурою (кроки 1-5).

Експериментальне випробування системи повітряного змащення проведено під час плавання у січні 2024 року на контейнеровозі «MSC ANITA» (16616 TEU) з характеристиками: довжина (L_{OA}) – 365,98 м; ширина (B) – 51 м; висота (D) – 72,5 м; осадка у вантажі (d) – 14,5/17,0 м; водотоннажність (Δ) – 131215 т / 171251 т; головний двигун (WINGO 9x92B, LLT, Tier III HR SCR) – 45300kWx72RPM; гвинт фіксованого кроку типу CPP діаметром (D_p) – 9,736 м; швидкість ходи (v) – 22 вузли.

Для оцінки ефекту енергозбереження в процесі обслуговування ALS здійснено випробування швидкості судна при різних режимах подачі повітря. Розрахунок витрати повітря (1) проводився з використанням еквівалентної товщини повітряного шару за наступною формулою [9, 10]:

$$t(b) = Q_{(a)} / B_{(a)} \cdot v \cdot 10^3, \quad (1)$$

де $t(b)$ – еквівалентна товщина повітряного шару на днищі судна, мм; $Q_{(a)}$ – витрата повітря, м³/с; $B_{(a)}$ – ширина області, покритої бульбашками, м; v – швидкість судна відносно води, м/с.

Розрахунки та результати випробувань показали, що ефективність енергозбереження, отримана за допомогою повітряного змащення в залежності від повітряного шару від 3-х до 8-ми мм лінійно підвищується від 8% до 12 %. Причому, умови лінійності спостерігаються у зв'язку зі збільшенням потужності споживання

повітряних компресорів та зниженням потужності головного двигуна судна.

Нормування остійності.

Встановлення норм, яким повинна відповідати остійність судна для забезпечення достатнього ступеня безпеки його експлуатації, перш за все у відношенні перекидання, є однією з вузлових проблем остійності.

Для оцінки здібності судна протистояти одночасному впливу на нього хвилювання та вітру розглядається ***критерій погоди***, який відображає умови неперекидання судна, що відчуває хитавицю на хвилюванні, при динамічному впливі вітру, прикладеного в момент найбільшого накреслення судна на підвітряний борт [11]. Такий випадок впливу шквалу є найбільш небезпечним. Умови неперекидання судна буде виконано, якщо кренувальний момент від вітру M_v буде не більше, ніж момент, що перекидає $M_c = g \cdot D \cdot l_c$.

Чисельне значення критерія погоди (2) виражається відношенням:

$$K = \frac{M_c}{M_v}. \quad (2)$$

Остійність судна вважається достатньою, якщо $K \geq 1$ при найгірших у відношенні остійності варіантах навантаження.

Розрахунок моменту (3), який кренить судно від тиску вітру за Правилами Регістра здійснюється за формулою [11]:

$$M_v = 0,001 \cdot \rho_v \cdot A_v \cdot z, \quad (3)$$

де ρ_v – тиск вітру в Па, приймається за табл. 1, в залежності від району плавання судна і плеча парусності; A_v – площа парусності, m^2 ; z – плече парусності, визначається як відстань в метрах від центру парусності до площини діючої ватерлінії в прямому положенні судна.

$$\rho_v = 708 \cdot z^{0,28} \text{ при } \delta_{\max} \leq 1\%,$$

де $\delta_{\max}$ – максимальний коефіцієнт повноти водотоннажності.

При проміжних значеннях тиск z визначається лінійною інтерполяцією. Для суден з обмеженим районом плавання тиск вітру прий-

мається: для суден з обмеженням $\delta = 0,567$ від вказаного в таблиці 1. Детально обмеження районів плавання визначені в Правилах Регістра, частина 1, «Класифікація».

Таблиця 1. Тиск вітру для суден необмеженого плавання

z , м	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0 та більше
ρ_v , Па	708	793	859	915	963	1005	1049	1079	1111	1141	1169	1196	2221

При розрахунку площі A_v до неї включається вся площа проекції на діаметральну площину бокового виду судна, розташована вище ватерлінії, зі всіма пристроями та палубним вантажом. Несуцільні площі (рангоут, такелаж, леєра та ін.) враховуються або з коефіцієнтом, або з загальною відсотковою надбавкою, які приведені в Правилах. Якщо площа парусності та її статичний момент відносно площини ватерлінії відомі для мінімальної та літньої осадок, то їх значення для проміжних осадок допускається визначати лінійною інтерполяцією. Якщо площа та плече парусності відомі тільки для однієї осадки, то для інших вони можуть бути визначені перерахунком. Нехай A і z – площа і плече парусності при осадці T , тоді для осадки $T_1 = T + \delta T$ відповідні значення A (4) та z_1 (5) визначаються за формулами [11]:

$$A_1 = A - L_{cp} \cdot \delta T; \quad (4)$$

$$z_1 = \frac{A \cdot (z - \delta T) + 0,5 L_{cp} \cdot (\delta T)^2}{A_1}, \quad (5)$$

δT – зміна середньої осадки; L_{cp} – середня довжина судна між довжинами для осадок T і T_1 .

Для визначення найбільшого динамічного кренувального моменту (6), що витримується судном при хитавиці (за термінологією Регістра – найменшого моменту, що перекидає), амплітуду хитавиці судна без врахування впливу скулових кілей Регістр задає за формулою [11]:

$$\theta_{1r} = X_1 \cdot X_2 \cdot Y. \quad (6)$$

Безрозмірний множник X_1 приймається за табл. 2 в залежності від відношення ширини судна B до осадки T .

$$X_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{при } B/T \leq 2,4; \\ 1,437 - 0,182 \cdot B/T & \text{при } 2,4 < B/T < 2,5; \\ 0,8 & \text{при } B/T \geq 3,5. \end{cases}$$

Таблиця 2. Множник X_1

B/T	2,4 та менше	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5 та більше
x_1	1,0	0,98	0,96	0,95	0,93	0,91	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80

Безрозмірний множник X_2 приймається за табл. 3 в залежності від коефіцієнта загальної повноти судна δ .

Таблиця 3. Множник X_2

δ	0,45 та менше	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7 та більше
X_2	0,75	0,82	0,89	0,95	0,97	1,0

$$X_2 = \begin{cases} 0,75 & \text{при } \delta \leq 0,45; \\ 1,33 \cdot \delta + 0,1521 & \text{при } \delta < 0,6; \\ 0,5 \cdot \delta + 0,65 & \text{при } 0,6 \leq \delta \leq 0,7 \\ 1,0 & \text{при } \delta > 0,7. \end{cases}$$

Множник Y (градуси) приймається за табл. 4 в залежності від району плавання судна та відношення $\sqrt{\frac{h_0}{B}}$.

Необмежений
район
плавання

$$Y_1 = \begin{cases} 24 & \text{при } X \leq 0,04; \\ 973,15 \cdot X (1 + 19,34 \cdot X) & \text{при } 0,9 < X \leq 0,13; \\ 36 & \text{при } X > 0,13. \end{cases}$$

Обмежений
район
плавання

$$Y_2 = \begin{cases} 16 \text{ при } X \leq 0,04; \\ 70,58 + 17,97 \cdot \ln X \text{ при } 0,04 < X \leq 0,1; \\ 56,8 + 12 \cdot \ln X \text{ при } 0,01 < X < 0,13; \\ 32 \text{ при } X > 0,13. \end{cases}$$

Таблиця 4. Множник Y

Район плавання судна	$\sqrt{h_0} / B$									
	0,04 та менше	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13 та більше
Необмежений	24,0	25,0	27,0	29,0	30,7	32,0	33,4	34,4	35,3	36,0
Обмежений I та II	16,0	17,0	19,7	22,8	25,4	27,6	29,2	30,5	31,4	32,0

При проміжних значеннях аргументів таблиць множники визначаються лінійною інтерполяцією.

Якщо судно має скулові кілі, амплітуда хитавиці (7) визначається за формулою [11]:

$$\theta_{2r} = \kappa_1 \cdot \theta_{1r}, \quad (7)$$

де κ приймається за табл. 5 в залежності від відношення $A_k / L \cdot B$,

де A_k – сумарна габаритна площа скулових кілей в м².

Таблиця 5. Коефіцієнт κ

$A_k/LB, \%$	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0 та більше
κ	1,00	0,98	0,95	0,88	0,79	0,74	0,72	0,70

$$\kappa = \begin{cases} 1 - 0,0157 \cdot (X - 1) \cdot X^2 \text{ при } X \leq 2,2; \\ 0,7 + 0,04 \cdot (4 - X)^2 \text{ при } 2,2 < X \leq 4; \\ 0,7 \text{ при } X > 4. \end{cases}$$

Діаграма статичної остійності.

У відношенні елементів діаграми статичної остійності визначено наступні вимоги:

1) максимальне плече $l_{\max}$ повинно бути не менше 0,25 м для суден довжиною $L \leq 80$ м і не менше 0,20 для суден довжиною

$L \leq 105$ м, а для проміжних довжин визначається лінійною інтерполяцією;

2) кут максимуму діаграми θ_m повинен бути не менше 30° ;

3) кут нахилу діаграми θ_y повинен бути не менше 60° .

Врахування обмерзання.

Для суден, плаваючих в зимовий час та в зимових сезонних зонах, Правила Регістра вимагають виконувати перевірку остійності з врахуванням обмерзання. При розрахунку повинно враховуватись збільшення водотоннажності, підвищення центру тяжіння та площі парусності. Розрахунок остійності при обмерзанні здійснюється для найгіршого у відношенні остійності розрахункового варіанта навантаження.

Маса льоду на квадратний метр площі парусності приймається 15 кг, площа та піднесення центру парусності при цьому визначаються для осадки $T_{\min}$. В інших районах зимової сезонної зони, а також для суден, плаваючих в зимовий час в районах Чорного та Азовського морів північніше паралелі $44^\circ 00'N$, норми обмерзання приймаються вдвічі менше крім районів, в яких, за узгодженням з Регістром, обмерзання може не враховуватись.

Додаткові вимоги до остійності.

Для контейнеровозів остійність повинна бути перевірена для варіанта навантаження з контейнерами на палубі за кутом крену на циркуляції від кренувального моменту, визначеного за формулою (8), а також при постійному боковому вітрі з кренувальним моментом, визначеним за формулою (3) при тиску вітра, рівному 0,6 від вказаного в табл. 1 для суден необмеженого району плавання.

$$M_{\psi} = \frac{0,037 \cdot D \cdot v_s^2}{L} - \frac{T}{2} \cdot \left(z_g - \frac{T}{2} \right). \quad (8)$$

В кожному з таких випадків кут крену повинен бути не більше половини кута входу верхньої палуби в воду та не більше 15° . Виправлена початкова метацентрична висота, при розрахунку якої центр тяжіння кожного контейнеровозу приймається розташованим на середині його висоти, повинна бути не менше 0,15 м.

$$\delta = \begin{cases} 0,1 \text{ при } T_\theta \leq 6; \\ 0,121 - 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_\theta \text{ при } 6 < T_\theta \leq 8; \\ 0,1465 - 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_\theta \text{ при } 8 < T_\theta \leq 14; \\ 0,116 - 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_\theta \text{ при } 14 < T_\theta \leq 16. \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0,092 - 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_\theta \text{ при } 16 < T_\theta \leq 18; \\ 0,065 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_\theta \text{ при } 18 < T_\theta \leq 20; \\ 0,035 \text{ при } T_\theta > 20. \end{cases}$$

Опір води при русі судна.

При русі судна з постійною швидкістю воно вносить своє збурення в рідину та деформує її вільну поверхню, внаслідок чого змінюються тиски по всій змоченій поверхні і крім того з'являються торкальні напруги, обумовлені в'язкістю рідини.

Опір тертя судна розраховується як опір еквівалентної пластини, тобто пластини, яка має площу рівновелику площі змоченої поверхні судна та довжину, рівну довжині судна за діючою ватерлінією, з введенням поправок на вплив кривизни і шорсткості поверхні судна. Тоді опір тертя (9) з врахуванням сили, діючою на тіло в потоці рідини розраховується за формулою [11]:

$$R_f = \left(\kappa \cdot c_f + c_w \right) \frac{\rho}{2} \cdot \Omega \cdot v^2, \quad (9)$$

де c_f – коефіцієнт опору тертя пласкої гладкої пластини; κ – коефіцієнт, враховуючий кривизну поверхні судна; c_w – надбавка на шорсткість поверхні; Ω – площа змоченої поверхні судна.

Коефіцієнт c_f залежить від характеру (режиму) руху рідини в прикордонному шарі. При малих числах Рейнольдса (R_e) спостережується ламінарний рух, тобто рух шару, при якому відсутнє перемішування частинок між шарами рідини.

При русі суден практично за всією довжиною обтікання має турбулентний характер і величина c_f (R_e), яка отримана експериментально (10), за добре апроксимірованою функцією буде наступною:

$$c_f = \frac{3,913}{(\ln R_e)^{2,58}}, \quad (10)$$

де $R_e = \frac{\nu L}{\nu}$ – число Рейнольдса; L – довжина судна; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м/с^2 (при $t = 15^\circ\text{C}$ він дорівнює $\nu = 1,187 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$); Ω – площа змоченої поверхні судна, яка визначається за теоретичним кресленням або за приблизною формулою:

$$\Omega = L \cdot T \left(2 + 1,37 \cdot (0,7 - 0,274) \cdot \frac{B}{T} \right) \text{ при } \delta < 0,45;$$

κ – коефіцієнт, враховуючий вплив кривизни суднової поверхні на тертя ($\kappa = 1,02$ при $L/B = 10$; $\kappa = 1,08$ при $L/B = 6$);

$$\kappa = 1,17 - 0,015 \cdot L/B;$$

c_{ui} – надбавка на шорсткість поверхні судна, яка для свіжопофарбованої поверхні приймається рівною $c_{ui} = 0,4 \cdot 10^{-3}$.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Метод поверхневого змащення зменшив опір поверхневого тертя на $10 \pm 2 \%$, що знизило навантаження на рушії судна.

Подальше підвищення ефективності енергозбереження планується збільшити шляхом повторного регулювання посадки судна та глибини занурення рушіїв головного двигуна, а також засобів вимірювання та контролю елементів гідропульсивного комплексу контейнеровоза.

Удосконалена процедура оптимізації руху судна на маршруті, яка ґрунтується на балансі рухомих сил та сил опору з урахуванням динамічних змін зовнішніх факторів та відрізняється від відомих процедур застосуванням комплексних й інноваційних підходів при стабілізації положення судна у просторі та на площині у реальному часі.

Удосконалено адаптивний алгоритм корекції траєкторії судна для повернення на задану лінію шляху, який відрізняється врахуванням поточних даних про модуль та напрямок дії збурюючих чинників, таких як вітрові, хвильові та течійні ефекти.

Набула подальшого розвитку методика графо-аналітичного розрахунку початкових параметрів руху судна (курсу, швидкості, координат на етапі планування маршруту), яка відрізняється застосуванням векторного аналізу та візуалізації на картографічній основі.

Набули подальшого розвитку розрахункові моделі навігаційних розрахунків, які відрізняються застосуванням способу динамічного вибору оптимальної швидкості ходу судна для безпечного відновлення руху по траєкторії маршруту.

Набув подальшого розвитку ефективний спосіб стабілізації руху судна та уникнення загроз безпеці мореплавства, який відрізняється застосуванням системного (комплексного) підходу до врахування впливу факторів навколишнього середовища [12] на процес судноводіння.

Перелік використаних джерел

1. The silverstream system: Market-leading. Air lubrication for the shipping industry. *Silverstream technologies*: website. URL: <https://www.silverstream-tech.com/> (date: 07.06.2025)

2. What is air lubrication? *Silverstream technologies*: website. URL: <https://www.silverstream-tech.com/what-is-air-lubrication/> (date: 23.07.2025)

3. The Silverstream System – Air Lubrication. The smart, verifiable, high impact efficiency technology. *PowerPoint Presentation*. *Silverstream technologies*: website. URL: <https://surl.lu/ejvilg> (date: 15.08.2025)

4. Kim Y-R., Steen, S. Potential energy savings of air lubrication technology on merchant ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2023. Vol. 15. 100530. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100530>.

5. Janho J., Choi S. H., Ahn S-M., Kim B., Seo J. S. Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2014. Vol. 6(2). P. 363-379. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0185>.

6. Chillemi M., Raffaele M., Sfravara F. A review of advanced air lubrication strategies for resistance reduction in the naval sector. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(13). 5888. <https://doi.org/10.3390/app14135888>.

7. Kawakita C. A Hydrodynamic design method of ship applying the air lubrication system. *Paper presented at the The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Sapporo, Japan, June 2018.

8. Skajem C. PEM fuel cell retrofit solutions for marine industry. *Conference: ADIPEC*, Abu Dhabi, UAE, October 2023. doi: <https://doi.org/10.2118/217036-MS>.

9. Dong-Young Kim, Ji-Yeon Ha, Kwang-Jun Paik. Numerical study on the extrapolation method for predicting the full-scale resistance of a ship with an air lubrication system. *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2020. Vol. 34(6). P. 387-393. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2020.008>.

10. Arakawa D., Kawasima H., Kawakita C. Numerical estimation of self-propulsion factors for ship with air lubrication. *Paper presented at the The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Sapporo, Japan, June 2018.

11. Сізов В. Г. Теорія корабля: навчальний посібник. Одеса: Фенікс, 2004. 284 с.

12. Sagin S. V., Sagin, S. S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport. *Technology audit and production reserves*. 2023. Vol. 4(3 (72)). P. 33-42.