

УДК 629.5

DOI: 10.31653/2306-5761.37.2025.92-108

A CONCEPT OF DRY-CARGO VESSEL FOR ESTUARIES OF EUROPEAN RIVERS BASED ON NATIONAL EXPERIENCE IN DESIGNING SHIPS OF RESTRICTED NAVIGATION AREA

КОНЦЕПТ СУХОВАНТАЖНОГО СУДНА ДЛЯ ГИРЛОВИХ ДІЛЯНОК ЄВРОПЕЙСЬКИХ РІЧОК НА ОСНОВІ ВІТЧИЗНЯНОГО ДОСВІДУ ПРОЕКТУВАННЯ СУДЕН ОБМЕЖЕНОГО РАЙОНУ ПЛАВАННЯ

Y. Vlasenko, assoc. prof., Ph.D. A. Pechenyuk^{ID}, head of dept. "TSS", Ph.D., assoc. prof.

T. Stetsiuk, senior lecturer

Є.А. Власенко, доц., к.т.н. А.В. Печенюк, зав. каф. "ТУС", к.т.н., доц.

Т.Г. Стецюк, ст. викладач

National university "Odessa maritime academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

Ships of restricted navigation area or river-sea ships are usually designed based on the restrictions of inland waterways. Thus, principal dimensions of the ships are inherent to specific operational regions. Ukrainian designers took a part in development of new-generation (post-soviet) ship classes for Dnipro River. They acquired such distinctive features as: super-full hull forms ($C_B > 0.9$); high coamings of cargo holds; podded propulsors providing both propulsion and maneuverability. These and some other technical solutions developed by national designers are considered with respect to a concept of dry-cargo vessel for estuaries of European rivers. Analysis of the corresponding waterway restrictions has shown that principal dimensions acceptable for estuaries of major European rivers are close to one of the national ship classes. Certain rearrangement of cargo spaces is necessary taking into account the change of length and different air draft. A rational constructive midship section has been suggested. It is able to provide navigation area R2-RS according to the Shipping Register of Ukraine. Two variants of stern lines have been developed and studied using numerical (CFD) simulations of towing in deep and shallow water. According to the results, one variant of the hull form is quite favorable from the standpoint of efficient propulsion in shallow water, while the second variant has significant advantages in deep water due to better propeller-hull interaction. Based on propulsion calculations it is shown that efficiency of the proposed configurations with podded propulsors is quite comparable to that with conventional propulsion systems under the same circumstances.

Keywords: ships of restricted navigation area, design of river-sea ships, CFD simulation of ships, hull form optimization, ship propulsion.

АНОТАЦІЯ

У статті йдеться про проектування суден обмеженого району плавання, які зазвичай проектуються з урахуванням шляхових обмежень, що діють на внутрішніх водних шляхах планованого району експлуатації. В Україні було створено проекти подібних суден нового (пострадянського) покоління, що отримали такі характерні риси, як: надповні обводи корпусу ($C_B > 0.9$); підвищені комінгси вантажних трюмів; гвинто-кермові колонки у якості єдиних засобів забезпечення ходовості та керованості. Виконаний аналіз шляхових обмежень на

гирлових ділянках європейських річок показав, що створений тип судна обмеженого району плавання цілком може бути адаптований до їхніх умов. Для цього пропонується перекомпонувати вантажну зону з врахуванням відмінностей у головних розмірах та надводному габариті, залишивши підвищену висоту комінгсів для забезпечення загальної поздовжньої міцності. Раціональність останнього рішення підтверджена опрацюванням конструктивного мідель-шпангоуту та попереднім розрахунком загальної поздовжньої міцності судна, який вказує на можливість задовільнити вимоги до району R2-RS згідно до Регістра судноплавства України. Для покращення ходових якостей на глибокій воді та на мілководді розроблено та досліджено два нових варіанти кормових обводів. Дослідження виконано за допомогою чисельного (CFD) моделювання буксирування судна на глибокій воді та на мілководді. Згідно з отриманими результатами, один з розглянутих варіантів обводів є вдалим з точки зору ефективної роботи пропульсивного комплексу на мілководді, в той час як інший має серйозні переваги в умовах глибокої води завдяки покращеній взаємодії між корпусом та рушійми. Виконана оцінка ходових якостей судна показала, що запропоновані рішення здатні забезпечити ефективність руху з гвинто-кормовими колонками, що цілком співставна з ефективністю, характерною для традиційних пропульсивних установок в аналогічних умовах.

Ключові слова: проектування суден обмеженого плавання, проектування суден змішаного плавання, CFD моделювання суден, оптимізація форми корпусу, ходові якості судна.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

Проектування вантажних суден обмеженого району плавання (СОРП) суттєво відрізняється як від проектування морських суден необмеженого району, так і від проектування суден внутрішнього плавання. З одного боку, необхідно зважати на вимоги експлуатації в морі, з іншого – на обмеження на внутрішніх водних шляхах. Останні, як правило, є специфічними для даного географічного району експлуатації і безпосередньо впливають на головні розміри, тобто, багато в чому визначають проектні показники СОРП. У загальному плані наявність шляхових обмежень завжди має негативний вплив, оскільки підвищення ефективності перевезень прямо корелює зі збільшенням розмірів та вантажопідйомності суден.

У світовому судноплавстві існують окремі класи СОРП, кожен з яких створювався для свого експлуатаційного району, виходячи з реалізації максимальної ефективності в його шляхових обмеженнях. Наприклад, існують судна для експлуатації у річках Дунай, Рейн, Сена та деяких окремих каналах [1]. Подібні судна будувалися і в СРСР, причому, внаслідок значної уніфікації шлюзів та іншої водної інфраструктури, максимальні габарити СОРП для основних водних шляхів його європейської частини мали приблизно однакові обмеження $141 \times 17 \times 3,6$ м ($L \times B \times d$, де L – довжина; B – ширина; d – осадка). В теперішній час відповідний клас складається з суден радянської побудови, модернізованих суден та, починаючи з 2000-х років, з суден нових поколінь. Останні створювалися за значної участі українських проектувальників [2]. Розроблені для них технічні рішення у багатьох відношеннях виявилися нестандартними на фоні попереднього досвіду. В даній роботі автори спробували виконати їхній аналіз та ревізію при застосуванні до СОРП для гирлових ділянок європейських річок, підвищення експлуатаційної ефективності яких є важливим науковим та практичним завданням.

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

Великий внесок у розробку вітчизняної концепції СОРП нового покоління зробив проф. Г.В. Єгоров (1966-2021) та спеціалісти створеного ним Морського інженерного бюро (МІБ) [3-5]. Г.В. Єгоров, зокрема, обґрунтував доцільність піднесених комінгсів вантажних трюмів на суховантажних суднах або тронків на танкерах; високого або надвисокого коефіцієнту загальної повноти корпусу; підвищеної потужності головних двигунів та використання гвинто-кормових колонок (ГКК) у якості єдиного засобу забезпечення руху та управління. Розробка деяких з цих рішень здійснювалася у взаємозв'язку з науковими дослідженнями, зокрема представленими у [6,7].

Стислий огляд вказаних технічних рішень, а також аналіз тих з них, що відносяться до ходовості, був виконаний у статті [2]. Аналіз, серед іншого, показав, що застосування надвеликого коефіцієнту повноти має певне економічне підґрунтя, в той час як ГКК у якості рушіїв поступалися в ефективності традиційним установкам в аналогічних умовах. Але з роботи [2] можна також зробити важливий висновок про недостатність обґрунтування цих та деяких інших рішень. Зокрема, залишилися без вичерпних відповідей питання: корисності піднесених комінгсів в умовах СОРП інших класів; впливу на ефективність ГКК як рушіїв оптимальності їхньої інтеграції в кормові обводи; ефективності застосованих пропульсивних комплексів в умовах мілководдя.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Ціллю даної статті є формулювання та початкове обґрунтування концепції суховантажного СОРП для гирлових ділянок європейських річок на основі технічних рішень, розроблених при проектуванні вітчизняних проєктів СОРП нового покоління. Обґрунтування передбачає аналіз та ревізію вказаних рішень у відповідності до розглянутих умов їхнього застосування.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

1. Обґрунтування головних розмірів та основних вимог до конструкції судна

1.1. Шляхові обмеження у районах експлуатації та головні розміри судна

Внаслідок значної уніфікації шлюзів та іншої водної інфраструктури, максимальні габарити СОРП для основних водних шляхів європейської частини ЄСРП мали приблизно однакові обмеження $141 \times 17 \times 3,6$ м ($L \times B \times d$, де L – довжина; B – ширина; d – осадка). Такі шляхові обмеження відповідають доволі крупним суднам, подібним до невеликих морських вантажних суден, за винятком осадки, яка на морських суднах зазвичай є більшою. Шляхові обмеження у окремо взятих європейських річках на основній частині їхніх судноплавних ділянок відрізняються від зазначених в гіршу сторону (для порівняння, у річці Дніпро судна з такими розмірами можуть проходити від гирла до району м. Київ). Проте, саме на гирлових ділянках багатьох європейських річок можуть експлуатуватися судна з осадкою 3 м та більше – рис. 1.

Наприклад, гирлові ділянки та низов'я річок Рейн (гирло – Бад Залциг) та Дунай (гирло – Белград) відносяться до водних шляхів, відповідно, класів VI та VII за класифікацією СЕМТ (The European Conference of Ministers of Transport) [8]. Такі класи не надто суворо обмежують максимальну довжину та ширину суден. Наприклад, для класу VIb рекомендована

максимальна довжина самохідних суден становить 140 м; ширина 15 м. Більш суворим у порівнянні з внутрішніми водними шляхами України є обмеження на надводний габарит (фікспункт), що становить лише 9,1 м. На більшій частині зазначених ділянок мінімально-гарантована осадка складає 2,5 м, хоча існуюча інфраструктура здатна забезпечувати і більшу глибину води. Справа в тому, що на річці Рейн, а ще більшою мірою на річці Дунай, спостерігаються суттєві коливання глибини протягом року, при наявності як повеней, так і обмілень. Ця особливість останнім часом має тенденцію до посилення.

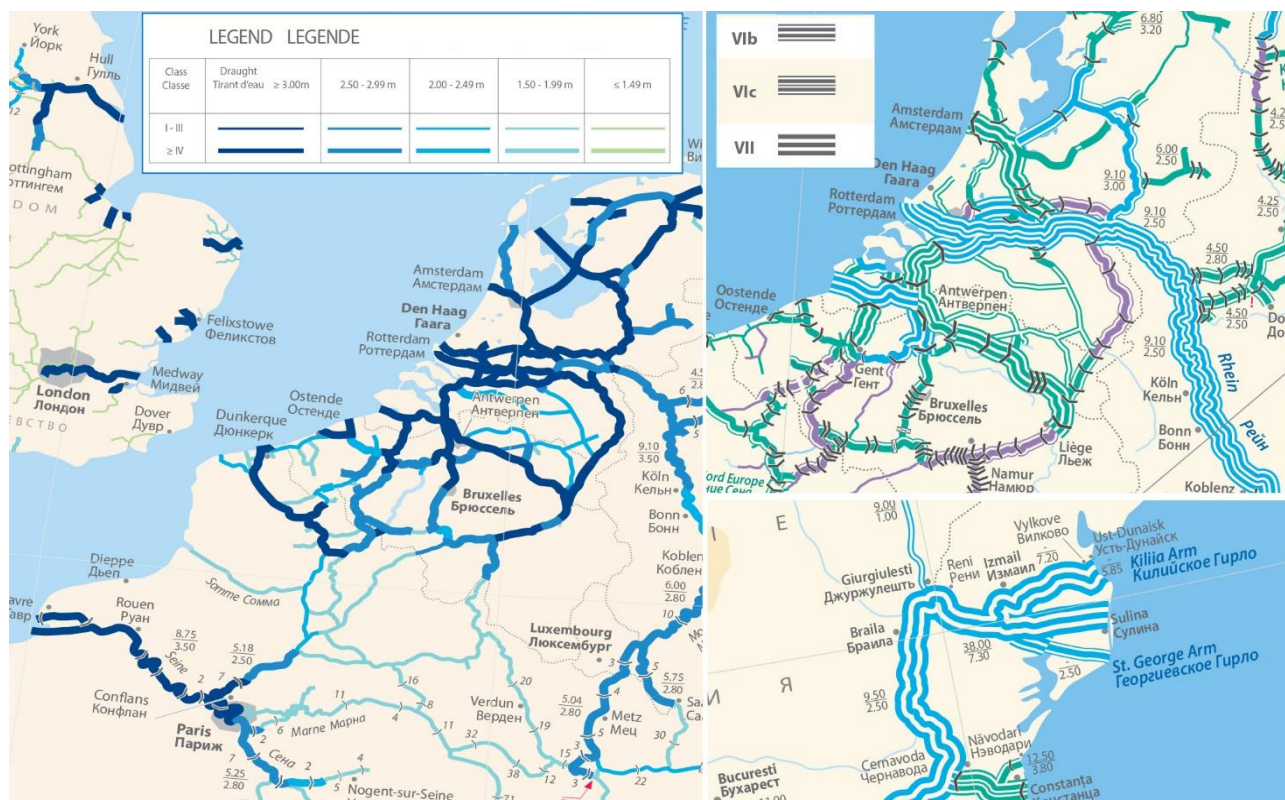


Рис. 1. Гирлові ділянки деяких європейських річок (за мапами United Nations Economic Commission for Europe [9]).

Таким чином, принаймні на гирлових ділянках великих європейських річок можуть експлуатуватися судна з головними розмірами, близькими до вказаних вище (141×17×3,6 м), причому найбільш невизначеною є ситуація з осадкою. Якщо орієнтуватися на існуючі типи суден [8], то у річці Рейн експлуатуються судна з головними розмірами до 135×17,5×3,6 м (ділянка гирло – Кельн). Робота подібних СОРП з заходом на гирлові ділянки різних річок може бути корисною в рамках фідерних контейнерних перевезень або перевезень обмежених партій інших вантажів за принципом «від дверей до дверей». Для класу СОРП, який пропонується у роботі, у першому наближенні можуть бути прийняті головні розміри 135×17×3,6 м, тобто такі, що відрізняються від вітчизняного типу СОРП тільки зменшенням довжини на 6 метрів. При цьому у зв'язку з особливостями шляхових обмежень виникає і ряд додаткових умов, які розглядаються нижче.

1.2. Аналіз спеціальних вимог до конструкції судна

Внаслідок значних коливань глибин у європейських річках судна для роботи у них завжди проектується з урахуванням можливості експлуатації з малим запасом води під кілем. Це дозволяє в умовах частих обмілень зберігати якнайбільшу вантажопідйомність, якщо і не в кожному конкретному рейсі, то в середньому за сезон.

При русі з малим запасом води під кілем виникає ряд специфічних гідродинамічних явищ. Найбільш відомим серед них є зростання хвильового опору руху при наближенні судна до критичної швидкості на мілководді [10, с. 42]:

$$V_{кр.} = \sqrt{gH}, \quad (1)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ прискорення вільного падіння; H – глибина води.

Критична швидкість $V_{кр.}$ за формулою (1) виражає вплив глибини води H на умови розповсюдження корабельних хвиль (хвиль, що утворюються судном при його русі і викликають хвильовий опір). При наближенні до $V_{кр.}$ хвильовий опір зростає, а при досягненні $V_{кр.}$ спостерігається його максимум. Корабельні хвилі при цьому зливаються в одну велику поперечну хвилю (солітон), яка становить небезпеку для інших суден та прибережної інфраструктури. При перевищенні $V_{кр.}$ хвильовий опір знижується. Даний комплекс гідродинамічних явищ є подібним (описується схожими рівняннями) до феномену звукового бар'єру у літаків.

Якщо зіставити експлуатаційну швидкість вантажних СОРП 10-11 вузлів з глибинами, що відповідають осадці 3,6 м і запасу води під кілем 0,4-1,4 м, та відповідними критичними швидкостями (табл. 1), можна зробити висновок, що режими руху СОРП є докритичними. Оскільки хвильовий опір зростає зі зменшенням глибини поступово, потужність головних двигунів, що відповідає експлуатаційній швидкості на глибокій воді, виявляється достатньою для руху зі швидкістю близько $0,6V_{кр.}$, тобто 7-8 вузлів.

Таблиця 1. Режими руху СОРП з осадкою $d = 3,6 \text{ м}$ та малим запасом води під кілем

$H, \text{ м}$	$(H - d), \text{ м}$	H/d	$V_{кр.}, \text{ вуз.}$	$V_{кр.}, \text{ км/год}$	$0,6V_{кр.}, \text{ вуз.}$	$0,6V_{кр.}, \text{ км/год}$
4,0	0,4	1,111	11,6	22,6	7,0	13,5
4,2	0,6	1,167	11,9	23,1	7,1	13,9
4,4	0,8	1,222	12,2	23,7	7,3	14,2
4,6	1,0	1,278	12,4	24,2	7,5	14,5
4,8	1,2	1,333	12,7	24,7	7,6	14,8
5,0	1,4	1,389	13,0	25,2	7,8	15,1

Таким чином, пропульсивний комплекс СОРП для роботи з малим запасом води під кілем повинен забезпечувати більш-менш ефективну та довготривалу реалізацію повної експлуатаційної потужності при суттєво зниженій швидкості руху. При цьому потрібно також брати до уваги вплив мілководдя на обтікання корпусу та рушіїв, через який параметри роботи пропульсивного комплексу можуть значно відрізнятись від проектних.

Надводний габарит 9,1 м створює зовсім інші умови розміщення палубних вантажів, зокрема контейнерів міжнародного стандарту, у порівнянні з СОРП вітчизняних проектів, що потребує перегляду конфігурації трюмних та палубних штабелів у взаємозв'язку з висотою вантажних комінгсів, вимогами до загальної повздовжньої міцності та іншими вимогами міжнародних конвенцій.

2. Основні особливості загального розташування та конструкції корпусу

2.1. Компоновка вантажної зони

Як зазначено при обґрунтуванні головних розмірів, довжина СОРП для європейських річок може бути прийнята меншою, ніж довжина СОРП вітчизняних проектів, на 6 метрів. Це дуже близько до довжини контейнера стандарту TEU (6,1 м), тому перекомпонування вантажної зони по довжині може бути зведено до прибирання одного бею. Наприклад, взявши за основу проект МІБ RSD59 [5], один бей можна прибрати з другого (подовженого) трюму – рис. 2. При цьому загальне число бей у трюмі скорочується з 11 до 10, тобто стає парним, завдяки чому кількість контейнерів стандарту FEU навіть не зменшується. Слід відмітити, що вітчизняні проекти СОРП не завжди були достатньо оптимальними з точки зору розміщення контейнерів, що пояснюється відносно низькою зацікавленістю судновласників у таких вантажах на момент проектування суден. Ця тенденція проявляється і в розміщенні палубного штабелю, який номінально складає один повний ярус, але фактично не відповідає вимогам конвенції СОЛАС-74 до забезпечення обзору з поста управління судном. Очевидно, що для виправлення такої ситуації необхідно або змінювати конструкцію містка (застосування підйомної рубки, перенесення поста управління в носову частину судна), або переглянути висоту вантажних комінгсів. Однак для впровадження мір першого напрямку на СОРП вітчизняних проектів не було достатніх стимулів, а міри другого напрямку, крім питання про оптимальний розподіл просторів для трюмного та палубного вантажу, суттєво обмежені вимогами загальної повздовжньої міцності. На СОРП, що пропонується у роботі, при прийнятті відносно високих комінгсів та кормового розташування поста управління, застосування підйомної рубки стає обов'язковим, бо обзир обмежується навіть за відсутності палубного вантажу внаслідок меншого надводного габариту.

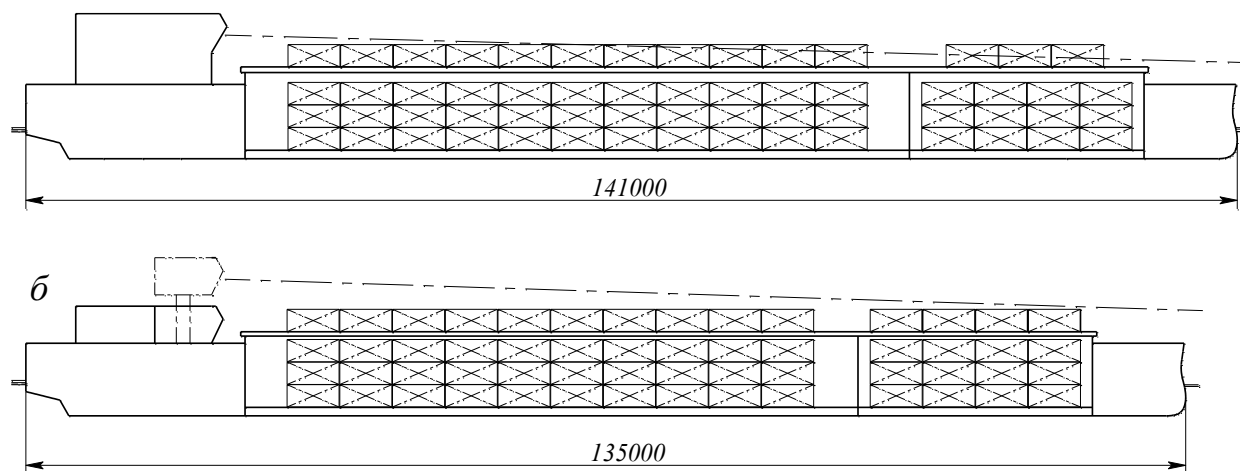


Рис. 2. Схема бокової проекції загального розташування з вантажем контейнерів TEU: а – прототип (пр. RSD59), б – СОРП, що пропонується у даній роботі

У поперечному перерізі вдається розташувати 21 стандартний контейнер (15 трюмних та 6 палубних) або 16 контейнерів модифікації high cube (10 трюмних та 6 палубних) – рис. 3. Дана схема передбачає збільшені поперечні зазори (187 мм) для можливості перевезення контейнерів модифікації pallet wide. При попередньо обраній висоті борту 6 метрів можливим є і інший варіант поперечного перерізу зі зменшеною висотою вантажних комінгсів, при якому кількість стандартних контейнерів зростає до 22 (10 трюмних та 12 палубних), оскільки на палубі контейнери можна розміщати по всій ширині судна, залишаючи лише центральний прохід по кришках. Але такий варіант погіршує умови розташування контейнерів модифікації high cube (лише 5 трюмних та 6 палубних), зменшує об'єм трюмів, корисний для перевезення

багатьох інших видів вантажів, та суттєво ускладнює забезпечення загальної поздовжньої міцності.

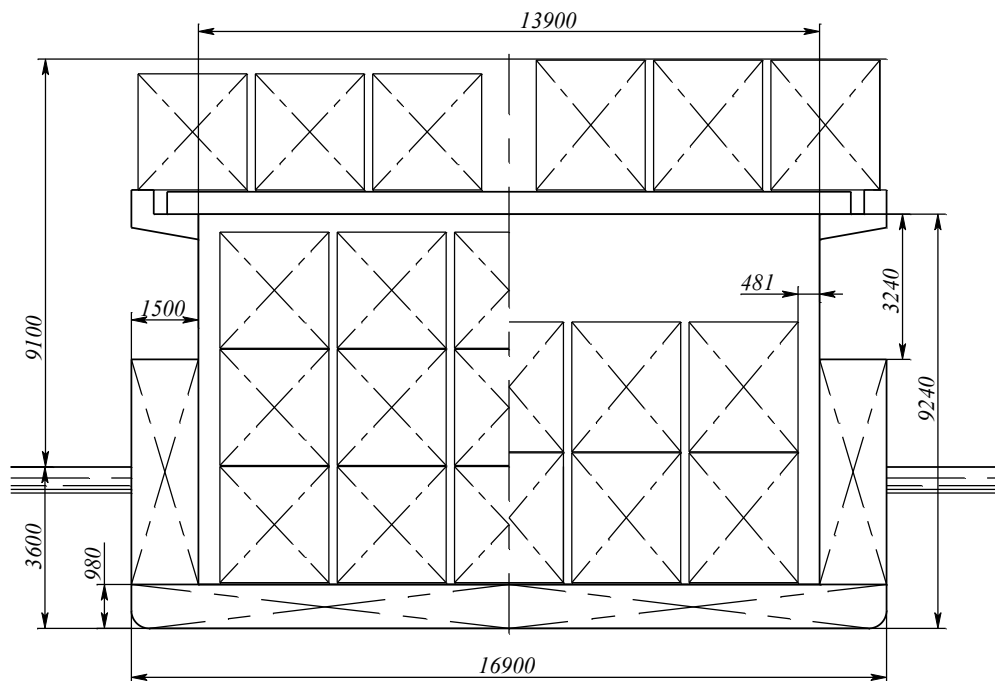


Рис. 3. Схема поперечного перерізу трюму з вантажем контейнерів

Запропонована схема поперечного перерізу трюму (рис. 3) передбачає зменшену ширину подвійних бортів 1,5 м. На вітчизняних прототипах ширина подвійних бортів, як правило, перевищує 2 м. Відмітимо, що головною функцією подвійних бортів в даному випадку є забезпечення міцності та жорсткості корпусу судна відкритого типу, а їхня ширина обирається виходячи з конструктивних міркувань та міркувань технологічності.

2.2. Проблема загальної поздовжньої міцності

Оптимальність балансу між якостями СОРП у морі та у річці не в останню чергу залежить від вирішення проблеми загальної поздовжньої міцності, оскільки вона є головним фактором, що обмежує морехідність. Внаслідок відсутності раціональних шляхів забезпечити вимоги зі сторони хвильових згинаючих моментів доводиться призначати СОРП обмежений морський район плавання. Вітчизняні судна-прототипи найчастіше отримували район плавання R2 у символі класу (з висотою хвилі 3% забезпеченості 7 м, віддалення від порту-сховища не більше 100 миль, допустима відстань між місцями сховища не більше 200 миль). Зокрема, такий район плавання має і згаданий вище проект RSD59. В деяких випадках призначалися райони плавання, еквівалентні R2-RS (нижчий) або R1 (вищий) за класифікацією Регістра судноплавства України (РСУ) [11], що супроводжувалося помітним зниженням або зростанням ваги корпусних конструкцій. В свою чергу, відповідна зміна ваги судна порожнем впливала на дедвейт, особливо при осадці у річці. Тим не менш, з оглядом на умови класу суден, що розглядається, проблема загальної поздовжньої міцності вирішувалася достатньо ефективно за рахунок, насамперед, відносно високих поздовжніх комінгсів вантажних люків.

При перенесенні наведених вище міркувань на проект СОРП для європейських річок зменшення довжини на 6 м дещо знижує величину розрахункового згинального моменту, але внаслідок більш обмеженого надводного габариту загальна висота від основної площини до полки вантажного комінгсу зменшується з 9,945 м (пр. RSD59) до 9,240 м (рис. 3), що знижує

і момент опору еквівалентного бруса. Виконані проробки конструктивного мідель-шпангоуту (рис. 4) показали, що в даних умовах достатньо раціонально можна виконати вимоги обмеженого району R2-RS (висота хвилі 3% забезпеченості 6 м). При цьому найбільш напруженим елементом перерізу є поздовжній вантажний комінгс, який виконується зі сталі підвищеної міцності марки D40 і має товщину полки 20 мм. Решта корпусних конструкцій може бути виконана зі сталі марки D32. Результати розрахунку необхідних і фактичних моментів опору міделєвого перерізу наведені у таблиці 2. Розрахунковий згинаючий момент на тихій воді було прийнято за даними суден-прототипів на рівні ± 150000 кНм.

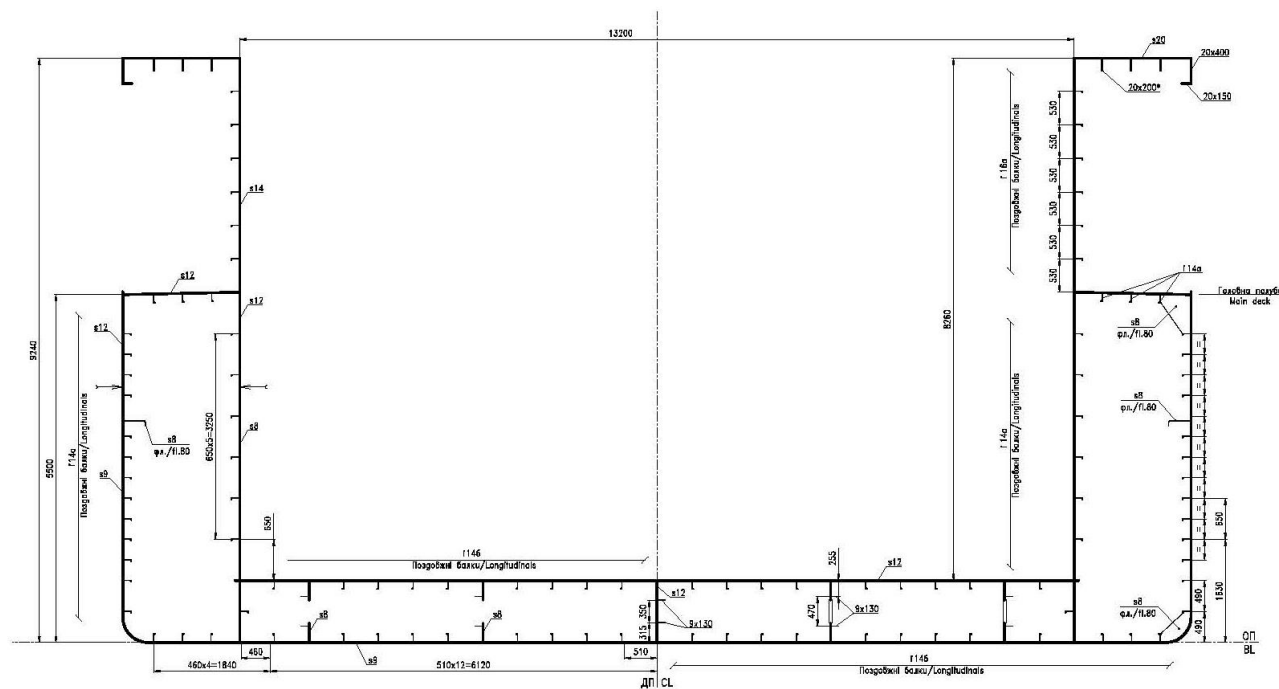


Рис. 4. Проробка конструктивного мідель-шпангоуту СОП

Наведені результати вказують на виправданість збереження відносно високих вантажних комінгсів згідно зі схемою на рис. 3. Разом з тим, деяке спрощення конструкції та зниження ваги судна порожнем може буде реалізовано за рахунок призначення району плавання R2-RS зі зниженою висотою хвилі 3% забезпеченості. Діюча нормативна база дозволяє встановлювати цю величину в діапазоні 4,5 – 6,0 м для індивідуальних проектів. Обґрунтування найбільш оптимального району плавання ще потребує додаткових досліджень.

Таблиця 2. Оцінка загальної поздовжньої міцності СОП у міделєвому перерізі

Для перекриття	Необхідний момент опору $W_H, \text{м}^3$	Фактичний момент опору $W_\Phi, \text{м}^3$
Палуба	1,77	1,84
Днище	2,03	3,25

3. Обґрунтування оптимальних елементів пропульсивного комплексу

3.1. Аналіз доцільності застосування гвинто-кермових колонок

ГКК відносяться до азимутальних рушіїв [12, с. 251], що поєднують функції рушія та стерна, дозволяючи оперативно спрямовувати упор гребного гвинту в будь-якому напрямку в горизонтальній площині. Це забезпечує судну покращену маневреність, особливо

поворотність на малих ходах та реверс. З конструктивної точки зору ГКК є більш компактними, але і більш складними у порівнянні з традиційними пропульсивними установками. Як правило, ГКК з механічною Z-подібною передачею (які розглянуті в даній роботі) встановлюють на спеціалізованих морських судах: буксирах, постачальниках, поромах. Внаслідок обмеження потужності існуючих ГКК на більш крупних судах (пасажирські судна, криголами) встановлюють подібні рушії типу Azipod з інтегрованими гребними електродвигунами. Усі перелічені типи суден мають відносно невисоку повноту обводів корпусу, причому склалася практика застосування з ГКК спрощених кормових обводів, близьких до санного типу, що обумовлює специфічну, відносно слабку гідродинамічну взаємодію між рушіями і корпусом. Цей факт, а також більш жорсткі обмеження гребних гвинтів ГКК по діаметру входять у протиріччя з сучасними підходами до оптимізації пропульсивних якостей вантажних суден, особливо з високою повнотою обводів корпусу (танкери, балкери), які в значній мірі засновані на підвищенні коефіцієнту впливу корпусу та застосуванні гвинтів збільшеного діаметру.

На СОРП для застосування ГКК є додатковий стимул, оскільки на внутрішніх водних шляхах підвищена маневреність є корисною. Проте СОРП є насамперед вантажним судном, а режим його руху та повнота обводів близькі до суден для перевезення масових вантажів. Тому застосування ГКК можна схвалити лише в тому випадку, якщо їхня пропульсивна ефективність буде хоча б співставною з ефективністю традиційних установок. Як зазначено у статті [2], СОРП існуючих проектів з ГКК суттєво поступалися суднам з традиційними установками за розрахунковою величиною пропульсивного коефіцієнту. Застосування ГКК на перспективних СОРП потребує додаткових досліджень їхньої ефективності та нових технічних рішень, деякі з яких пропонуються у даній роботі.

3.2. Метод оцінки гідродинамічних характеристик гвинто-кормових колонок як рушіїв

Проектні оцінки гідродинамічних характеристик ГКК як рушіїв ускладнюються тим, що гребний гвинт працює у безпосередній близькості до обтічника колонки. Як наслідок, переважна частина взаємодії в системі «корпус-рушій» відбувається між гвинтом та обтічником. Хоча оцінити гідродинамічні характеристики самого гвинту у вільній воді (криві дії) можна за допомогою даних серійних випробувань, як це зазвичай робиться для традиційних пропульсивних установок, виникає питання врахування вказаної взаємодії, для чого не підходять відомі проектні формули. На завершальних етапах проекту можуть залучатися самохідні модельні випробування або чисельне (чи CFD, від англ. computational fluid dynamics) моделювання, у яких, як правило, окремо визначають криві дії ГКК як єдиного рушійного комплексу та коефіцієнти взаємодії між ним та корпусом судна. Такий підхід дозволяє взяти до уваги усі індивідуальні особливості проекту, але не відповідає умовам передескізних та ескізних розробок за термінами та вартістю. Тому деякі виробники ГКК при підготовці своїх комерційних пропозицій використовують наближені постійні коефіцієнти взаємодії до серійних гребних гвинтів, що сумарно враховують умови роботи гвинту і за обтічником ГКК і за корпусом судна. Але такий підхід вже не враховує індивідуальних особливостей проекту, зокрема, впливу обводів корпусу на взаємодію в системі «корпус-рушій». Для представлених у роботі розробок було запропоновано дещо інший метод.

Метод передбачає, що буксирувальні характеристики судна, включаючи опір руху та коефіцієнт попутного потоку у диску гребного гвинту, є відомими. Ці дані можуть бути отримані за допомогою буксирувальних модельних випробувань, або CFD моделюванням (як у даній роботі). Обтічники ГКК включаються до виступаючих частин корпусу, їхній опір входить до опору руху судна. Для подальших розрахунків ходовості необхідно оцінити коефіцієнт засмоктування, що враховує взаємодію гребного гвинту як з обтічником ГКК, так і з корпусом.

Для цього пропонується використовувати опубліковані (або інші доступні) результати модельних випробувань ГКК, які включають криві дії єдиного комплексу та криві дії ізольованої моделі гребного гвинту у вільній воді. При виборі даних слід орієнтуватися на приблизну відповідність розмірів та форми обтічника відносно гребного гвинту. У випробуваннях ГКК з гвинтами у направляючих насадках упор насадок, як правило, включають до сили на обтічнику. В таких випадках розподіл сил у кривих дії ГКК не дозволяє їхнє використання за даним методом. Для використання підходять дані по ГКК з відкритим гвинтом, навіть у тих випадках, коли оцінка виконується для ГКК з гвинтом у насадці.

Наприклад, на рис. 5 представлені криві дії ГКК і встановленої на неї моделі гребного гвинту у вільній воді, що використовувалися раніше у роботі [13].

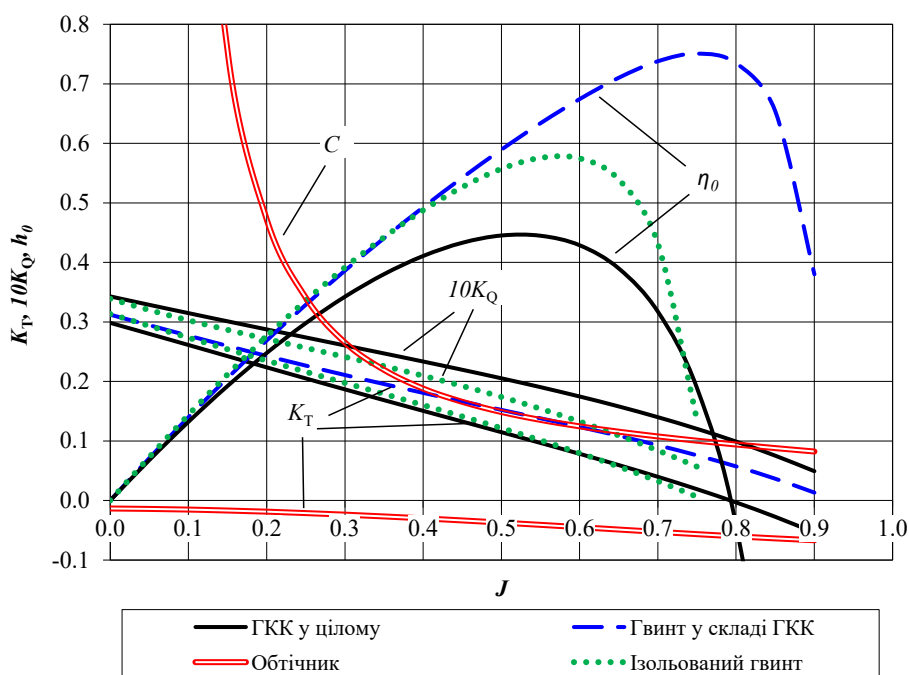


Рис. 5. Гідродинамічні характеристики ГКК та його елементів

По даних, представлених на рис. 5, можна розрахувати коефіцієнти взаємодії W_T , t та i (за звичайною системою [12, с. 144]), якщо виключити з сили на обтічнику компоненту його опору руху, залишивши тільки силу засмоктування внаслідок роботи гвинту. Для полегшення цієї задачі сила на обтічнику може бути виражена коефіцієнтом опору C , пропорційному квадрату аксіальної швидкості. При відсутності ефектів роботи гвинту $C \approx \text{const}$. Можна очікувати, що при високих відносних ходах J , коли упор гвинту знижується до нуля і нижче, ефекти його роботи також зникають з сили на обтічнику. Перетворення стандартного для кривих дії коефіцієнту упору обтічника K_T на коефіцієнт опору C можна виконати наступним чином:

$$C = \frac{K_T}{J^2} = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \cdot \frac{n^2 D^2}{V_A^2} = \frac{T}{\rho D^2 V_A^2}, \quad (2)$$

де T – сила (упор); ρ – густина води; n – число оборотів; D – діаметр гвинту; V_A – аксіальна швидкість гвинту.

Коефіцієнт C за формулою (2) залишається безрозмірним. Як можна бачити з рис. 5, при високих значеннях відносної ходи J він асимптотично наближається до деякого постійного значення, що, на наш погляд, виражає зникання сили засмоктування з сили на обтічнику. Таке

значення (його можна оцінити графічно або на основі апроксимації) можна виключити з загальної величини коефіцієнту, а залишок розглядати як чисте засмоктування та віднести до відповідного коефіцієнту t . Остаточні розраховані коефіцієнти W_T , t та i зручно представляти як функції зворотного коефіцієнту навантаження гвинту по корисній тязі (рис. 6):

$$K_{DE} = \frac{V_s D}{\sqrt{T_E / \rho}}, \quad (3)$$

де V_s – швидкість судна; T_E – корисна тяга рушія за вирахуванням засмоктування, що дорівнює опору судна при самохідному русі.

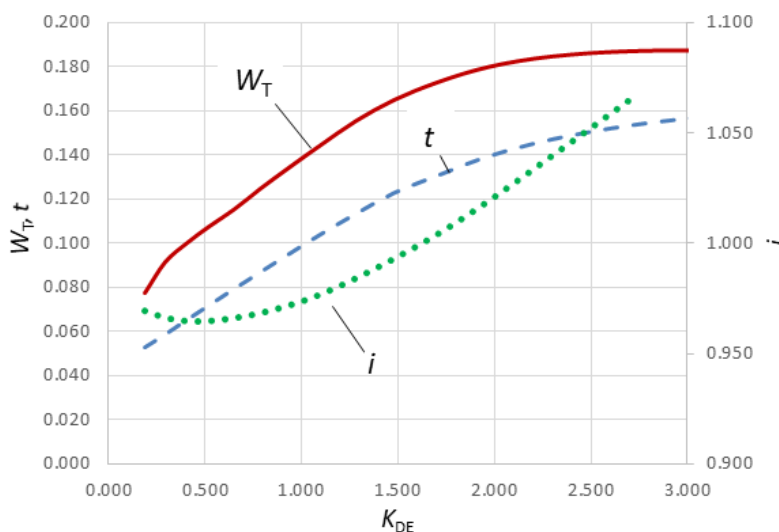


Рис. 6. Коефіцієнти взаємодії між елементами ГКК у системі «корпус-рушій»

На рис. 6 значення $K_{DE} = 0$ відповідає режиму «на швартовах», а більш високі значення різним ходовим режимам. Значення коефіцієнту нерівномірності попутного потоку в практичних розрахунках можна приймати $i = 1$. Коефіцієнти W_T , t на рис. 6 виражають взаємодію тільки між елементами ГКК (за відсутності корпусу судна). Тому замість коефіцієнту W_T у подальших розрахунках ходовості використовувалися коефіцієнти номінального попутного потоку W , визначені з результатів CFD моделювання руху корпусу з виступаючими частинами. До коефіцієнту t додавалася постійна надбавка 0,05 для врахування засмоктування на корпусі. В подальшому, використовуючи наведений метод, можливо зіставити коефіцієнти попутного потоку та засмоктування, що обумовлені саме корпусом судна з ГКК, та спробувати апроксимувати відповідні залежності проектними формулами.

3.3. Форма корпусу та варіанти кормових обводів

В статті [2] представлені «надповні» обводи корпусу, розроблені свого часу для СОПІ проекту RST27. Ті ж самі обводи (з незначними змінами ширини) були застосовані у проекті RSD59 та деяких інших. Вони є базовими і для СОПІ, розглянутого у даній роботі, – рис. 7. Кормові обводи, вочевидь, погано пристосовані до умов значного мілководдя. Вода потрапляє до рушіїв тільки з-під днища (так звана «бато́ксна» схема обтікання), тому в умовах мілководдя притока води обмежується зазором між днищем судна та дном водойми. Справа в тому, що СОПІ для вітчизняних водних шляхів не розраховувалися на умови постійного значного мілководдя, а скоріше на епізодичне проходження шлюзів та окремих мілководних ділянок. Виходячи з досвіду суден внутрішнього плавання, для забезпечення нормальної роботи пропульсивного комплексу на мілководді корисно передбачати надходження води до

рушійів не тільки з-під днища, а й з бортів. Як правило, а таких випадках поліпшуються і показники взаємодії у системі «корпус-рушій». На основі цих міркувань для перспективного СОРП було підготовлено два нових варіанти кормових обводів, що представлені на рис. 8. Обидва варіанти передбачають більш рознесені по ширині ГКК. Варіант 1 представляє собою корму катамаранного типу, адаптовану для встановлення ГКК. На відміну від класичної катамаранної корми, бортові обтічники служать не для розміщення пропульсивної установки, а для спрямовування потоку від бортів до ГКК, а також виконують функції скегів-стабілізаторів. Варіант 2 виконано з бортовими напівтунелями та центральним скегом-стабілізатором.

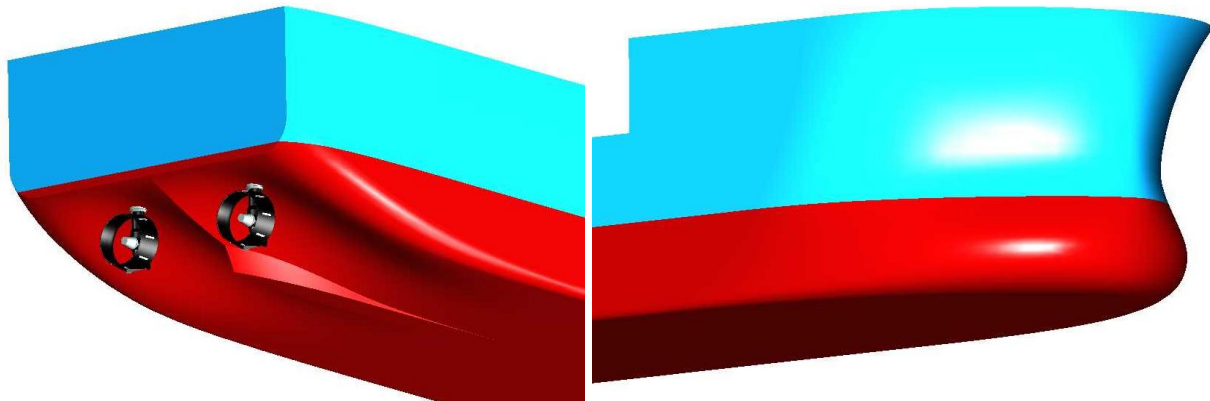


Рис. 7. Кормова та носова частини теоретичного корпусу СОРП проекту RSD59

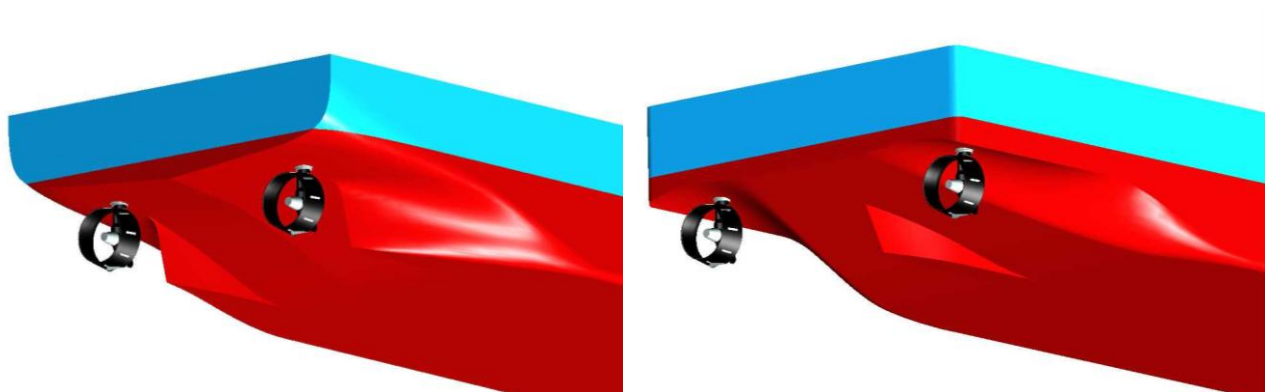


Рис. 8. Обводи кормової частини для перспективного СОРП: ліворуч варіант 1 (катамаранний тип); праворуч варіант 2 з бортовими напівтунелями

3.4. Буксирувальні характеристики на глибокій воді та в умовах мілководдя

Для отримання буксирувальних характеристик було застосовано CFD моделювання за допомогою методів, аналогічних описаним у роботі [14]. Моделювався рух корпусу з виступаючими частинами при осадці 3,6 м на швидкості 10 вузлів в умовах глибокої води (режим, близький до основного експлуатаційного) та на швидкості 7 вузлів в умовах значного мілководдя при співвідношенні глибини до осадки $H/d = 1,278$. По результатах розрахунків було отримано буксирувальну потужність судна, а також коефіцієнт попутного потоку, наведені у таблиці 3 для натурного судна. Візуалізація хвилеутворення у двох розглянутих режимах представлена на рис. 9. Візуалізація попутного потоку в диску гребного гвинту лівого борту на глибокій воді представлена на рис. 10, в умовах мілководдя – на рис. 11.

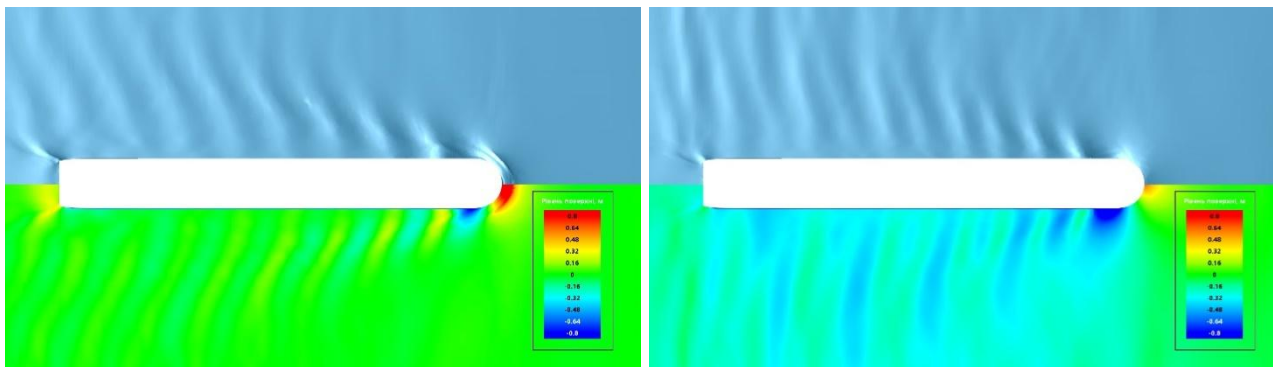


Рис. 9. Візуалізація хвилеутворення СОРП за даними CFD моделювання: ліворуч швидкість 10 вузлів, глибока вода; праворуч швидкість 7 вузлів, мілководдя $H/d = 1,278$

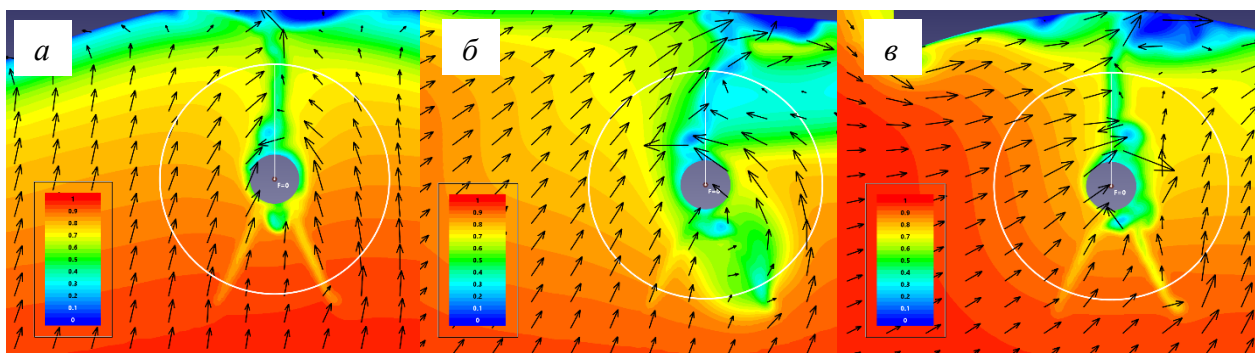


Рис. 10. Візуалізація попутного потоку за даними CFD моделювання, швидкість 10 вузлів, глибока вода: а – пр. RSD59; б – варіант 1; в – варіант 2

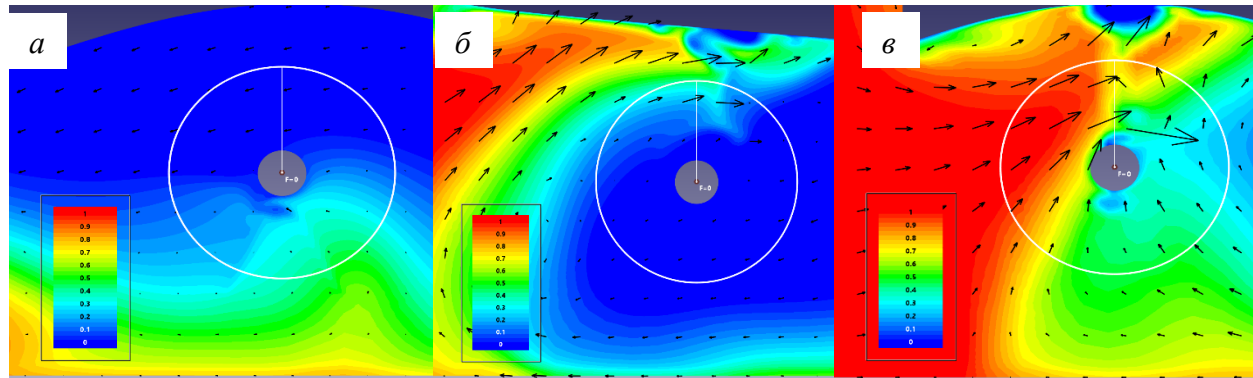


Рис. 11. Візуалізація попутного потоку за даними CFD моделювання, швидкість 7 вузлів, мілководдя $H/d = 1,278$: а – пр. RSD59; б – варіант 1; в – варіант 2

Згідно з отриманими результатами, питома буксирувальна потужність на мілководді значно зростає і при швидкості 7 вузлів є співставною з такою при швидкості 10 вузлів на глибокій воді. Рух судна на значному мілководді супроводжується характерним посиленням хвилеутворення. На глибокій воді найменший опір має корпус базового варіанту (пр. RSD59), найбільший – корпус з кормовими обводами за варіантом 2. При цьому кормові обводи за варіантом 1 забезпечують досить великий коефіцієнт попутного потоку, здатний суттєво покращити взаємодію у системі «корпус-рушій». В умовах мілководдя найменший опір має корпус за варіантом 2, найбільший – корпус за варіантом 1. Але по величинах коефіцієнту попутного потоку можна бачити, що тільки корпус за варіантом 2 здатен забезпечити ефективну роботу рушіїв на значному мілководді.

Таблиця 3. Буксирувальні характеристики СОРП

Варіант корпусу	Швидкість 10 вузлів, глибока вода		Швидкість 7 вузлів, мілководдя $H/d = 1,278$	
	Букс. потужність P_E , кВт	Коеф.-нт попутного потoku W	Букс. потужність P_E , кВт	Коеф.-нт попутного потoku W
Пр. RSD59	641,5	0,215	550,8	0,882
Варіант 1	681,9	0,384	581,5	0,983
Варіант 2	690,4	0,233	543,4	0,503

У двох інших корпусів притока води до гвинтів практично відсутня внаслідок масштабних відривів прикордонного шару та створення в районі рушіїв гідродинамічної тіні. Тим не менш, видається, що корпус за варіантом 1 є більш пристосованим до такого режиму, ніж базовий варіант, оскільки при роботі гвинту відбувається певна перебудова потоку, і за наявності притоки води поблизу вона буде підтягнута рушієм. Для перевірки цього необхідно провести моделювання самохідного руху.

3.5. Оцінка ходових якостей судна

На основі наведених вище результатів оцінки коефіцієнтів взаємодії у системі «корпус-рушій» та буксирувальних характеристик було виконано оцінку ходових якостей СОРП з розглянутими варіантами форми корпусу при швидкості ходу 10 вузлів на глибокій воді. Для оцінки гідродинамічних характеристик гребних гвинтів у вільній воді використовувалися дані модельних випробувань гребних гвинтів серії Ка 4-70 у направляючих насадках №19А [15]. Прийнята конфігурація ГКК (це відноситься і до моделі обтічника у CFD моделюванні буксирування) є близькою до моделі SRP 340 виробництва компанії Schottel з діаметром гвинту 2,1 м. Результати розрахунків ходових якостей судна представлені у таблиці 4 та на рис. 12.

Згідно з отриманими результатами, найменшу потрібну потужність головних двигунів (ГД) у розрахункових умовах має СОРП з обводами корпусу за варіантом 1, найбільшу – СОРП з обводами корпусу за варіантом 2. Зазначимо, що оцінка пропульсивного коефіцієнту для варіанту 1 виявилася досить високою та співставною з рівнем, що можуть забезпечувати традиційні пропульсивні установки [2], завдяки високому коефіцієнту впливу корпусу.

Таблиця 4. Ходові якості СОРП при швидкості 10 вузлів на глибокій воді

Варіант корпусу	ККД гвинту η_0	Коеф.-нт впливу корпусу η_H	Пропульсивн ий коеф.-нт η_P	Потужність ГД N_E , кВт
Пр. RSD59	0,5797	1,0614	0,5846	2×548,7
Варіант 1	0,5241	1,3555	0,6750	2×505,2
Варіант 2	0,5694	1,0892	0,5892	2×585,9

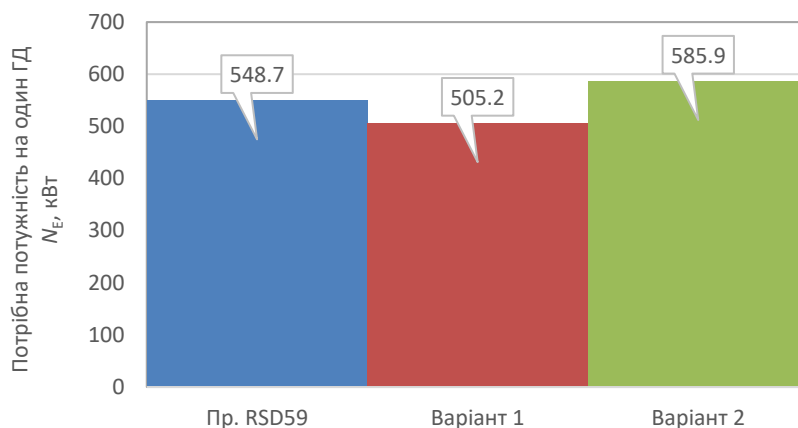


Рис. 12. Потужність на один ГД при швидкості 10 вузлів (глибока вода)

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Представлені дослідження показали, що досвід розробки проектів суден обмеженого району плавання з можливістю заходу у вітчизняні внутрішні водні шляхи цілком може бути застосований для створення проекту судна для гирлових ділянок європейських річок. Перспективне судно зберігає такі особливості вітчизняних проектів нового покоління, як: надповні обводи корпусу; підвищені комінгси трюмів; гвинто-кормові колонки у якості єдиних засобів забезпечення ходовості та управління.

Разом з цим, вказані особливості потребують тих чи інших адаптацій. Кормові обводи корпусу необхідно доопрацьовувати для забезпечення ефективної роботи пропульсивного комплексу на значному мілководді, а також для покращення пропульсивних якостей на глибокій воді. Вантажна зона в цілому та висота комінгсів потребують перегляду в умовах меншої довжини судна та меншого надводного габариту з урахуванням застосування підйомної рубки або перенесення поста управління судном в носову частину; міркувань забезпечення загальної поздовжньої міцності. В даній роботі запропоновані деякі підходи до вирішення вказаних задач, що вказують на можливість позитивних результатів.

Подальші роботи по даному напрямку можуть включати: більш детальне опрацювання проекту включно з оцінкою маси порожнем та аналізом її взаємозв'язку зі змінами головних розмірів та запропонованих рішень по компоновці. Для перевірки та уточнення отриманих результатів по ходовим якостям бажано провести чисельне або експериментальне моделювання самохідного руху судна з розглянутими варіантами обводів корпусу. Також великий інтерес представляють морехідність і маневрені характеристики судна та їхнє порівняння з вимогами, що обумовлені районом експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Truijens P., Vantorre M. and Vanderwerff T., "On the design of ships for estuary service", In *RINA Transactions, Part A2 Int J Marit Eng (ILME)*, No. 148, pp. 1-15, 2006.
- [2] Hordiienko O.L., Pechenyuk A.V., "Development of propulsion solutions for river-sea ships of the northern Black Sea", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, No. 238 (2), doi: 10.1177/14750902231203443, pp. 325-335, 2024.
- [3] Єгоров Г.В., Єгоров О.Г., «Основні принципи проектування суден змішаного ріка-море плавання», *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, № 2 (2), с. 37-52, 2014.

- [4] Єгоров Г.В., Баскаков С.М., Єгоров О.Г., Бойко І.М., Нильва В.О., «Передумови створення і концепти нового покоління суховантажних суден змішаного ріка-море плавання для України», *Вісник ОНМУ*, № 35 (2), с. 12-44, 2012.
- [5] Egorov G.V., Tonyuk V.I., Egorov A.G., Davydov I.F., “Justification of main characteristics of river-sea dry-cargo vessels with extra-full hull forms”, In Proc. of 18th Int. Congress of IMAM (IMAM-2019): Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies, doi: 10.1201/9780367810085, pp. 332–337, 2019.
- [6] Давидов І.П., Демидюк О.В., Печенюк А.В., «Експериментальне дослідження вдосконалених обводів тихохідного судна великої повноти», *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, № 2 (4), с. 144-150, 2015.
- [7] Єгоров О.Г., «Оцінка ефективності експлуатації перспективного барже-буксирного складу «Дніпро-макс» класу», *Вісник ОНМУ*, № 36 (3), с. 35-54, 2012.
- [8] Federal Waterways Engineering and Research Institute, *Driving dynamics of inland vessels: Vessel behavior on European inland waterways and waterway infrastructure with special respect to German waterways*. Karlsruhe: BAW, 2016.
- [9] European waterways routable map for Garmin receivers [Online]. Available: http://waterways.cz/documents/AGN_map_2018.pdf. [Accessed April 16, 2025].
- [10] Larsson L. and Raven H.C., Paulling R., ed., *Ship resistance and flow*. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- [11] Shipping register of Ukraine, *Rules for the classification and construction of ships: Part I Classification*. Kyiv: The, Shipping register of Ukraine 2020.
- [12] Molland A.F., Turnock S.R. and Hudson D.A., *Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power*. New York, NY: Cambridge University Press, 2011.
- [13] Печенюк А.В., Стецюк Т.Г., “Отримання гідродинамічних характеристик гребних гвинтів у вільній воді за допомогою чисельного моделювання”, У мат. наук.-техн. конф. НУ ОМА “Судноводіння, морські перевезення та технології” NST-2023 ’11, 2023, с. 234–236.
- [14] Печенюк А.В., «Дослідження морехідності рибальських суден за допомогою CFD методів», *Судноводіння*, № 33, doi: 0.31653/2306-5761.33.2022.96-105, с. 96–105, 2022.
- [15] Oosterveld M.W.C., “Wake adapted ducted propellers”, Netherlands Ship Model Basin, Wageningen, the Netherlands, Issue No. 345, 1970.

REFERENCES

- [1] Truijens P., Vantorre M. and Vanderwerff T., “On the design of ships for estuary service”, In *RINA Transactions, Part A2 Int J Marit Eng (ILME)*, No. 148, pp. 1-15, 2006.
- [2] Hordiienko O.L., Pechenyuk A.V., “Development of propulsion solutions for river-sea ships of the northern Black Sea”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, No. 238 (2), doi: 10.1177/14750902231203443, pp. 325-335, 2024.
- [3] Egorov G.V., Egorov A.G., “Basic designing principles of river-sea cargo vessels construction”, *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, No. 2 (2), pp. 37-52, 2014.

- [4] Egorov G.V., Baskakov S.M., Egorov A.G., Boiko I.M., V.O. Nylva, “Peredumovy stvorennia i kontsepty novoho pokolinnia sukhovantazhnykh suden zmishanoho rika-more plavannia dlia Ukrainy”, *Herald of the ONMU*, No. 35 (2), pp. 12-44, 2012.
- [5] Egorov G.V., Tonyuk V.I., Egorov A.G., Davydov I.F., “Justification of main characteristics of river-sea dry-cargo vessels with extra-full hull forms”, In Proc. of 18th Int. Congress of IMAM (IMAM-2019): Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies, doi: 10.1201/9780367810085, pp. 332–337, 2019.
- [6] Davydov I.F., Demidyuk A.V., Pechenyuk A.V., “Experimental investigation of the improved hull lines for the slow-speed vessel with high block coefficient”, *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, No. 2 (4), pp. 144-150, 2015.
- [7] Egorov A.G., “Otsinka efektyvnosti ekspluatatsii perspektyvnoho barzhe-buksyrnoho skladu «Dnipro-maks» klasu”, *Herald of the ONMU*, No. 36 (3), pp. 35-54, 2012.
- [8] Federal Waterways Engineering and Research Institute, *Driving dynamics of inland vessels: Vessel behavior on European inland waterways and waterway infrastructure with special respect to German waterways*. Karlsruhe: BAW, 2016.
- [9] European waterways routable map for Garmin receivers [Online]. Available: http://waterways.cz/documents/AGN_map_2018.pdf. [Accessed April 16, 2025].
- [10] Larsson L., Raven H.C., Paulling R., ed., *Ship resistance and flow*. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- [11] Shipping register of Ukraine, *Rules for the classification and construction of ships: Part I Classification*. Kyiv: The, Shipping register of Ukraine 2020.
- [12] Molland A.F., Turnock S.R. and Hudson D.A., *Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power*. New York, NY: Cambridge University Press, 2011.
- [13] Pechenyuk A.V. and Stetsiuk T.G., “Otrymannia hidrodynamichnykh kharakterystyk hrebnykh hvyntiv u vilnii vodi za dopomohoiu chyselnoho modeliuvannia”, In Proc. of scient. and tech/ conf. of NU “OMA” “Navigation, shipping and technology” NST-2023 '11, 2023, pp. 234–236.
- [14] Pechenyuk A., “Study of seakeeping performance of fishing vessels with the help of CFD methods”, *Shipping & Navigation*, No. 33, doi: 0.31653/2306-5761.33.2022.96-105, pp. 96–105, 2022.
- [15] Oosterveld M.W.C, “Wake adapted ducted propellers”, Netherlands Ship Model Basin, Wageningen, the Netherlands, Issue No. 345, 1970.