Каніфольський Олександр Олегович, кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, доцент кафедри «Суднобудування і судноремонту ім. професора Ю.Л. Воробйова», Одеса, Україна, https://orcid.org/0000-0001-7288-4835

Васильченко Олександра Євгеніївна, Одеський національний морський університет, старший викладач кафедра «Суднобудування і судноремонту ім. професора Ю.Л. Воробйова», Одеса, Україна, https://orcid.org/0009-0000-7282-2458

Александровська Надія Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, доцент кафедри «Суднобудування і судноремонту ім. професора Ю.Л. Воробйова», Одеса, Україна, https://orcid.org/0000-0001-6591-2068

Kanifolskyi Oleksandr, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Odesa National Maritime University, Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair named after Professor Yu.L. Vorobyov, Odesa, Ukraine. https://orcid.org/0000-0001-7288-4835

Vasylchenko Oleksandra, Odesa National Maritime University, Senior Lecturer at the Department of Shipbuilding and Ship Repair named after Professor Yu.L. Vorobyov, Odesa, Ukraine. https://orcid.org/0009-0000-7282-2458

Aleksandrovska Nadiia, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Odesa National Maritime University, Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair named after Professor Yu.L. Vorobyov, Odesa, Ukraine, https://orcid.org/0000-0001-6591-2068

ДОСЛІДЖЕННЯ М’ЯКИХ ВІТРИЛ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ДОДАТКОВОЇ СИЛИ ТЯГИ НА СУДНІ

THE STUDIES OF SOFT SAILS TO CREATE ADDITIONAL THRUST FORCE ON A VESSEL

Анотація

В статті розглянуті дані досліджень, що були проведені в CE Delft та Одеському національному морському університеті (ОНМУ). Проведено порівняння жорсткого вітрила типу Wingsail, повітряного змія Towing kite, дослідження яких було проведено в CE Delft та м'яких вітрил типу спінакер, які досліджувалися в аеродинамічній лабораторії ОНМУ. Типи суден, використані в розрахунках – це балкер, довжиною 107 м та багатоцільове судно для перевезення генеральних вантажів та контейнерів, довжиною 135 м. Розраховано середнє значення збереженої потужності для всіх типів, описаних вітрил. Наведено приклад розкрою вітрила типу спінакер. Запропоновано графіки залежності тяги вітрила від кута атаки.

Ключові слова: Wingsail, жорстке вітрило, спінакер, Towing kite, додаткова сила тяги.

Abstract

The article reviews the data of research conducted at CE Delft and Odesa National Maritime University (ONMU). A comparison is made of the rigid sail Wingsail, Kite, researched at CE Delft, and the soft sails of the Spinnaker type, which were studied in the wind tunnel of ONMU. The types of vessels used in the calculations are a bulk carrier, 107 m long, and a multi-purpose vessel for the transportation of general cargo and containers, 135 m long. The average value of the power saving for all types of described sails is calculated. An example of the designing of the Spinnaker type sail is given. Graphs of the dependence of the sail thrust on the angle of attack are proposed.

Keywords: Wingsail, rigid sail, spinnaker, Towing kite, additional thrust.

*Постановка проблеми***.** В сучасній морській галузі велика увага приділяється захисту навколишнього середовища. Додаток VI «Regulations for the prevention of air pollution from ships» до конвенції МАРПОЛ пропонує декілька коефіцієнтів, наприклад: EEDI (Energy Efficiency Design Index) [1], EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index) [2] та CII (Carbon Intensity Indicator) [3]. Всі ці індекси прямо, або по дотичній пов'язані з можливістю використання альтернативних джерел енергії, для зменшення викидів вуглекислого газу. В якості альтернативної, додаткової сили тяги може бути використане вітрило. Цікаві дослідження були проведені в CE Delft, які стосувалися оцінки збереженої потужності (потужності, яку створює вітрило, або інший засіб). В якості засобів, що створюють додаткову тягу розглядалися: Wingsail, Towing kite, Wind turbine. Вітрила м'якого типу не розглядалися. В аеродинамічній лабораторії ОНМУ було проведено дослідження м'яких вітрил типів спінакер та спанкер. З'явилася можливість порівняння даних досліджень CE Delft та результатів досліджень, проведених в ОНМУ. Всі наведені типи засобів, для створення додаткової сили тяги мають свої переваги та недоліки, тому в сучасній морській індустрії необхідно мати інформацію, про можливості їхнього використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [5] дослідженні проаналізовано використання вітру як відновлюваного джерела енергії для морського транспорту з метою зниження споживання палива та викидів CO_2. Основними завданнями роботи є визначення бар'єрів розвитку і впровадження технологій вітрової допоміжної тяги на суднах, оцінка їх ринкового та екологічного потенціалу, а також аналіз пов'язаних економічних і соціальних ефектів.

У результаті дослідження ідентифіковано три ключові бар'єри: нестачу достовірної та незалежної інформації щодо експлуатаційних, технічних і економічних характеристик вітрових пропульсивних технологій; обмежений

доступ до капіталу для створення та випробування повномасштабних демонстраторів; недостатні стимули для підвищення енергоефективності суден і скорочення викидів CO_2. Показано, що ці бар'єри тісно взаємопов'язані та формують «проблему курки і яйця», коли відсутність перевірених даних унеможливлює залучення інвестицій, а нестача фінансування, у свою чергу, перешкоджає отриманню таких даних.

Для подолання зазначених обмежень запропоновано розроблення стандартизованої методики оцінювання вітрових пропульсивних технологій, поєднаної з випробуваннями на реальних тестових кейсах. Така методика має бути узгоджена з технічними настановами EEDI, але водночас включати не лише оцінку доступної ефективної потужності, а й реальні паливні заощадження на основі експлуатаційних даних.

Розрахунки потенціалу економії потужності виконано для чотирьох типів вітрових технологій, шести типових суден і двох швидкісних режимів із використанням профілів рейсів AIS. Результати показали, що роторні системи та жорсткі вітрила (wingsails) забезпечують подібні й значні відносні заощадження, тоді як ефективність буксированого повітряного змія (towing kite) є вищою для менших суден і нижчою для більших. Важливим висновком є те, що для wingsail і роторів абсолютні паливні заощадження зростають із підвищенням швидкості судна, що спростовує поширене припущення про необхідність зниження швидкості для досягнення економічної доцільності вітрової тяги.

В роботі [6] був зробел огляд наукової літератури та практичних впроваджень вітрових технологій у суднoплавстві (2020 і раніше), підготовлений у межах європейського проєкту WASP, що реалізується у рамках Interreg North Sea Region Programme, але там було приклади реального використання вітрових систем на морських суднах, а також

оцінити поточні технології, ринкову ситуацію й інновації, а не на моделях в лабораторних умовах.

У 2022 році згідно інформаційному документу, поданий на розгляд 79-ї сесії MEPC (IMO), який детально висвітлює потенціал і роль вітрової допоміжної тяги (Wind Propulsion Technologies, WPTs) у досягненні цілей IMO щодо скорочення викидів парникових газів у морському транспорті [7] закликає розробити єдину методику оцінки ефективності WPT, ураховану у рамках CII, EEDI та EEXI; створити платформу технічного діалогу між країнами-членами IMO, розробниками та судновласниками та підтримати включення WPT у національні плани скорочення викидів парникових газів у секторі морських перевезень.

В роботі [8] найбільш повне на сьогодні системне дослідження потенціалу, ефективності, бар'єрів і нормативного контексту для впровадження вітроасистованого руху (WASP) у європейському та глобальному морському флоті.

Робота [9] - приклад прикладного техніко-економічного дослідження, присвяченого оцінці ефективності retrofit-проєкту з впровадження вітрової допоміжної тяги (WASP) на танкері. Автори застосували оптимізаційні алгоритми, аеродинамічне моделювання та економічні сценарії для визначення, коли і як вигідно встановлювати вітрові системи на судно, яке вже перебуває в експлуатації.

Метою даного дослідження є порівняння додаткової сили тяги та додаткової потужності, що створюється різними типами засобів, створеними для використання сили та енергії вітру.

Основна частина статті. Дослідження проводились в аеродинамічній лабораторії ОНМУ, яка має наступні параметри. Велика аеродинамічна труба має закритий контур із відкритою робочою частиною. Розміри: довжина 25,4 м; ширина – 3,0 м; висота – 3,6 м. Довжина робочої частини –

3,0 м, діаметр – 1,75 м. Повітряний гвинт приводиться у обертання електродвигуном постійного струму потужністю 220 кВт. Номінальна частота обертання може змінюватись у широких межах, при цьому максимальна швидкість повітряного потоку досягає 100 м/с, а мінімальна – 8 м/с (рис. 1).

Моделі вітрил. Для випробувань, в лабораторії ОНМУ, було виготовлено п'ять моделей м'яких вітрил [4]. З них - чотири вітрила типу спінакер, що відрізняються один від одного кривизною і розгорнутою площею, а також одна модель трикутного вітрила типу спанкер.



Рис. 1. Велика аеродинамічна труба ОНМУ

Всі моделі вітрил виконані з нейлону. Для аналізу, в цій статті, обрані дані досліджень для спінакеру, площею 500 м^2. Вітрило з такою площею можна порівняти з даними CE Delft для Towing kite, який має подібну площу. Модель спінакера, номер 4, яка обрана для дослідження показана на рисунку 2. Дані вітрил наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри моделей вітрил

Найменування вітрила	S_n, м^2	SPIN, м	SL, м	SMW, м	IC, м
Спінкер 1	0,072	0,052	0,33	0,28	0,156
Спінкер 2	0,095	0,068	0,38	0,32	0,176
Спінкер 3	0,057	0,034	0,29	0,21	0,117
Спінкер 4	0,089	0,068	0,42	0,29	0,161
Спанкер	0,082	-	-	-	-

$$SPIN = 1{,}01ICSL \tag{1}$$

SPIN - обмірна площа спінакера, м^2;

SL - довжина бічної шкаторини, м;

SMW – максимальна ширина спінакера, м;

IC - основа переднього трикутника, м.

Зв'язок між цими параметрами визначається наступною формулою [4]:

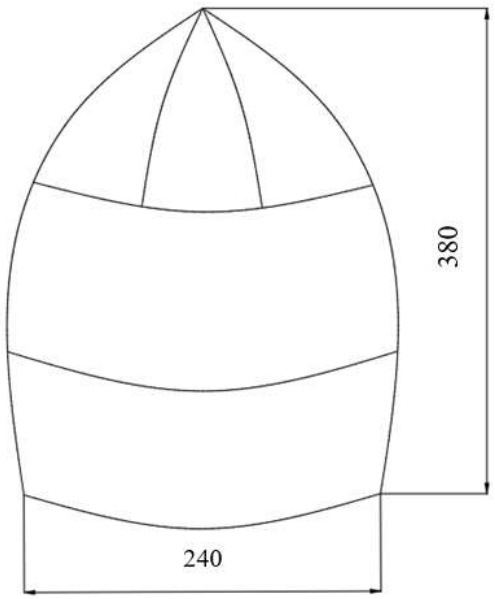


Рис. 2. Модель спінакера

Результати досліджень, для спінакера 4, представлені у вигляді залежності коефіцієнта тяги C_x від кута атаки α_B на рисунку 3.

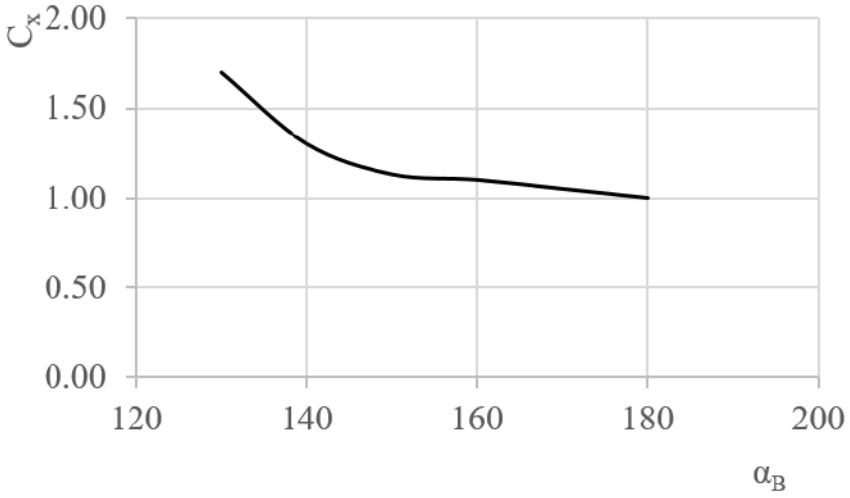


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тяги C_x від кута атаки α_B

Додаткова сила тяги визначається за формулою

$$t = n\frac{C_x(\alpha_B)\rho S_n v_B^2}{2}\cos\alpha_B \qquad (2)$$

n - кількість однакових вітрил;

$C_x(\alpha_B)$ - коефіцієнт тяги, (рис.3);

ρ - щільність повітря;

S_n - площа вітрила, м^2;

v_B - швидкість вимпельного вітру.

Значення додаткової сили тяги, розраховане за формулою (2) показано на рисунку 4.

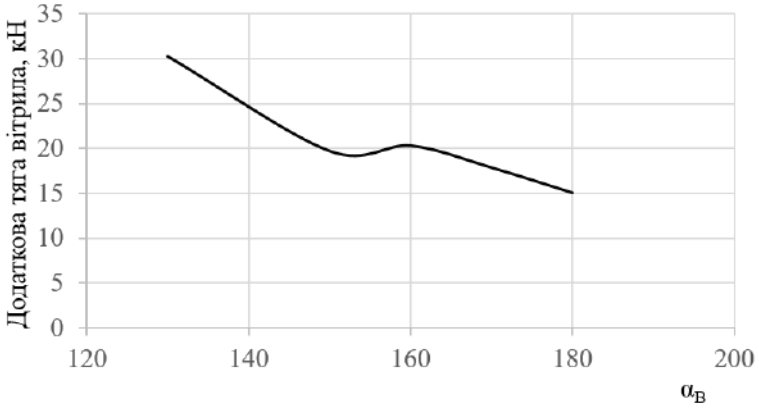


Рис. 4. Залежність додаткової сили тяги від кута атаки α_B

Значення збереженої потужності розраховано за пропозицією CE Delft [5] по формулі

$$P_{saved} = \frac{tv_{ship}}{\eta_p} \tag{3}$$

v_{ship} - швидкість судна;

t - додаткова тяга вітрила;

η_p =0,7 - коефіцієнт корисної дії.

За даними CE Delft розраховані середні значення збереженої потужності, для подібних, в дослідженнях ОНМУ та CE Delft, суден, таблиця 2. Значення збереженої потужності, отримані в лабораторії ОНМУ відображені на рисунку 5.

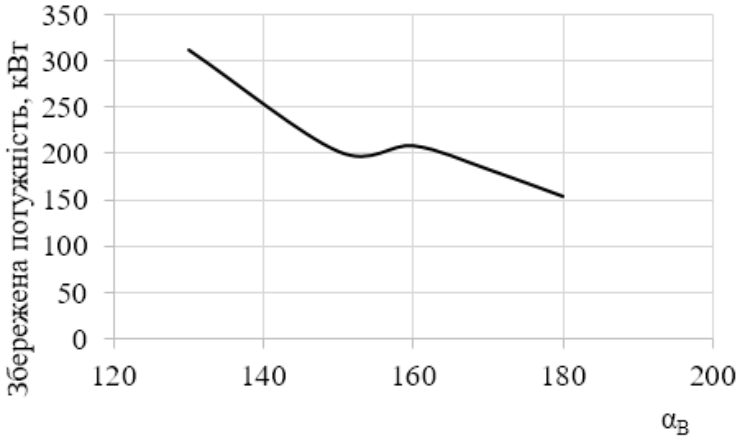


Рис. 5. Залежність збереженої потужності від кута атаки α_B

Таблиця 2

Характеристики суден та середнє значення збереженої потужності

Судно	Довжина, м	Ширина, м	Висота борту, м	v_{ship} вузл.	Середнє значення збереженої потужності $P_{saved} = \frac{tv_{ship}}{\eta_p}$, кВт		
					Спінакер, 500 м^2 (1 шт.)	Wingsail 270 м^2 (3 шт.)	Towing kite 400 м^2 (1 шт.)
ОНМУ	135	23	11,4	14	256	-	-
CE Delft	107	18	9	13,25	-	170	300

Висновки. Як видно з наведених розрахунків, м’яке вітрило типу спінакер може достойно конкурувати з іншими видами допоміжних вітрил. Враховуючи можливість застосування пристрою для швидкої постановки та прибирання цього парусу і відповідно можливість збереження вільних просторів на палубі, цей тип допоміжного вітрила може бути успішно використаний в морській практиці.

Список використаних джерел

1. Resolution MEPC.350(78) (adopted on 10 June 2022) 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency existing ship index (EEXI).

2. Resolution MEPC.214(63). 2012 Guidelines on survey and certification of the energy efficiency design index (EEDI).

3. Resolution MEPC.354(78) (adopted on 10 June 2022) 2022 Guidelines on the operational carbon intensity rating of ships (CII rating guidelines, G4).

4. Звіт про науково-дослідну роботу № 01890009570. Вирішення практичних задач по забезпеченню ходових та морехідних якостей суден та плавучих об'єктів Чорноморського морського пароплавства. Одеський інститут інженерів морського флоту. 1989.

5. Dagmar Nelissen, Michael Traut, Jonathan Köhler, Wengang Mao, Jasper Faber, Saliha Ahdour. Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships. Delft, CE Delft, November 2016.

6. WASP Project. D 5.B New Wind Propulsion Technology: A Literature Review of Recent Adoptions. 2020. 38 p. URL: https://vb.northsearegion.eu/public/files/repository/20210111083115_WASP-WP4.D5B-NewWPTALiteratureReviewofRecentAdoptions-Final.pdf (дата звернення: 12.12.2025). VB/NSRP Online Monitoring System+1

7. International Maritime Organization. Marine Environment Protection Committee. MEPC 79/INF.21: Wind Propulsion. 07.10.2022. 34 p. URL: https://www.wind-ship.org/archived-site/wp-content/uploads/2022/10/MEPC-79-INF.21-Wind-Propulsion-Finland-France-Saudi-Ar....pdf (дата звернення: 12.12.2025).

8. European Maritime Safety Agency. Potential of Wind-Assisted Propulsion for Shipping. Lisbon: EMSA, 2023. 272 p. URL:

https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5078-potential-of-wind-assisted-propulsion-for-shipping.html (дата обращения: 12.12.2025); PDF: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2023/11/EMSA-Report-potential-of-wind-assisted-propulsion-for-shipping_2023_11.pdf (дата звернення: 12.12.2025). emsa.europa.eu+2SAFETY4SEA+2

9. Reche-Vilanova M., Bingham H. B., Fluck M., Morris D. Cost–benefit analysis and design optimization of wind propulsion systems for a tanker retrofit case // Maritime Transport Research. 2025. Vol. 8. Art. 100132. DOI: 10.1016/j.martra.2025.100132. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666822X25000048 (дата звернення: 12.12.2025). ScienceDirect+2ResearchGate+2

References

1. Resolution MEPC.350(78) (adopted on 10 June 2022) 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency existing ship index (EEXI).

2. Resolution MEPC.214(63). 2012 Guidelines on survey and certification of the energy efficiency design index (EEDI).

3. Resolution MEPC.354(78) (adopted on 10 June 2022) 2022 Guidelines on the operational carbon intensity rating of ships (CII rating guidelines, G4).

4. Report on scientific research work No. 01890009570. Solving practical problems in ensuring the propulsion and seaworthiness of ships and floating objects of the Black Sea Shipping Company. Odesa Institute of Marine Engineers. 1989.

5. Dagmar Nelissen, Michael Traut, Jonathan Köhler, Wengang Mao, Jasper Faber, Saliha Ahdour. Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships. Delft, CE Delft, November 2016.

6. WASP Project. D 5.B New Wind Propulsion Technology: A Literature Review of Recent Adoptions. 2020. 38 p. URL: https://vb.northsearegion.eu/public/files/repository/20210111083115_WASP-WP4.D5B-NewWPTALiteratureReviewofRecentAdoptions-Final.pdf

7. International Maritime Organization. Marine Environment Protection Committee. MEPC 79/INF.21: Wind Propulsion. 07.10.2022. 34 p. URL: https://www.wind-ship.org/archived-site/wp-content/uploads/2022/10/MEPC-79-INF.21-Wind-Propulsion-Finland-France-Saudi-Ar....pdf

8. European Maritime Safety Agency. Potential of Wind-Assisted Propulsion for Shipping. Lisbon: EMSA, 2023. 272 p. URL: https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5078-potential-of-wind-assisted-propulsion-for-shipping.html

(дата звернення: 12.12.2025); PDF: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2023/11/EMSA-Report-potential-of-wind-assisted-propulsion-for-shipping_2023_11.pdf

9. Reche-Vilanova M., Bingham H. B., Fluck M., Morris D. Cost–benefit analysis and design optimization of wind propulsion systems for a tanker retrofit case // Maritime Transport Research. 2025. Vol. 8. Art. 100132. DOI: 10.1016/j.martra.2025.100132 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666822X25000048