

## WAYS TO IMPROVE THE STEERING OF LARGE CONTAINER SHIPS IN DIFFICULT NAVIGATIONAL AND HYDROMETEOROLOGICAL CONDITIONS

### ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ КЕРОВАНОСТІ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНТЕЙНЕРОВИЗІВ У СКЛАДНИХ НАВІГАЦІЙНИХ ТА ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

V.S. Davydov, *PhD.*, assistant professor, I.O. Liubarets, *PhD.* student

В. С. Давидов, *к.т.н.*, доцент, І. О. Любарець, *аспірант*

*State University of Infrastructure and Technologies, Ukraine*

*Державний Університет Інфраструктури та Технологій, Україна*

#### ABSTRACT

*The article examines the challenges of operating large container ships in difficult navigational and hydrometeorological conditions. The latest research and publications on the peculiarities of such vessels, such as their large windage area, which depends on their size and carrying capacity are reviewed. Some cases of maneuvering large container ships and the reasons why they become almost uncontrolled at low speeds even with little wind are analysed. The article also discusses the features of the engines and propulsion of these ships, which limit their minimum speed and affect their controllability. The article shows how the rudder and propeller interact with the wind force to create a torque that influences the ship's stability. A mathematical condition for maintaining the ship's controllability under wind influence is provided. The article suggests some promising ways of increasing the safety of large container ships by using navigation and control systems, tugs, and new rules for regulating their movement. Attention was drawn to the need to use optical-electronic observation of space satellites to monitor the weather conditions in the busiest sea routes and to predict the weather changes that may affect the ship's operation. This way, it will be possible to forecast the weather for the next day with sufficient accuracy, which is essential for the safe navigation of canals, challenging areas or port calls of large vessels.*

**Keywords:** navigation safety, control and navigation, container ship, windage area of the ship.

#### Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Темпи міжнародної торгівлі постійно вимагають швидшої та більшої за об'ємом доставки вантажів, що в свою чергу змушує судновласників підлаштовуватись під умови ринку та збільшувати замовлення будівництва великогабаритних суден-контейнеровозів - ULCS (скор. від англ. Ultra Large Container Ship). Та не дивлячись на те, що такі судна дуже вигідні з економічної точки зору, з точки зору забезпечення безаварійного плавання, їх експлуатація є надзвичайно складною через їх конструктивні особливості. Про це яскраво свідчать останні аварійні морські пригоди за участю таких суден [1]. Через високий надводний борт, велику кількість палубного вантажу та високу надбудову, судна класу ULCS мають велику вітрильність, що робить їх практично некерованими на маленьких швидкостях навіть при незначному вітру.

До того ж, особливості рушіїв та судових енергетичних установок (СЕУ) більшості суден цього класу полягають в тому, що мінімальна кількість обертів гвинта на самому малому ходу, в середньому, сягає 25 об/хв., що при величезних розмірах рушія відповідає швидкості 5-7 вузлів [2,3]. Водночас, існує накопичений, діючий момент інерції. При поворотах ULCS,

вектор дії сили може відрізнятись від курсу судна до 30-40°, що викликає значний дрейф судна в протилежний бік повороту [4].

Основна ж проблема полягає в тому, що загальноприйняті сьогодні засоби навігації та управління нездатні забезпечити достатню безпеку експлуатації сучасних великогабаритних суден-контейнеровозів в скрутних навігаційних та гідрометеорологічних умовах.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Досить велику увагу дослідженню безпеки плавання великогабаритних контейнеровозів приділили Ясна Прпіч-Оршич, Йоско Парунов, Ігор Шикіч у праці «Operation of ULCS - real life» [5]. У цій статті представлено реальні проблеми, що виникають при експлуатації ULCS з точки зору капітанів. У статті представлена інтерпретація результатів анкети, заповненої капітанами великих контейнеровозів під час проекту «Tools for Ultra Large Container Ships» (TULC) EUI FP7. Результати анкети були додатково переглянуті та прокоментовані досвідченим капітаном ULCS. Вплив вітру на судна ULCS детально обговорюються в статті. Особлива увага приділяється визначенню ступеню небезпечного впливу хвилювання та заходам, які капітани вживають для їх уникнення, а також маневруванням під час складних гідрометеорологічних умов. Також обговорюється роль прогнозу хвиль і програмного забезпечення для прогнозування погоди.

Праця Крістіана Анкути, Костеля Станки та Крістіана Андрея «Behavior analysis of container ship in maritime accident in order to redefine the operating criteria» спрямована на аналіз поведінки судна контейнеровоза під час та після аварійних морських пригод, щоб переглянути критерії експлуатації [1]. Методом, обраним авторами для проведення дослідження, є комп'ютерне моделювання. Комп'ютерна програма забезпечує реакції моделі контейнеровоза в різних ситуаціях. Таким чином, моделювання дозволило отримати велику категорію даних, щоб максимально покращити запобігання аварійним морським пригодам, або пом'якшити їх наслідки. Основними результатами цієї роботи є задокументовані пропозиції щодо експлуатаційних критеріїв, призначених для підвищення безпеки у разі морських аварій, зіткнень і посадок на мілину. Запровадження таких заходів вимагає комплексного аналізу витрат, який не повинен нехтувати надзвичайним економічним впливом, який може виникнути внаслідок таких втрат.

### **Формулювання цілей статті (постановка завдання)**

Пропозиція шляхів підвищення керованості великогабаритних суден-контейнеровозів в скрутних навігаційних та гідрометеорологічних умовах.

### **Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів**

Аварійна ситуація виникає тоді, коли дії судноводія приводять до стану, при якому сили зовнішнього впливу більше, ніж технічні можливості судна для їх компенсації [6]. 23 березня 2021 р. ULCS «Ever Given» (проекту Imabari 20000) у Суецькому каналі зійшов з осі суднового ходу та став поперек каналу, що призвело до тривалої затримки руху суден. Аварійна морська пригода (АМП) сталась через низку причин. Головною причиною було визнано те, що задля компенсації сильного вітру, лоцман порадив капітану збільшити швидкість. В той час вітер був з кормових напрямків, що також розганяло судно. В результаті швидкість судна безпосередньо перед АМП на 5 вузлів перевищувала максимально дозволена [7]. На такій високій швидкості, в стиснених умовах каналу, в дію вступив закон Бернуллі – носову частину потягнуло до правого берега, і вітер за лічені хвилини поставив судно поперек каналу.

Дійсно, як було сказано вище, великогабаритні судна-контейнеровози мають велику вітрильність, а з повним набором контейнерів на палубі площа вітрильності коливається між

12000 і 23000 м<sup>2</sup> (див. таблицю 1), що означає те, що боковий вітер створює велику силу, що діє на судно [1,2,8].

Таблиця 1. Деякі характеристики великогабаритних суден-контейнеровозів

Характеристики суден	«Tamina» (проект CSSBC 823/825)	«Milano Bridge» (проект Imabari 12400)	«MSC Oscar» (проект Daewoo 18400/19200)
Габарити L/B/H, м.	276.2/40/58	365.9/51.2/71	395.4/59/73
Кількість TEU	5500	13900	19224
Максимальна вітрильність м <sup>2</sup>	12550	18740	22000
Мінімальна швидкість (Dead Slow Ahead)	7.4	7.5	7.7

Бічна сила, викликана вітром, може бути розрахована за наступною формулою [9]:

$$F = \frac{1}{2} \rho a C_w A_w V_w^2, \quad (1)$$

де  $F$  - бічна сила вітру (Н);

$\rho a$  - густина повітря (кг/ м<sup>3</sup>);

$C_w$  - вітровий коефіцієнт, який залежить від надводної форми корпусу судна;

$A_w$  - площа вітрильності судна ( м<sup>2</sup>);

$V_w$  - швидкість відносного вітру (м/с).

Сила вітру, помножена на відстань від центру вітрильності до полюсу повороту, дає значення вітрового моменту  $M_v$  [9]:

$$M_v = F l_v, \quad (2)$$

де  $M_v$  - момент сили вітру (Нм);

$F$  - бічна сила вітру (Н);

$l_v$  - плече сили вітру – відстань від центру вітрильності до полюсу повороту судна (м).

Основним же фактором, що визначає керованість судна, є взаємодія гвинта, стерна та корпусу. При обертанні гвинта, створюється потік води, який набігає на перо стерна. При перекладці стерна на заданий кут на передній площині, внаслідок зменшення швидкості потоку, виникає область підвищеного тиску. На задній площині, де швидкість потоку збільшується, тиск знижується. Різниця тиску призводить до виникнення результуючої гідродинамічної сили  $R_p$ , спрямованої майже перпендикулярно до площини пера стерна і прикладеної в центрі його тиску. Величина  $R_p$  залежить від площі пера стерна, кута атаки і швидкості потоку води, що набігає на стерно [9]:

$$R_p = C_p (\rho \div 2) S_p v^2, \quad (3)$$

де  $R_p$  – бокова сила стерна (Н);

$C_p$  – коефіцієнт підйомної сили стерна, який залежить від його форми та кута перекладки;

$\rho$  - густина води (кг/ м<sup>3</sup>);

$S_p$  – площа проекції підводної частини судна на діаметральну площину (м<sup>2</sup>);

$v$  - швидкість набігаючого потоку (м/с).

Момент бокової сили стерна, по аналогії з вітровим моментом обчислюється за формулою [9]:

$$M_p = R_p l_p, \quad (4)$$

Де  $M_p$  - момент бокової сили стерна (Нм);

$R_p$  - бокова сила стерна (Н);

$l_p$  - плече бокової сили стерна – відстань від центру точки прикладення сили до полюсу повороту судна (м).

Очевидно, що для того аби судно зберігало керованість, поворотний момент гідродинамічної сили, яка виникає внаслідок перекладки пера стерна, має бути більшим ніж момент сили вітру, інакше кажучи, має виконуватись нерівність:

$$M_p > M_v. \quad (5)$$

Коли ж момент сил вітру стає рівний моменту поворотної сили – судно стає некерованим (рис.1). На рисунку наглядно показано лінію дії бокової сили стерна та лінію дії бокової сили вітру, а також полюс повороту судна. Наприклад, підставивши відповідні значення у формули (2) та (4), стає ясно, що бокової сили стерна значенням 843 кН., з плечем 290 м, все ще недостатньо для компенсації сили вітру значенням 2.45 МН з плечем 100 м.

На перший погляд здається, що для того аби змістити полюс повороту в напрямку корми задля зменшення плеча бокової сили вітру – необхідно зменшити швидкість. Проте, після відповідної команди телеграфу швидкість обертання гвинта зменшиться практично відразу, що й суттєво зменшить швидкість потоку, що набігає на перо стерна, а прямолінійна швидкість судна завдяки інерції ще деякий час буде залишатись незмінною, а потім зменшуватись поступово. Таким чином, полюс повороту буде зміщуватись в напрямку корми занадто повільно, а бокова сила стерна буде занадто мала для протидії боковій силі вітру.

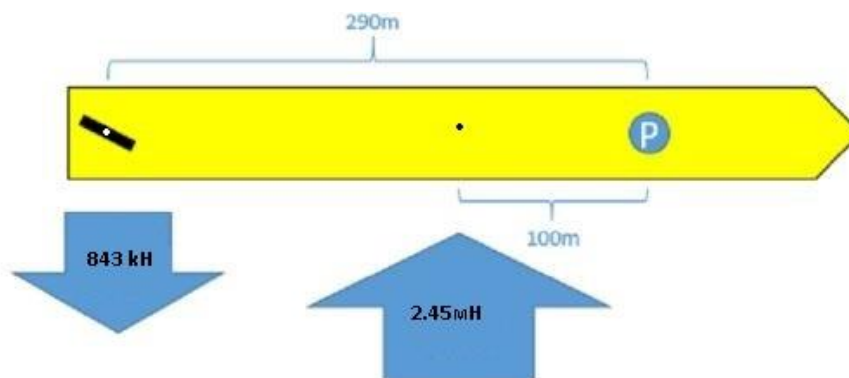


Рис.1. Схема дії сили вітру та бокової сили стерна на судно

Отже, задля того, аби збільшити поворотний момент необхідно збільшити поворотну силу стерна. Виходячи з формули (3), видно, що величина  $R_p$  залежить від квадрату швидкості потоку води, що набігає на стерно. Звідси слідує, що найефективнішим методом для збільшення бокової сили стерна є збільшення потоку води, що набігає на перо стерна, а отже і швидкості обертів рушію, а як наслідок - прямолінійної швидкості судна. З її збільшенням, судно буде набагато швидше реагувати на перекладку стерна. Проте, збільшення швидкості не є методом вирішення проблеми збереження керованості великогабаритних контейнеровозів, адже тягне за собою багато небезпек, таких як накопичення моменту інерції, зменшення глибини під кілем внаслідок гідродинамічного просідання та збільшенням гальмівного шляху. Коли ж судно набуває прямолінійної швидкості, значно знижується ефективність носового підрулюючого пристрою, а на швидкості 5 та більше вузлів корисного ефекту не буде зовсім [2, 4]. Отже, зважаючи на вищесказане, для збереження керованості суден класу ULCS, необхідно знайти баланс швидкості, за якої буде зберігатись керованість

судна, не буде накопичуватись великий момент інерції та не буде значного гідродинамічного просідання судна.

З таблиці 1 видно, що на самому малому передньому ході (Dead Slow Ahead,) великогабаритних контейнеровозів, їх швидкість сягатиме 7.4-7.7 вузли. Коли ж судно повністю завантажене і вітер має напрямок «в корму», це, без урахування течії, додає ще 1-2 вузли до швидкості судна [4]. Постає цілком доречне питання – як же зберегти керованість судна, але при цьому позбутися негативного впливу високої швидкості? Для того аби великогабаритне судно контейнеровоз зберігало керованість, але не збільшувало швидкість, доцільно було б окрім необхідних буксирів використовувати роботу додаткового буксиру, закріпленого через центральний клюз на кормі судна, який в певні моменти (перед поворотом, чи після виходу на новий курс) тягнув би судно суворо в протилежному напрямку його руху і суттєво зменшував би швидкість судна, при тих самих обертах рушія, таким чином швидкість потоку, що набігає на перо стерна залишалася б незмінною, тобто стерно зберігало б свою ефективність. Таким же чином можна керувати положенням полюсу повороту, та допомагати судну здійснювати повороти швидше та ефективніше. Особливо, застосування кормового буксиру було б корисне при проході суднами ULCS каналів та проток.

Також логічно і те, що чим менший вплив вітру, хвилювання та течії – тим менша швидкість потрібна для збереження керованості судна. Цілком логічно, що на гідрометеорологічні умови впливати неможливо. Проте їх можливо передбачити. Сучасні засоби оптико-електронного спостереження дозволяють відслідковувати стан погоди безперервно [10]. Відслідковуючи постійно стан погоди, можливо з надзвичайною точністю передбачувати погоду на найближчу добу, що більш ніж достатньо для проходу каналів, скрутних ділянок чи заходу в порти суден ULCS. Разом з цим, для кожного порту, який може приймати судна такого класу, доцільно зробити розрахунки максимальної швидкості вітру за якої зберігалася б керованість таких суден з максимальною площею вітрильності. При цьому, керуючись максимальним моментом бокової сили стерна судна цього класу на самому малому передньому ході при максимальному завантаженні. Наприкінці, опираючись на ці дані, розробити та впровадити правила, які б суворо регламентували рух великогабаритних суден-контейнеровозів.

### **Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку**

У статті запропоновані деякі шляхи підвищення керованості великогабаритних суден-контейнеровозів в скрутних навігаційних та гідрометеорологічних умовах. А саме запропоноване використання кормового буксиру, закріпленого через центральний клюз великогабаритних суден-контейнеровозів, при їх русі каналами та фарватерами для запобігання накопиченню моменту інерції, та для того, щоб при зменшенні прямолінійної швидкості не падала ефективність рушія з гвинтом та момент бокової сили пера стерна був більший за момент бокової сили вітру. З метою підвищення безпеки плавання, запропоновано впровадження правил, розроблених на основі розрахунків моментів сил вітру та бокових сил стерна, які діють на типові великогабаритні судна контейнеровози. Запропоноване використання перспективного способу спостереження за поверхнею Світового океану за допомогою засобів оптико-електронного спостереження, які б дозволили прогнозувати погоду з надзвичайною точністю.

Загалом, вищеперахованих шляхів недостатньо для повного вирішення проблеми складної керованості великогабаритних суден-контейнеровозів. Необхідно проведення досліджень впливу течії на такі судна, а також одночасного впливу вітру та течії. Крім цього, необхідно розробити шляхи та методи передбачення погоди, за допомогою перспективного способу спостереження за поверхнею Світового океану з використанням засобів оптико-електронного спостереження.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Cristian Ancuta, Costel Stanca, Cristian Andrei, "Behavior analysis of container ship in maritime accident in order to redefine the operating criteria," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 227, ModTech International Conference - V 14–17 June 2017, Sibiu, Romania, doi:10.1088/1757-899X/227/1/012004, 2017.
2. China Shipbuilding Corporation, *Maneuvering information for USCG*. K3979103, pp. 2-4, 2004.
3. Korea Maritime Safety Tribunal, *Marine Safety Investigation Report on Milano Bridge MSI Report 2021-001*, p. 6-78, 2021.
4. Sergiienko V.V., "In the emergency trap," *Morskiie vesti*, №12-2020, 2020. [Online]. Available: <http://www.morvesti.ru>.
5. Prpić-Oršić Jasna, Parunov Joško, Šikić Igor, "Operation of ULCS - real life," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 6:1014~1023, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0228>, 2014.
6. Мальцев А.С., "Теория и практика безопасного управления судном при маневрировании» [текст]," *Дис. докт. техн. наук: 05:22:16 – Судовождение*. – О.: 2007.
7. United Arab Insurance Federation, "Insurance Report on Ever Given grounding in Suez Canal," pp. 2-7, 2021.
8. Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd., *Final Trim & Stability Booklet 7G-7000-010*, p.7, 2010.
9. Дёмин С.И., Жуков Е.И., Кубачев Н.А., Кургузов С.С., Цурбан А.И., *Управление судном*. М.: Транспорт, 38-51 с., 1991.
10. Явтушенко А.М., Козелков С.В., Богомья В.І., Ставицький С.Д., *Сучасні космічні системи оптичної зйомки Землі: навч. посіб.* К.: НАОУ, 2004.

**REFERENCES**

1. Cristian Ancuta, Costel Stanca, Cristian Andrei, "Behavior analysis of container ship in maritime accident in order to redefine the operating criteria," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 227, ModTech International Conference - V 14–17 June 2017, Sibiu, Romania, doi:10.1088/1757-899X/227/1/012004, 2017.
2. China Shipbuilding Corporation, *Maneuvering information for USCG*. K3979103, pp. 2-4, 2004.
3. Korea Maritime Safety Tribunal, *Marine Safety Investigation Report on Milano Bridge MSI Report 2021-001*, p. 6-78, 2021.
4. Sergiienko V.V., "In the emergency trap," *Morskiie vesti*, №12-2020, 2020. [Online]. Available: <http://www.morvesti.ru>.
5. Prpić-Oršić Jasna, Parunov Joško, Šikić Igor, "Operation of ULCS - real life," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 6:1014~1023, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0228>, 2014.
6. Maltsev A.S., "Theory and practice of safe ship control during maneuvering," *Dissertation: 05:22:16 – Navigation*. – О.: 2007. [in Russian].
7. United Arab Insurance Federation, "Insurance Report on Ever Given grounding in Suez Canal," pp. 2-7, 2021.
8. Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd., *Final Trim & Stability Booklet 7G-7000-010*, p.7, 2010.

9. Diomin S.I., Zhukov E.I., Kubachev N.A., Kurguzov S.S., Tsurban A.I., *Upravleniye sudnom*. M.: Transport, p. 38-51, 1991. [in Russian].
10. Yavtushenko A.M., Kozelkov S.V., Bogomya V.I., Stavytskyi S.D., *Modern Space Systems for Optical Imaging of the Earth: Manual*. K.: NAOU, 2004. [in Ukrainian].