

УДК 629.5.035

DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-21-33

**АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ РУШІЙНОГО КОМПЛЕКСУ
«ГРЕБНИЙ ГВИНТ-НАПРАВЛЯЮЧА НАСАДКА»
З ОПТИМАЛЬНИМИ ГІДРОДИНАМІЧНИМИ ЯКОСТЯМИ**

А.В. Печенюк

к.т.н., доцент кафедри «Теорія та устрій судна»

ORCID: 0000-0001-9745-2633

email: anpech@gmail.com

Т.Г. Стецюк

старший викладач кафедри «Теорія та устрій судна»

ORCID: 0009-0009-9120-0991

email: toma.stecyuk@gmail.com

Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна

***Анотація.** Застосування направляючих насадок є відомим способом підвищення ефективності рушійного комплексу. Для всіх суден з низькою відносною ходюю гребних гвинтів, яка відповідає підвищеному питомому навантаженню в проектному режимі, встановлення насадки є вигідним. Виконано аналіз гідродинамічних явищ, що супроводжують роботу сучасних комплексів, та їхній вплив на ефективність. Наведено основні геометричні параметри комплексу, що впливають на його гідродинамічні якості. Охарактеризовано вплив зазору між краєм лопаті гвинта та внутрішньою поверхнею насадки на кінцеві втрати. Розглянуто ефект, що полягає у помітному впливі на ефективність комплексу співвідношення діаметрів вихідного та внутрішнього перерізів насадки. Викладено підходи до проектування гребного гвинта для роботи у направляючій насадці. Методи розрахунку та проектування комплексу базуються на математичній моделі ідеального рушія, вихрової теорії гребного гвинта, експериментальних роботах у дослідних басейнах та кавітаційних трубах, чисельних методах гідродинаміки. Проаналізовано спеціально розроблені гвинти із усіченим контуром лопаті (серії Ка). Виконано порівняння ефективності комплексів зі звичайним та спеціально спроектованим серійним гвинтом, яке не виявило явної переваги останнього. Особливості спеціального гвинта можна пояснити міркуваннями надійності роботи у насадці та технологічності. Відзначено основні недоліки, усунення або пом'якшення яких може розглядатися як перспективний напрямок подальшого вдосконалення комплексу. Проаналізовані перспективні напрямки вдосконалення комплексу, зокрема, насадки із змінним профілем перерізу (осенесиметричні), ідея яких полягає у пристосуванні до нерівномірного попутного потоку за корпусом судна; застосування гребного гвинта з криволінійною утворюючою лопаттю, що забезпечує гідродинамічне розвантаження кінців лопатей. Як перспективний напрям підвищення ефективності розглянуто розвиток способів управління прикордонним шаром на внутрішній вихідній поверхні насадки. Також відзначені традиційні способи підвищення ефективності, що можуть бути однаково застосовані до ізованих гвинтів та гвинтів у складі комплексу.*

***Ключові слова:** комплекс «гребний гвинт-направляюча насадка»; насадка Корта; усічений контур лопаті; оптимізація комплексу «гвинт-насадка».*

© Печенюк А.В., Стецюк Т.Г., 2023

UDC 629.5.035

DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-21-33

**ANALYSIS OF THE CURRENT STATE IN DEVELOPMENT
OF THE THRUSTER UNIT «SCREW PROPELLER-NOZZLE»
WITH OPTIMAL HYDRODYNAMIC QUALITIES**

A. Pechenyuk

Ph.D., associate professor of department «Theory and structure of ships»

ORCID: 0000-0001-9745-2633

email: anpech@gmail.com

T. Stecyuk

Senior lecturer of department «Theory and structure of ships»

ORCID: 0009-0009-9120-0991

email: toma.stecyuk@gmail.com

National university «Odesa maritime academy», Odesa, Ukraine

Abstract. *Application of propulsive nozzles is a well-known way to improve efficiency of ship propulsion. Ducted propellers are advantageous for all ships with low advance coefficients of propellers caused by increased unit design loading. An analysis of hydrodynamic phenomena accompanying operation of the modern thruster units and their effect on propulsion efficiency has been performed. Principal geometric parameters of the thruster units, which affect their hydrodynamic qualities, have been submitted. Effects of a gap between blade tips and inner surface of the nozzle on tip losses, and of a ratio between diameters of narrowest and outlet nozzle cross-sections on the unit efficiency have been considered. Approaches to designing ducted propellers have been described. Design methods are based on the mathematical model of ideal thruster, the lifting-line theory of propellers, the experimental results obtained in ship model basins and water tunnels, on computational fluid dynamics. Specially developed propellers with wide blade tips (Ka series) have been analyzed. The comparison of efficiency showed no evident advantage of them over a normal propeller installed in nozzle. Their features can be explained rather by considerations of reliability and manufacturability. The main drawbacks, removal of which can be considered as significant improvement of the thruster unit, have been identified. Promising directions of development, such as wake-adapted nozzles with non-axisymmetric profiling and propellers with curved stacking lines of blades for hydrodynamic unloading of tip-region have been considered. Methods of boundary layer control applied to flow over inner outlet surfaces of nozzles have been considered as another promising direction. Conventional approaches to efficiency improvement, which can be applied to both isolated and ducted propellers, have been mentioned as well.*

Keywords: *thruster unit «screw propeller – nozzle»; Kort nozzle, wide blade tips; optimization of ducted propellers.*

Вступ. Останніми роками боротьба за підвищення економічної ефективності суден ведеться комплексним шляхом вдосконалення обводів корпусу, рушійних комплексів і машинних установок.

В умовах, що склалися, питоме навантаження рушіїв у більшості транспортних суден значно перевищує оптимальний рівень, тому велике поширення отримали такі способи підвищення ефективності гребних гвинтів, як застосування направляючих насадок, співвісних гребних гвинтів протилежного обертання, гребних гвинтів збільшеного діаметра зі зниженою частотою обертання і т.д.

Рушійний комплекс «гребний гвинт-направляюча насадка» є другим за поширеністю типом рушія після традиційного (відкритого) гребного гвинта. Як правило, він застосовується на суднах з високим питомим навантаженням рушіїв по тязі та потужності, обумовленим високою тягооснащеністю (буксири, промислові судна, судна з високою повнотою обводів), або малою осадкою, що обмежує діаметр гвинтів (судна внутрішнього та змішаного плавання).

З моменту своєї появи комплекс «гребний гвинт-направляюча насадка» пройшов досить довгий шлях розвитку, який позначився на конструкції як насадки, так і гребного гвинта. Зміни конструкції були викликані, з одного боку, прагненням покращити гідродинамічну взаємодію між гвинтом та насадкою та підвищити ККД комплексу, з іншого боку, необхідністю забезпечити високу надійність та довговічність його елементів. Тим не менш, роботи з подальшого вдосконалення комплексу є актуальними та активно ведуться в усіх країнах із розвиненим кораблебудуванням.

Мета статті – аналіз розвитку конструктивних та гідродинамічних особливостей комплексу «гребний гвинт-направляюча насадка», що склалися на цей час, спрямований на пошук перспективних напрямів його вдосконалення.

Основний матеріал. Робота сучасного комплексу «гребний гвинт-направляюча насадка» в якості суднового рушія супроводжується цілим рядом гідродинамічних явищ різного характеру та ступеня складності.

Основними параметрами, що характеризують комплекс і впливають на його гідродинамічні характеристики, є (рис. 1): діаметр гребного гвинта, контур лопаті гребного гвинта, відносна довжина та профіль насадки, коефіцієнт розкриття та коефіцієнт розширення насадки, зазор між краєм лопаті та внутрішньою поверхнею насадки [1], які пов'язані між собою так:

- відносна довжина насадки

$$\bar{l}_n = \frac{l_n}{D}, \quad (1)$$

- коефіцієнт розкриття

$$\alpha_n = \frac{F_e}{F_n}, \quad (2)$$

- коефіцієнт розширення насадки

$$\beta = \frac{F_a}{F_n}, \quad (3)$$

де F_e – площа вхідного отвору насадки;

$$F_n = \frac{\pi}{4}(D + 2c)^2 - \text{площа робочого перерізу насадки};$$

c – зазор між краєм лопаті та внутрішньою поверхнею насадки;

F_a – площа вихідного отвору насадки;

D – діаметр гребного гвинта;

l_n – довжина насадки.

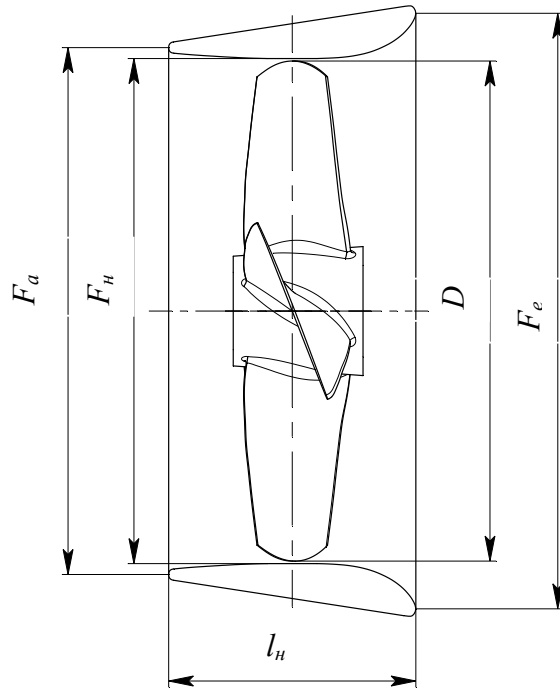


Рис. 1. Основні геометричні елементи комплексу
«гребний гвинт-направляюча насадка»

З точки зору гідродинаміки, дія насадки спочатку пов'язувалася зі зниженням кінцевих втрат [2] завдяки малому відносному зазору між краєм лопаті гвинта і внутрішньою поверхнею насадки. Кінцеві втрати являють собою обумовлене різницею тисків перетікання води з нагнітаючого боку на засмоктуючий через край лопаті, в результаті якого зменшується реактивний струмінь і упор гребного гвинта. Відповідно до теорії ідеального рушія [3], кінцеві втрати підвищуються зі збільшенням різниці між викликанною швидкістю і швидкістю потоку, що набігає на рушій, тобто при підвищенні навантаження рушія по упору.

При зниженні навантаження гребного гвинта по упору відбувається зниження частки кінцевих втрат, і одночасно зростають втрати на подолання власного опору насадки, обумовленого в'язкістю рідини, внаслідок чого ефективність дії комплексу «гвинт-насадка» знижується.

Однак слід зазначити, що малі значення зазору призводять до появи постійних кавітаційних осередків по краях лопатей, внаслідок чого відбувається інтенсивна ерозія внутрішньої частини насадки, яку доводиться посилювати спеціальним потовщеним поясом.

Ефективність насадки також залежить від її профілювання. Внутрішній переріз насадки у районі лопатей гвинта, зазвичай, вужче, ніж її вхідний перетин (відносна різниця виражається коефіцієнтом розкриття). Подібна насадка стискає потік, працюючи як конфузор, що підвищує швидкість протікання води в районі установки гребного гвинта. Вплив насадки – конфузора на гребний гвинт можна описати за допомогою моделі ідеального рушія [3; 4].

Помітний вплив на ККД комплексу надає і співвідношення діаметрів вихідного та внутрішнього перерізів насадки (коефіцієнт розширення). Виявилось, що досить тонкі варіації цього співвідношення призводять до зміни ККД у зв'язку з режимом навантаження комплексу. Докладне дослідження цього явища [4] дозволило пояснити його проявом ефекту, наближеного до ефекту Н. Coandă [5].

Струмінь відкритого гребного гвинта при високих навантаженнях по упору за гвинтом помітно стискається через велику різницю між тисками всередині струменя і в зовнішньому потоці. Це стиснення є однією з причин зниження ККД гребного гвинта за механізмом, що описується теорією ідеального рушія [3,6], при зниженні його відносної ходи. При роботі гвинта в насадці струмінь, омиваючи внутрішню поверхню насадки, прилипає до неї і прагне рухатися вздовж цієї поверхні. У тих випадках, коли внутрішня поверхня насадки дещо ширша за струмінь ізольованого гвинту на даному режимі, за комплексом утворюється ширший струмінь, «розтягнутий» насадкою, що призводить до відповідного зростання ККД.

Однак позитивний ефект може виявлятися лише в деяких межах, при перевищенні яких, тобто при занадто різкому розширенні струменя насадкою, відбувається відрив струменя від внутрішньої поверхні та утворення великих вихорів, що призводить до різкого зниження ККД комплексу. Значення коефіцієнту розширення, крім впливу на ККД комплексу на передньому ході (у першому квадранті кривих дії), дуже впливає і на ККД комплексу на задньому ході (у четвертому квадранті), оскільки в останньому випадку вихідна частина насадки працює як вхідна. Так як у більшості насадок коефіцієнти розширення, за вказаною вище причиною, значно менше коефіцієнтів розкриття, на заднім ході гребний гвинт у складі комплексу виявляється перевантаженим, а насадка працює недостатньо ефективно. Таким чином, підвищення коефіцієнтів розширення за умови вирішення проблеми відриву у вихідній частині насадки є дуже бажаним.

У вихідній частині, що розширюється, насадка діє як дифузор, що знижує швидкість і підвищує тиск у струмені. Як відомо, потік, що протікає через дифузор, схильний до відриву при перевищенні певного кута розкриття дифузора. Для дифузора з круглим поперечним перерізом оптимальними кутами розкриття є кути не більше 6-8 °. Опис фізичної картини та механізму відриву потоку в дифузорах можна знайти у книзі Р.К. Cheng [7].

Профілі насадок № 19А, № 22 та № 24 MARIN, а також № 6 ЦНДІ ім. акад. Крилова, які часто застосовуються на сучасних суднах, мають коефіцієнти розширення, еквівалентні або близькі до оптимальних кутів розкриття круглого дифузора. Можна припустити, що частини сучасних насадок, що розширюються, відповідають умові безвідривного обтікання.

Порівняно з насадкою, дифузор працює у більш простих умовах, оскільки потік у ньому рухається рівномірно вздовж осі. Потік у насадці має нерівномірне розподілення швидкостей, особливо за корпусом судна, при цьому гвинт є джерелом підвищеної турбулентності. Як відомо, підвищення турбулентності призводить до більшої стійкості прикордонного шара [8]. Крім того, гвинт закручує воду, надаючи їй доцентрове прискорення, яке додатково спрямовує струмінь до внутрішньої поверхні насадки. Тому реальна динаміка руху струменя гвинта через насадку може суттєво відрізнитись від руху рівномірного потоку через послідовно встановлені конфузор та дифузор.

Умови роботи гребного гвинта у складі суднового рушійного комплексу «гребний гвинт-направляюча насадка» мають деякі відмінності від умов роботи ізольованого гребного гвинта. У насадці може використовуватися і звичайний гвинт, але є кілька підходів до проектування спеціальних гребних гвинтів, пристосованих до роботи в насадці.

У вітчизняній літературі відомий метод О.М. Басина [4], що дозволяє за допомогою низки поправок конвертувати гідродинамічні характеристики ізольованого гвинта в гідродинамічні характеристики комплексу «гребний гвинт-направляюча насадка». Метод слідує принципу проведення самохідних модельних випробувань і виконання розрахунків ходкості, згідно з яким направляюча насадка розглядається як частина корпусу.

У ОСТ 5.4129-75 [9] наведено ряд рекомендацій щодо вибору геометричних елементів та розробки теоретичного креслення гребного гвинта, пристосованого до роботи в насадці, серед яких певний інтерес становлять відомості про оптимальну форму контуру лопаті та розподіл циркуляції вздовж радіуса. Вказано, що застосування усіченої форми контура лопаті може дати вигоду у ККД комплексі лише при високих крокових відносинах $P/D > 1.1$ та великому питомому навантаженню. Запропонований розподіл циркуляції вздовж радіуса розроблено з метою зниження інтенсивності кінцевого вихора та шкідливого вплива кавітації в ньому на довговічність внутрішньої обшивки насадки. Очевидно, застосування усіченого контура лопаті та заданого розподілу циркуляції, що веде до змінного кроку вздовж радіуса та специфічного розподілу максимальної кривизни перерізів, є істотними модифікаціями. Однак у ОСТ 5.4129-75 не представлені дані серійних модельних випробувань комплексів із подібними гребними гвинтами.

У зарубіжній практиці широкої популярності набула фундаментальна робота М.В.С. Oosterweld [10], в якій, серед іншого, представлені результати систематичних модельних випробувань гвинтів серії В, а також спеціально розроблених гвинтів з усіченим контуром лопаті у різних направляючих насадках. Серії останніх одержали позначення Ка на честь винахідника турбін із подібною формою лопаток V. Kaplan. Таким чином, гребні гвинти серій Ка можна вважати першим типом гвинтів, спеціально спроектованих для роботи у направляючій насадці.

У зовнішньому вигляді гвинтів серій Ка (рис. 2) привертають увагу широкі краї усічених лопатей та їх симетричний контур, виконаний майже без шаблевидності і відкидки. Гвинти серій Ка мають постійний розподіл крока вздовж радіусу. Профілювання лопатей авіаційно-сегментне, причому кривизна перерізів підібрана таким чином, що нагнітаюча сторона більшості перерізів (крім кореневих) являє собою пряму лінію. Очевидно, це виконано для максимального збільшення периметра профіля по засмоктуючій стороні для боротьби з кавітацією на ній.

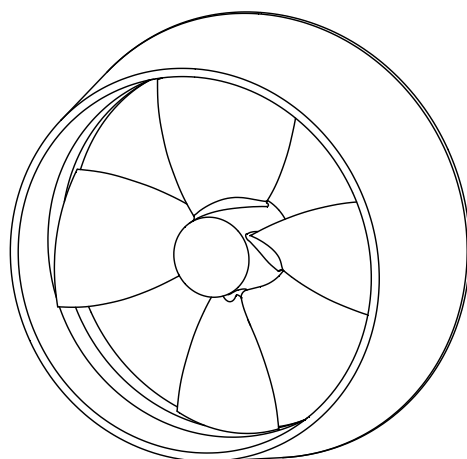


Рис. 2. Гребний гвинт серії Ка 4-70 у направляючій насадці №19А

Незважаючи на такі помітні геометричні особливості, гідродинамічні характеристики та ефективність гвинтів серій Ка у складі комплексу «гребний гвинт направляюча насадка» досить слабо відрізняються від показників звичайних гребних гвинтів. Як приклад на рисунку 3 представлена залежність максимального ККД двох комплексів у вільній воді від коефіцієнта навантаження за моментом при постійному числі обертів K_{nQ} .

Перший комплекс складається з гвинта Ка 4-70 та насадки № 19А за даними [10], другий з гвинта Т 4-75 та насадки № 6 ЦНДІ ім. акад. Крилова за даними Додатка 3 ОСТ 5.4129-75. На рисунку 3 також показана аналогічна залежність для ізолюваного гребного гвинта серії В 4-70, і відзначені значення K_{nQ} , що відповідають сучасному буксиру-штовхачеві та судну обмеженого району плавання (СОРП) [11].

Як видно з рисунка 3, комплекс з гвинтом серії Ка не має явних переваг у порівнянні зі звичайним гвинтом серії Т, що працює в насадці, практично в усьому діапазоні питомих навантажень, де комплекс «гребний гвинт-направляюча насадка» ефективніше ізолюваного гребного гвинта.

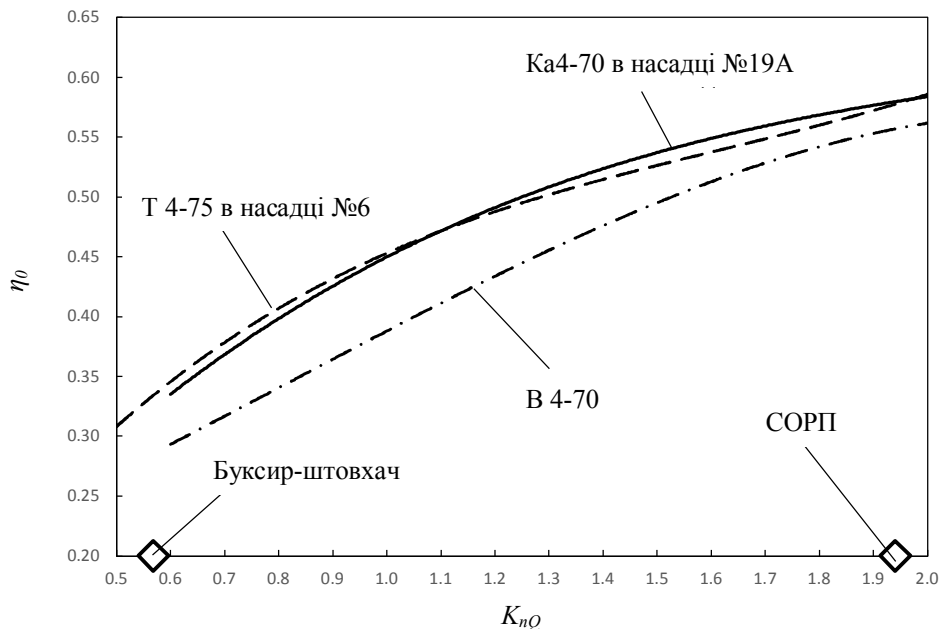


Рис. 3. ККД гребних гвинтів в залежності від питомого навантаження

У роботі [10] геометричні особливості лопатей гвинтів серій Ка обґрунтовані, в основному, міркуваннями надійності експлуатації та технологічності виготовлення. Усічений контур лопаті призводить до однакової малої величини зазору по всій хорді кінцевого перерізу, тому знижується ймовірність застрягання великих предметів, що потрапляють у зазор з боку кромки. Збільшена ширина лопаті в кінцевому перерізі дозволяє також локально підвищити дискове відношення в районі, схильному до підвищеної кавітації. Постійний вздовж радіусу крок і плоскі образуючі нагнетаючої сторони, дозволяють значно спростити технологію виробництва.

В даний час більша частина комплексів «гребний гвинт-направляюча насадка» у світовому суднобудуванні проектується на основі серій Ка, хоча гвинти та насадки часто піддаються модифікаціям, спрямованим на виправлення недоліків оригінальних серій. Найчастіше до таких відносять схильність до сильної кавітації у зазорі [12], а також підвищену шумність і вібрації. Відповідно до сучасних тенденцій, лопатям надають велику шаблеподібність, що часто вимагає одночасного введення відкидки для спрощення форми лопаті (унікнення ложкоподібності) та її коректного розміщення щодо насадки. Очевидно, такі модифікації можуть призводити до втрати технологічних переваг оригінальних серій. Тим не менш, шаблеподібність і відкидка слабо впливають на гідродинамічні характеристики, що дозволяє в розрахунках проектування використовувати дані серійних випробувань [10].

Крім завдань, пов'язаних з усуненням або пом'якшенням згаданих недоліків, очевидними перспективними напрямками вдосконалення комплексу є зниження опору насадки і підвищення ККД гребного гвинта.

Ще у роботі M.W.C. Oosterveld [10] було запропоновано напрями вдосконалення комплексу, які на той час розглядалися як перспективні. Це: встановлення гвинта з кільцем, що з'єднує лопаті, встановлення в насадці контрпропелера, застосування насадок зі змінним по колу профілем перерізу.

Перша модифікація спрямована на зниження кавітаційного руйнування насадки та підвищення надійності її конструкції, проте супроводжується ускладненням технології виготовлення та зниженням ККД.

Ідея насадки зі змінним профілем перерізу (осенесиметричною) полягає у її пристосуванні до нерівномірного попутного потоку за корпусом судна. Профілювання насадки відповідно до заданого розподілу швидкостей набігаючого потоку, дозволяє оптимізувати коефіцієнти розкриття і розширення як локальні, а не середні величини. Експериментальні роботи підтвердили раціональність застосування гребних гвинтів у осенесиметричних насадках, особливо на суднах з великим коефіцієнтом повноти [10]. Важливою перевагою таких насадок є можливість зниження нестационарних гідродинамічних сил на лопатях гвинта за рахунок вирівнювання поля швидкостей, набігаючого на гребний гвинт усередині насадки, що зменшує циклічні навантаження, діючі на лопаті і валопровід, а також зменшує рівень вібрації корпусу. Недоліком осенесиметричних насадок є, перш за все, складність виготовлення, яка особливо ускладнює їх застосування на невеликих суднах.

У роботі [13] для вирішення аналогічних завдань було запропоновано застосування гребного гвинта з криволінійної утворюючої лопаті, що забезпечує гідродинамічне розвантаження кінців лопатей. Кінцева ділянка лопаті гвинтів такого типу своєю нагнітаючої або засмоктуючої стороною дотична до циліндричної поверхні, співвісної з гребним гвинтом. Висловлено припущення про корисність установки гребних гвинтів з криволінійної утворюючої лопаті саме у направляючих насадках, оскільки насадка виключає появу значних радіальних складових потоку, до яких такі гвинти виявляють чутливість у вільній воді. Основною перевагою комплексу з такими гвинтами є радикальне зниження кавітації в зазорі через знижену інтенсивність кінцевих вихорів лопатей.

Відповідно роботи [13], у середині 70-х рр. П.Л. Ліфенко та А.Р. Тогунац провели експериментальне дослідження, метою яких було зниження кавітації між кінцями лопатей та насадкою, в якому порівняли гвинти з прямолінійною та криволінійною утворюючою лопаті. Виконані дослідження показали, що застосування криволінійної утворюючої суттєво покращує кавітаційні характеристики комплексу при мінімальному зниженні його ККД.

Як заходи щодо зниження опору насадки запропоновано зміну форми зовнішньої поверхні. Одним із відомих напрямів удосконалення комплексу є застосування насадки типу Rice [14]. Насадка Rice в порівнянні з насадкою Kort має криволінійну форму зовнішньої поверхні. Такий профіль дозволяє знизити вихровий опір по зовнішній стороні та підвищити ефективність комплексу, особливо при його нижчих питомих навантаженнях. Однак введення в профіль криволінійної

утворювальної призводить до того, що зовнішня поверхня замість конічної стає поверхнею подвійної кривизни, що значно ускладнює виготовлення насадки і підвищує її вартість.

Незважаючи на фундаментальний характер проблеми з відривом прикордонного шару (ПШ) зі збільшенням коефіцієнтів розширення насадки, нині в інших галузях техніки можна зустріти приклади вирішення подібних проблем. Робота направляючої насадки у складі комплексу має деяку схожість з процесами у авіаційних турбореактивних двигунах. Як перспективний напрям підвищення ККД останніх, нині розглядається розвиток способів управління ПШ на внутрішніх поверхнях каналу [15]. Відмінною особливістю турбореактивних двигунів у порівнянні з комплексом «гребний гвинт-направляюча насадка» є їхня значно більша питома потужність і складність, що виражається в наявності різних допоміжних систем та агрегатів. Однак останнім часом з'явилися варіанти комплексу [16], в яких внутрішній обсяг насадки використовується для примусової циркуляції теплоносія системи охолодження головного двигуна. Подібні підходи (використання внутрішнього обсягу насадки для примусової циркуляції в ній рідини) теоретично можуть бути використані не тільки на користь роботи системи охолодження, але й для здійснення заходів з управління ПШ.

Крім перерахованих напрямів необхідно вказати і традиційні способи підвищення ККД гребних гвинтів, що однаково застосовуються до ізольованих гвинтів та гвинтів у складі комплексу. До них відносяться: оптимізація розподілу навантаження лопаті за упором за рахунок її профілювання; обґрунтування мінімальних товщин перерізів лопатей, виходячи із запасів міцності у кожному конкретному проекті; обґрунтування мінімальної величини дискового відношення, що забезпечує достатні запаси на кавітацію. У разі роботи гребного гвинта у складі комплексу ці напрямки мають свою специфіку. Наприклад, відомі способи оптимізації розподілу навантаження вздовж лопаті під час роботи гвинта за корпусом [17; 18], як правило, спираються на дані щодо окружного розподілу швидкостей номінального попутного потоку. У разі роботи гвинта в насадці номінальний попутний потік, очевидно, набігає на весь комплекс в цілому і для гвинта значно спотворюється присутністю насадки. Тому традиційні способи підвищення ефективності гребних гвинтів при їх роботі в насадці також потребують модифікації або доробки.

Висновки. Підходи до конструювання комплексів «гребний гвинт-направляюча насадка» розвивалися у напрямках розробки раціональних профілей насадок та модифікації геометрії гребних гвинтів, чи їх повного перепроєктування із застосуванням особливостей форми лопатей, нехарактерних для звичайних гребних гвинтів. Незважаючи на те, що за останні десятиліття знайдено нові технічні рішення щодо підвищення ефективності комплексу, ще залишається велика кількість проблем, які не можна вирішити у рамках існуючих проектних методик.

Основними недоліками комплексу в даний час можна вважати наступні:

- наявність у зазорі між краєм лопаті та внутрішньою поверхнею насадки постійних кавітаційних осередків, що призводить до ерозійного руйнування насадки;

- вузький діапазон режимів роботи, в якому дифузorna вихідна частина внутрішньої поверхні насадки позитивно впливає на ККД комплексу;

- взаємно-суперечливі вимоги до профілю насадки, що забезпечує максимальну ефективність на передньому та задньому ході;
- відсутність методів проектування у складі комплексу гребних гвинтів, пристосованих до попутного потоку судна.

Завдання, пов'язані з усуненням або пом'якшенням перелічених недоліків, є основними перспективними напрямками вдосконалення комплексу «гребний гвинт-направляюча насадка». Крім них, очевидними напрямками залишаються завдання зниження опору насадки та підвищення ККД гребного гвинта.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Русецкий А.А., Жученко М.М., Дубровин О.В. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1971. – 288с.
2. van Lammeren, W.P.A., Troost L. & Koning J.G. Resistance, propulsion and steering of ship: A manual for designing hull forms, propeller and rudders. Haarlem, Holland: H. Stam., 1948. – 366 P.
3. Kerwin J.E. & Hadler J.B. Paulling J.R. (Ed.). Propulsion. Jersey City, USA: SNAME, 2010. – 79 P.
4. Басин А.М., Анфимов В.Н. Гидродинамика судна: Сопротивление воды, движители, управляемость и качка. – Л.: Речной транспорт, 1961. – 684 с.
5. Guyon E., Hulin J.-P., Petit L., Mitescu C.D. Physical Hydrodynamics. – Oxford University Press, 2001. – 505 P.
6. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Л.: Судостроение, 1973. – 512 С.
7. Чжен П. Отрывные течения. Том 1. Москва. Издательство «Мир», 1972. – 300 С.
8. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 574 с.
9. ОСТ 5.4129-75. Комплекс движительный гребной винт – направляющая насадка. Методика расчета и правила проектирования. – Введ. 1975-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 202 с.
10. Oosterveld M.W.C. Wake adapted ducted propellers). Wageningen, the Netherlands: Netherlands Ship Model Basin. – 1970. – No. 345.
11. Печенюк А.В., Стецюк Т.Г. Аналіз конструктивних особливостей гребного гвинту, призначеного до роботи у направляючій насадці / Печенюк А.В., Стецюк Т.Г. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали Всеукр. наук.-техн.конф. з міжнар. уч., м.Миколаїв, – 2021. – С. 183-187.
12. Koronowicz T., Krzemianowski Z., Tuszkowska T., Szantyr J. A. A complete design of ducted propellers using the new computer system // Polish maritime research. – 2009. – No. 2. – P. 34-39.

13. Тогунянц А.Р., Вишневецкий Л.И., Красавцев В.Е. Выбор формы лопасти гребного винта как средства решения гидродинамических задач // *Морской вестник*. – 2009. – No. 3 (31). – С. 101-105.
14. Rice speed nozzle: веб-сайт. URL: <http://ricefoundries.com/>
15. Веретенников С.В. Снижение гидравлических потерь в отрывном диффузоре камеры сгорания газотурбинного двигателя путем управления пограничным слоем: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.04.12 Санкт-Петербург, – 2008. – 16 с.
16. Nozzle Cooling: веб-сайт. URL: <https://www.damenmc.com>
17. Carlton J. *Marine propellers and propulsion*. – 2nd ed. – Oxford (UK), Butterworth-Heinemann, 2007. – 560 P.
18. Breslin J.P., Andersen P. *Hydrodynamics of ship propellers*, – 1996. – 560 P.

REFERENCES

1. Rusetskiy A.A., Zhuchenko M.M., Dubrovin O.V. *Sudovyye dvizhiteli [Ship thrusters]*. L.: Sudostroenie [Shipbuilding], 1971. – 288 P. (in Russian).
2. van Lammeren, W.P.A., Troost L. & Koning J.G. *Resistance, propulsion and steering of ship: A manual for designing hull forms, propeller and rudders*. Haarlem, Holland: H. Stam., 1948. – 366 P.
3. Kerwin J.E. & Hadler J.B. Paulling J.R. (Ed.). *Propulsion*. Jersey City, USA: SNAME, 2010. – 79 P.
4. Basin A.M., Anfimov V.N. *Gidrodinamika sudna: soprotivlenie vodyi, dvizhiteli, upravlyaemost i kachka [Ship hydrodynamics: water resistance, thrusters, maneuverability and motions]*. – L.: Rechnoy transport [River transport], 1961. – 684 P. (in Russian).
5. Guyon E., Hulin J.-P., Petit L., Mitescu C.D. *Physical Hydrodynamics*. – Oxford University Press, 2001. – 505 P.
6. Voytkunskiy Ya.I., Pershits R.Ya., Titov I.A. *Spravochnik po teorii korablya [Handbook on theory of ships]*. L.: Sudostroenie [Shipbuilding], 1973. – 512 P. (in Russian).
7. Chang P. *Separation of Flow. Volume 1*. Moskva. Izdatelstvo «Mir», 1972. – 300 P. (in Russian).
8. Prandtl L. *Gidraeromehanika [Hydroaerodynamics]*. Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2000. – 574 P. (in Russian).
9. OST 5.4129-75. *Kompleks dvizhitelnyiy «grebnoy vint – napravlyayuschaya nasadka». Metodika rascheta i pravila proektirovaniya [Thruster unit «screw propeller – propulsive nozzle». Method of calculation and rules of design]*. – Vved. 1975-07-01. – M.: Izd-vo standartov [Publishing house of standards], 1975. – 202 P. (in Russian).
10. Oosterveld M.W.C. *Wake adapted ducted propellers*. Wageningen, the Netherlands: Netherlands Ship Model Basin. – 1970. – No. 345.

11. Pechenyuk A.V., Stecyuk T. (2021) *Analiz konstruktivnykh osoblyvostei hrebnoho hvyntu, pryznachenoho do roboty u napravliaiuchii nasadtsi [Analysis of design features of marine propeller intended to function in propulsive nozzle]. Suchasni tekhnologii proiektuvannia, pobudovy, yekspluata-tsii i remontu suden, morskyykh tekhnichnykh zasobiv i inzhenernykh sporud: materialy Vseukr. nauk.-tekhn.konf. z mizhnar. uch., m. Mykolaiv, 183-187.*
12. Koronowicz T., Krzemianowski Z., Tuszkowska T., Szantyr J. A. (2009). *A complete design of ducted propellers using the new computer system. Polish maritime research, 2, 34-39.*
13. Togunyants A.R., Vishnevskiy L.I., Krasavtsev V.E. (2009). *Vyibor formy lopasti grebnogo vinta kak sredstva resheniya gidrodinamicheskikh zadach [Choice of blade contour shape of screw propellers as a means to solve hydrodynamic problems]. Morskoy vestnik, 3 (31), 101-105 (in Russian).*
14. *Rice speed nozzle: веб-сайт. URL: <http://ricefoundries.com/>*
15. Veretennikov S.V. *Snizhenie gidravlicheskih poter v otryivnom diffuzore kameryi sgoraniya gazoturbinnogo dvigatelya putem upravleniya pogranychnyim sloem [Reduction of hydraulic losses in separative diffusers of combustion chambers of gas turbine engines by means of boundary layer control]: avtoref. dis. ... kand. teh. nauk: 05.04.12 Sankt-Peterburg. – 2008. – 16 P. (in Russian).*
16. *Nozzle Cooling: веб-сайт. URL: <https://www.damenmc.com>*
17. Carlton J. *Marine propellers and propulsion. – 2nd ed. – Oxford (UK), Butterworth-Heinemann, 2007. – 560 P.*
18. Breslin J.P., Andersen P. *Hydrodynamics of ship propellers, – 1996. – 560 P.*

Стаття надійшла до редакції 24.06.2023

Посилання на статтю: Печенюк А.В., Стецюк Е.Г. Аналіз стану проблеми проектування рушійного комплексу «гребний гвинт-направляюча насадка» з оптимальними гідродинамічними якостями // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 3 (70). С. 21-33. DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-21-33.

Article received 24.06.2023

Reference a journalartic: Pechenyuk A., Stecyuk T. Analysis of the current state in development of the thruster unit «Screw propeller – nozzle» with optimal hydrodynamic qualities // Herald of the Odesa national maritime university: Coll. scient. works, 2023. № 3 (70). P. 21-33. DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-21-33.