

УДК 629.5

DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-7-20

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ НОСОВОЇ ЧАСТИНИ СУДНА НА ЙОГО ОПІР В УМОВАХ ТИХОЇ ВОДИ ТА ХВИЛЮВАННЯ

І.П. Давидов

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

ORCID: 0000-0001-7745-4228

email: davydov.igor.f@gmail.com

А.В. Печенюк

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

ORCID: 0000-0001-9745-2633

email: anpech@gmail.com

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

Анотація. *Проектування та оптимізація форми корпусу судна з ціллю мінімізації опору та забезпечення інших проектних вимог є добре відомою проблемою теорії та проектування корабля. Сьогодні до її дослідження можуть бути застосовані методи чисельної гідродинаміки рідини (computational fluid dynamics – CFD), що динамічно розвиваються. Запропонований метод проектування та оптимізації форми корпусу використовує CFD аналіз для оцінки реакцій опору на систематичні перетворення поверхні корпусу. Перетворення спочатку задаються на стройовій по шпангоутах, потім застосовуються до відповідних ділянок суднової поверхні з використанням спеціальних методів їх перебудови. Кожна окрема трансформація відповідає новому варіанту форми корпусу з перетвореною ділянкою поверхні. Усі варіанти, що підготовлені на основі початкової форми корпусу, відносяться до першого кроку оптимізаційного процесу. Вони використовуються у CFD розрахунках для оцінки змін опору у спокійній воді. Результати можуть бути представлені у вигляді неперервних апроксимуючих функцій приросту об'єму чи площини перерізу для кожної окремої ділянки поверхні корпусу та використані у процедурах оптимізації. В результаті, може бути отримана оптимальна форма стройової по шпангоутах, що виражає оптимальний поздовжній розподіл постійного об'єму корпусу та відповідає оптимізованій формі поверхні корпусу. Даний метод був застосований до носових частин двох суден, включаючи добре відому форму корпусу KCS та показав цікаві результати. У статті наведені деякі подальші доопрацювання методу, розроблені на основі аналізу його надійності та практичних особливостей. Показано, що точність розрахунків, хоч вона і залежить від обраної чисельної моделі та постановки, можна суттєво покращити за допомогою дослідження збіжності по сітці. Отримані результати оптимізації в умовах спокійної води були додатково оцінені відносно опору на хвилюванні. Виявилося, що зміни, внесені у форму корпусу KCS, не мають відчутного впливу на опір на зустрічному регулярному та нерегулярному хвилюванні.*

Ключові слова: *проектування форми корпусу, CFD для проектування суден, оптимізація форми корпусу, опір судна на хвилюванні.*

UDC 629.5

DOI 10.47049/2226-1893-2023-2-53-7-20

**STUDY OF FOREBODY SHAPE EFFECT ON SHIP RESISTANCE
IN STILL WATER AND IN WAVES**

Igor Davydov

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

ORCID: 0000-0001-7745-4228

email: davydov.igor.f@gmail.com

Andriy Pechenyuk

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

ORCID: 0000-0001-9745-2633

email: anpech@gmail.com

National university «Odessa maritime academy», Ukraine

Abstract. *Design and optimization of ship hull form for minimizing resistance and satisfying other project requirements is a well-known problem of naval architecture. A suggested method of hull form design and optimization uses CFD analysis for evaluation of resistance responses to systematic transformations of hull surface. The transformations at first are set on curves of sectional areas and then are applied to corresponding regions of hull surfaces according to special techniques of rebuilding. Each separate transformation corresponds to a new version of hull form with transformed region of surface. These versions are used in CFD simulations for evaluation of resistance changes in still water, which are at the heart of optimization procedures. As a result, an optimal form of sectional area curve expressing an optimal longitudinal distribution of constant hull volume and, eventually, an optimized shape of hull surface can be obtained. The method was applied to forebodies of two ships including the well-known KCS hull form and showed promising results. This paper describes some further improvements of the method performed after analysis of its reliability and practical features. It is shown that accuracy can be noticeably improved based on analysis of grid convergence. Significantly higher detailing and flexibility of transformations can be achieved through setting overlapping regions on initial hull form. In addition, the optimization results obtained in still water were assessed with respect to resistance in waves. It turned out that the applied changes of the KCS hull form have no perceptible effect on resistance in head regular and irregular waves.*

Keywords: *hull form design, CFD for ship design, hull form optimization, ship resistance in waves.*

Вступ. Оптимізація форми корпусу – добре відома проблема проектування суден, яка є заїждженою та актуальною одночасно. На практиці, проектування обводів до сих пір містить елемент мистецтва. Не існує загальноприйнятого формалізованого методу, який би дозволяв проектувати форму корпусу з гарантовано мінімальним опором, не кажучи вже про найліпші морехідні якості в цілому. Хоча у цій області було виконано велику кількість експериментальних та теоретичних

робіт, та у деяких окремих випадках були спроектовані дуже ефективні корпуси, їхня оптимальність у строгому сенсі залишається дискусійною.

Розв'язання проблеми проектування корпусу з мінімальним буксирвальним опором, або хоча б крок у цьому напрямку у вигляді доведення довільних існуючих початкових корпусів до оптимального рівня, представляє практичний інтерес, оскільки дозволяє значно покращити проєктні характеристики суден, зокрема питоми витрати палива на одиницю перевезеного вантажу.

Розвинення науково-обґрунтованого способу проектування форми корпусу згодом оформилося у окремий напрям досліджень. Вірогідно, перші спроби вибудувати оптимізаційний процес для форми корпусу були зроблені на основі формули J. Mitchell для хвильового опору [1; 2]. Статистичний аналіз експериментальних результатів [3] та розвинення комп'ютерних методів на основі чисельної гідродинаміки CFD, [4] є прикладами сучасних підходів по проблеми. Представлений метод оптимальної трансформації носової частини (МОТНЧ) можна розглядати як комбінацію декількох підходів, що доповнюють один одного. Застосування МОТНЧ дозволило отримати досить цікаві результати [5], але метод все ще вдосконалюється. Останні удосконалення та отримані за їх допомогою результати наведені у даній статті.

Мета статті – викладення результатів аналізу надійності та особливостей практичного застосування нещодавно запропонованого методу оптимальної трансформації носової частини (або МОТНЧ); результатів доопрацювання методу та його застосування до носової частини судна KCS; оцінки результатів оптимізації по критерію опору на спокійній воді відносно опору на зустрічному морському хвилюванні.

Основний матеріал. Концепція МОТНЧ передбачає розумний компроміс між математично строгим оптимізаційним процесом та практично доступними методами варіювання геометрії корпусу і оцінки опору. Головні розміри судна, включаючи об'ємну водотоннажність, розглядаються як незмінні, так само як боковий контур корпусу. Це відповідає наміру ізолювати вплив форми поверхні від більш інтенсивного впливу головних розмірів та їх співвідношень.

Добре відомий питоми опір R/V залишається головним критерієм ефективності обводів корпусу, але він застосовується до окремих частин суднової поверхні. Якщо ми розглянемо деяку окрему ділянку суднової поверхні та змінимо її, викликавши деякий приріст об'єму корпусу δV , а решта поверхні залишиться незмінною, приріст об'єму δV можна співвідносити відповідному приросту опору δR . Якщо розглядається більш ніж одна зміна кожної задіяної ділянки поверхні, прирости опору можуть бути вираженими як неперервні функції від приросту об'єму. Такі функції можна вибудувати для декількох обраних ділянок суднової поверхні і використати для пошуку оптимальної комбінації аргументів, що відповідає двом умовам

$$\begin{cases} \sum \delta R = \min; \\ \sum \delta V = 0. \end{cases} \quad (1, 2)$$

Це, відповідно, умова мінімуму опору (1) та умова збереження постійної водотоннажності (2). На практиці рішення відбувається за допомогою гіпотези про незалежність впливу різних ділянок на опір. Таким чином, процес оптимізації веде до зниження питомого опору або підтвердження оптимальності початкової форми корпусу.

Близькі підходи були запропоновані раніше [1; 2], але вони оперували точками за допомогою рівняння суднової поверхні замість реальних ділянок поверхні та використовували аналітичні формули для опору. Ці особливості виявилися непрактичними з сучасної точки зору. Замість них МОТНЧ використовує спеціально розроблену модель систематичних трансформацій поверхні, яка впорядковує варіації геометрії корпусу, та CFD-моделювання для оцінки відповідних змін опору.

Методи CFD на основі рішення рівнянь Нав'є-Стокса, у формі, що була запропонована Рейнольдсом, сьогодні є одними з найбільш провідних серед тих, що застосовуються у задачах гідродинаміки судна. Оскільки концепція МОТНЧ передбачає високі вимоги до точності оцінки змін опору, спричинених відносно малими варіаціями форми корпусу, ці методи виглядають найбільш придатними. Їхні технічні особливості, а також результати верифікації та валідації продемонстрували досить високу точність у задачі оцінки опору корпусу. Відповідні дані, включаючи опис математичної моделі та особливості чисельної постановки, наведені у статті [9].

Досить рідкісною, проте зручною особливістю чисельної постановки є метод генерації сітки, який базується на прямокутній адаптивній локально-подрібненій сітці (АЛПС). Сутність генерації АЛПС полягає у булевому відніманні об'єму, що зайнятий замкнутою поверхнею, з прямокутної початкової сітки. Клітинки розрахункової сітки, коли перетинаються поверхнею довільної форми, перестроюються у складні багатогранники з послідуною апроксимацією рівнянь математичної моделі в них високорівневими схемами.

Основною практичною перевагою АЛПС є її автоматична генерація. Користувачу потрібно лише сформувати початкову прямокутну сітку, тоді як конвертація початкових клітинок, що перетинаються з поверхнею, де задана гранична умова (наприклад, поверхня корпусу судна), відбувається повністю автоматично. Це дозволяє підготовлювати та змінювати розрахункові сітки дуже швидко. Найпростішим способом додатково або локально подрібнити сітку є процедура адаптації. При цьому обрані клітинки поділяються на менші (існуюча тривимірна клітинка поділяється на вісім рівних частин). Вибір клітинок здійснюється за ознакою торкання виділеної граничної умови або знаходження у виділеному об'ємі.

Коли основні розміри та об'ємна водотоннажність зафіксовані, повздовжній та вертикальний розподіл об'єму корпусу майже визначають форму суднової поверхні. Якщо ми розглянемо змінення існуючого корпусу з метою зниження його опору, у оптимізаційному процесі можна нехтувати вертикальним розподілом об'єму. Причиною цього є відсутність оптимуму вертикального розподілу об'єму по відношенню до хвильового опору: чим глибше об'єм занурений, тим менший хвильовий опір він генерує. Таким чином, немає спеціальних підстав для зміни форми окремих шпангоутних перерізів, але все ж вони будуть змінюватися при

любих змінах форми стройової по шпангоутах. Тому такі зміни потрібно підкорити деякому чіткому механізму, який би дозволяв зберігати, або принаймні обмежувати чи контролювати змінення вертикального розподілу об'єму корпусу.

Приклад типу модифікацій стройової по шпангоутах, що пропонується, представлений на рис. 1 для носового загострення.

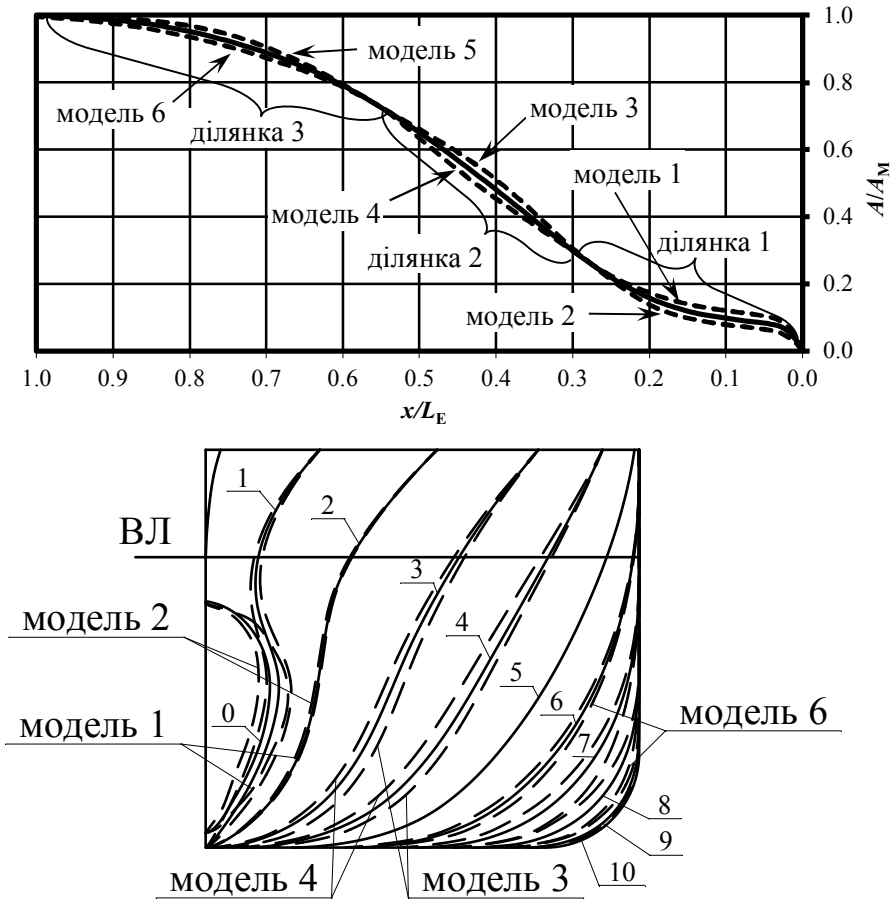


Рис. 1. Модифікації стройової по шпангоутах та відповідні трансформації перерізів (носове загострення)

Кожна окрема модифікація діє на тому чи іншому окремому відрізку стройової та призводить до позитивного чи негативного приросту об'єму корпусу. Любий з модифікованих відрізків плавно торкається початкової стройової, тому маємо набір нових стройових по шпангоутах, які описують набір (або міні-серію) нових корпусів. Якщо у кожній новій стройовій комбінувати по дві модифікації з різним знаком об'єму, такі стройові будуть відповідати постійній початковій величині водотоннажності.

Кожна ділянка суднової поверхні, де стройова по шпангоутах була змінена, повинна бути трансформована. Для цього пропонується її афінна трансформація у поперечному напрямку. Афінна трансформація повністю зберігає вертикальний розподіл площини поперечних перерізів та визначеного ними об'єму. Таким чином можна було б зберегти вертикальний розподіл об'єму по всьому трансформованому корпусу, але, на жаль, деякі шпангоутні перерізи поблизу циліндричної вставки будуть виходити за ширину судна. У таких випадках можуть бути застосовані спеціальні методи [6]. Також афінна трансформація не може застосовуватися, якщо до корпусу висуваються деякі окремі вимоги, наприклад, форма палуби повинна залишатися незмінною (рис. 1). Фактично, для обробки любых з вказаних випадків у рамках МОТНЧ необхідно застосовувати комплекс способів трансформації, що застосовуються до поперечних перерізів різного типу з урахуванням плавного переходу між ними. Тим не менш, основною ідеєю є обирати афінну трансформацію, коли це можливо, або спосіб, застосування якого дає максимально близький до неї результат. Це дозволяє обмежити вертикальний перерозподіл об'єму корпусу, контроль якого можна здійснювати, відстежуючи вертикальне положення центру величини. Оскільки вказані принципи краще відповідають архітектурі носової частини сучасних суден, МОТНЧ поки що є більш придатним для застосування до носової частини.

З метою тестування МОТНЧ був застосований до двох корпусів суден [5; 7]: тихохідного судна змішаного плавання (СЗП) з великою повнотою обводів та магістрального контейнеровозу за проектом KCS, який є добре відомим тестовим об'єктом [8]. Їхні основні характеристики наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Основні характеристики досліджених суден

Найменування	KCS	СЗП
Довжина по ватерлінії L_{WL} , м	232,1	137,8
Ширина B , м	32,2	16,5
Осадка d , м	10,8	4,6
Коефіцієнт загальної повноти C_B	0,651	0,892
Розрахункове число Фруда у МОТНЧ, Fr	0,28	0,18

Зниження опору СЗП склало 4,1 % при деякому перенесенні об'єму в межах носового загострення ближче до форштевню. Зниження опору корпусу KCS досягло 8,9 % при подібних обставинах. Значно більший корисний ефект для KCS був пояснений більш розвиненою хвильовою складовою та більшою свободою геометричних трансформацій завдяки меншій загальній повноті.

Обґрунтування достатності сітки є одним з ключових питань при застосуванні CFD моделювання. Оскільки складно забезпечити високу роздільну здатність по всьому модельованому потоку (це призводить до швидкого зростання вимог до обчислювальних ресурсів), проблема зводиться до раціонального розподілу наявних ресурсів за допомогою відповідного структурування розрахункової сітки. При цьому можна умовно розділяти вплив щільності сітки та її структури. Перевірка впливу щільності, або збіжності по сітці, зазвичай проводиться на основі серії розрахунків з послідовною зміною розмірів клітинок. Збіжність по сітці вважається досягнутою, коли похибка контрольованої величини (наприклад, опору корпусу) стає несистематичною, тобто перестає демонструвати залежність від щільності сітки. Однак, цей метод можна вважати достатньо якісним лише тоді, коли зміни щільності не супроводжуються зміною структури сітки. Інакше аналіз збіжності по сітці буде носити досить формальний характер. Щоб цього запобігти, для специфічних задач доводиться розробляти спеціальні методи структурування сітки.

Без спеціальної підготовки щільність сітки типу АЛПС можна змінювати шляхом адаптації. При дослідженні збіжності це означає, що вже існуюча сітка може бути в подальшому проадаптована. Такий підхід, вочевидь, веде до стрімкого росту числа розрахункових клітинок, якщо адаптація застосовується до всієї сітки (кожна клітинка перетворюється на вісім нових при підвищенні рівня адаптації на одиницю). Тому на практиці часто виділяють деякі граничні умови або об'єми потоку для локальної адаптації. Хоча в окремих випадках таким шляхом можна отримувати непогані результати, він змінює початкову структуру сітки та вносить досить різкі скачки розмірів сусідніх клітинок на межах проадаптованих частин сітки. При рівномірних початкових клітинках їхні розміри на межі адаптації будуть відрізнятись у двічі, що є занадто різким переходом для чутливих моделей, зокрема для моделі вільної поверхні volume of fluid (VOF). Це може призводити до певних проблем з розповсюдженням корабельних хвиль [9]. З цих причин у даній роботі дослідження збіжності по сітці виконано без застосування адаптації, що дозволило зберігати незмінною структуру початкової сітки з плавним розподілом розмірів клітинок по всіх напрямках, одночасно варіюючи щільність сітки.

Запропонований спосіб структурування сітки передбачає визначення відносних розмірів клітинок на основі неперервних функцій вздовж координатних осей x , y , z . Ці функції фіксуються у стані, що відповідає початковій сітці, тоді як розміри клітинок можна змінювати, задаючи постійний множник, що виражає відношення кількості клітинок нової та початкової сітки – рис. 2. Ідея даного способу є доволі очевидною, але його легко застосувати тільки у випадку сітки з простою структурою (якою є прямокутна сітка). Спосіб був застосований для дослідження збіжності по сітці буксирного опору корпусів КС та СЗП. При цьому множник вводився тільки для розмірів клітинок у напрямку осі x , оскільки розміри у інших напрямках слабше впливають на загальну кількість клітинок і їх можна відразу зробити достатньо малими. Отримані результати представлені на рис. 3.

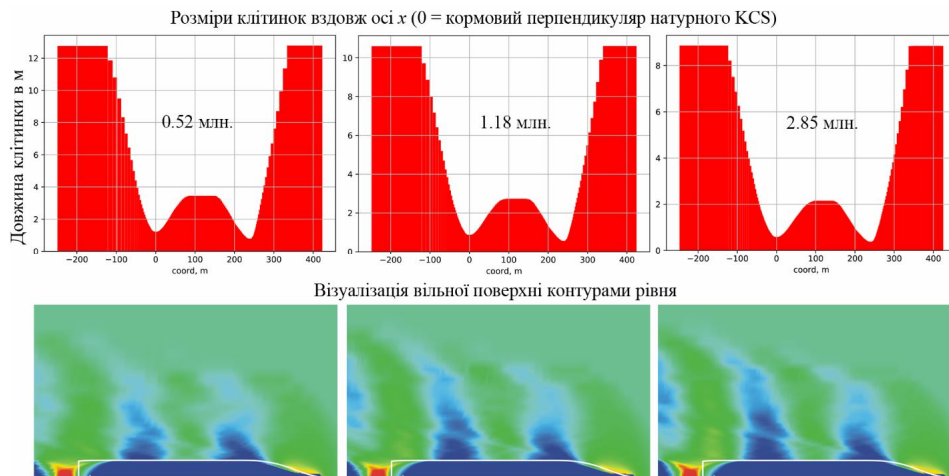


Рис. 2. Проекти підводних бурових станцій та апарату

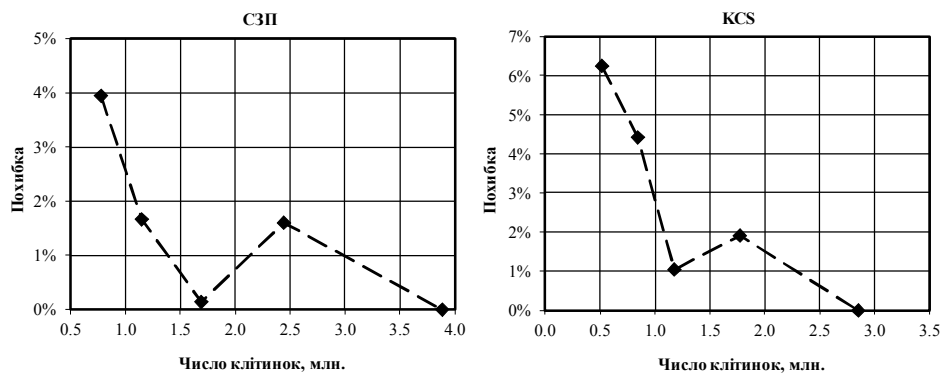


Рис. 3. Збіжність по сітці
(похибка до відношенню до опору при максимальній щільності сітки)

Результати дослідження збіжності по сітці показали, що достатньо стабільний результат можна отримати при загальному числі клітинок близько 1,0 млн. для KCS та близько 1,5 млн. для СЗП. Цілком логічно, що судно з меншим числом Фруда потребує більш щільної сітки, тому що структура його корабельних хвиль має більше компонентів та сильніше залежить від їхньої інтерференції. Для уточнення буксирувального опору СЗП була обрана сітка з 1,69 млн. клітинок. Розрахунок початкового та оптимізованого за результатами дослідження [5] корпусів показав, що різниця у буксирувальному опорі склала 3,8 % замість 4,1 %, тобто мало змінилася. Для судна KCS була обрана сітка з 1,77 млн. клітинок, а відповідна різниця у буксирувальному опорі склала 3,4 % замість 8,9 %. Таким

чином, для судна KCS ефект розрахункової сітки оказався значним, що з великою вірогідністю могло сказатися і на самому процесі оптимізації. Очевидною причиною такого потужного впливу сітки виглядає залежність результатів від інтерференції корабельних хвиль, які для судна KCS, у відповідності до його числа Фруда, мають великі розміри відносно корпусу та розповсюджувалися до меж зон адаптації у розрахунках [5]. З оглядом на виявлені ефекти, має сенс повторити оптимізаційний процес для корпусу KCS у сітці, що обґрунтована у даній роботі.

При повторенні оптимізаційних процедур для корпусу KCS у вдосконаленій сітці була також розглянута можливість задіяти більш детальні геометричні трансформації. У роботі [5] носове загострення KCS було поділено на три ділянки, що не перетинаються одна з одною (рис. 1). Така конфігурація означає, що при збільшенні площі стройової в межах однієї ділянки на одній чи обох інших площа повинна зменшитися на таку саму величину для виконання умови (2). Всього було досліджено шість моделей, які відповідали показаним на рис. 3 модифікаціям стройової, тобто крайнім можливим відхиленням від початкової форми на кожній з ділянок. Проміжні положення були враховані шляхом побудови неперервних апроксимуючих залежностей для кожної ділянки.

Теоретично, збільшення числа ділянок веде до підвищення чутливості МОНЧ. Але якщо так само ділити носове загострення на ділянки, що не перетинаються, це веде до зменшення відхилень трансформованої поверхні від початкової і постає питання достатньої чутливості CFD моделювання для оцінки їхнього впливу. Інша проблема лежить у практичній площині і пов'язана з загальною гладкістю суднових корпусів, які не можуть мати локальних опуклостей чи западин, навіть якщо вони вигідно впливають на буксирувальний опір. З оглядом на це був запропонований інший спосіб деталізації трансформацій. Він полягає у виділенні відносно великих ділянок, що накладаються друг на друга на стройовій по шпангоутах, – рис. 4. При накладанні ділянок прирости опору δR можна асоціювати з приростами площини шпангоутного перерізу δA на середині ділянки, а не з приростом об'єму на ділянці δV . Умова постійної водотоннажності (2) тоді також виражається постійною площиною стройової, але її потрібно контролювати для всієї модифікованої фігури.

Найбільш впливовий район бульбу був додатково опрацьований введенням двох різних варіантів модифікацій одного знаку на одній і тій самій ділянці. При цьому в межах ділянки максимальний приріст площини перетину в одному випадку був у середині ділянці, як при всіх інших модифікаціях, а в іншому – зміщений ближче до форштевню. Як показано на рис. 4, для першого кроку оптимізації всього було підготовлено тринадцять варіантів стройової, включаючи один додатковий для району бульба. Після першого кроку на деяких ділянках вигідні прирости площини перерізів досягли максимальних значень, тому було виконано другий крок. Було обрано дві нові ділянки та досліджено відповідні моделі корпусу. Таким чином, усі можливості зниження опору в рамках даного підходу були опрацьовані. На шляху від початкової до фінальної форми було оброблено результати по п'ятнадцяти варіантам носової частини. Зниження буксирувального опору остаточно склало 4,0%. Цей результат проглядається на рис. 5, де порівняні візуалізації хвильових систем початкового та фінального варіантів.

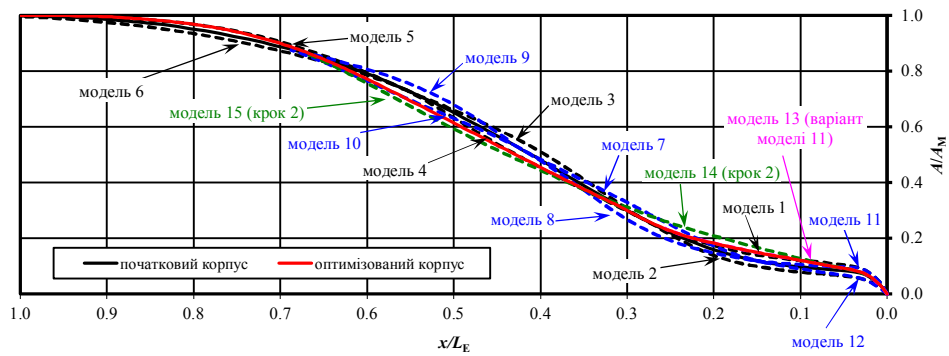


Рис. 4. Модифікації стройової по шпангоутах носового загострення KCS

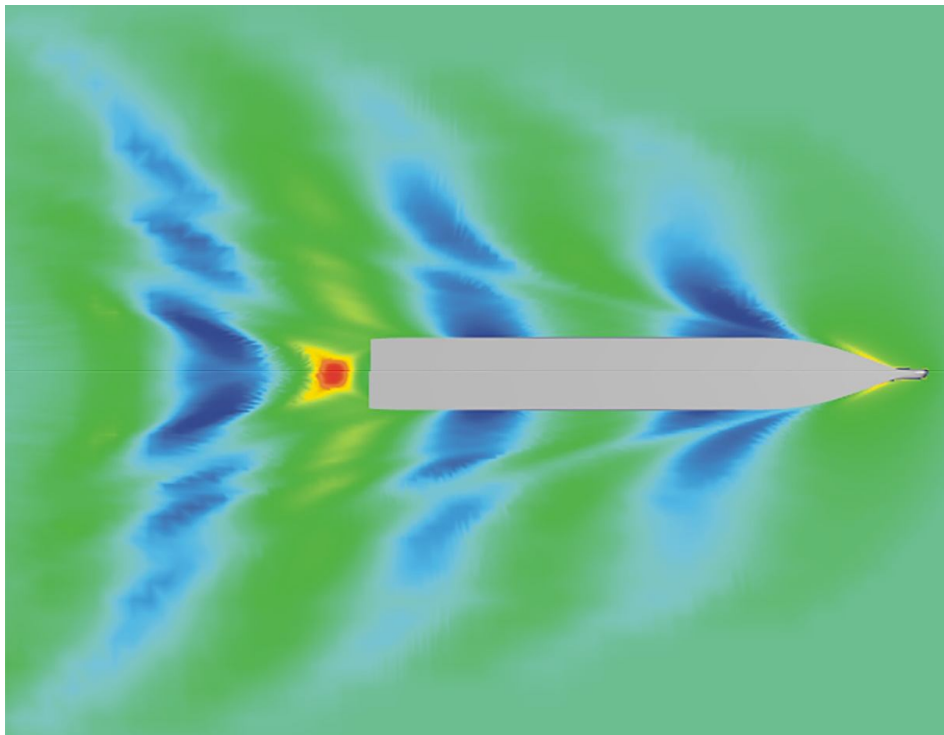
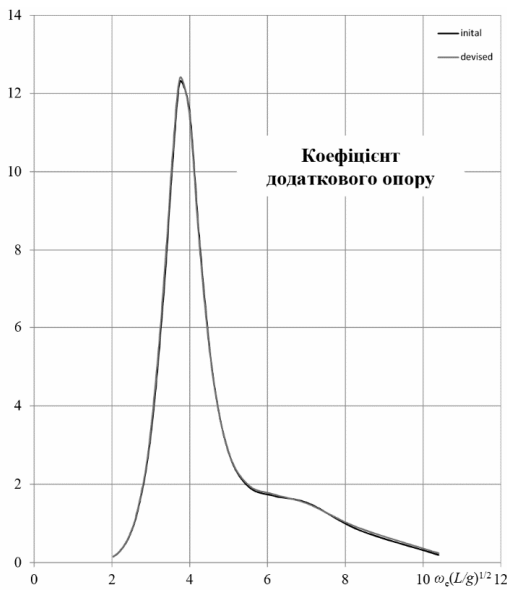


Рис. 5. Модифікації стройової по шпангоутах носового загострення KCS

Розрахунки додаткового опору на регулярному зустрічному хвилюванні були виконані добре відомим методом Gerritsma та Beukelman [10]. Усі розрахунки, включаючи амплітуди переміщень та фази, були отримані за допомогою комп'ютерної програми [11]. Відповідні безрозмірні коефіцієнти додаткового опору для початкової та фінальної форми корпусу показані на рис. 6 як функції безрозмірної уявної частоти при $Fr = 0,28$.



Приріст опору в процентах				
Бали Бофорта	Початковий корпус			
	Середній період хвилі, с			
	6	9	12	15
4	0.2	1.2	1.4	0.9
5	0.3	2.0	2.4	1.6
6	0.5	3.5	4.1	2.7
7	0.7	4.9	5.8	3.8
8	0.9	6.3	7.5	4.9
Бали Бофорта	Оптимізований корпус			
	Середній період хвилі, с			
	6	9	12	15
4	0.2	1.2	1.4	0.9
5	0.3	2.0	2.4	1.6
6	0.5	3.5	4.1	2.7
7	0.8	4.9	5.9	3.8
8	1.0	6.4	7.6	5.0

Рис. 6. Коефіцієнт додаткового опору (зліва) та приріст опору (справа) для корпусу KCS, $Fr = 0,28$

Розрахунки в нерегулярних хвилях були виконані для висоти хвилі $h_{1/3} = 1$ м та їхніх середніх періодів 6, 9, 12 та 15 секунд. Був застосований спектр хвиль ISSC-2. Отримані результати показані на рис. 6 як приріст опору в процентах по відношенню до опору початкової форми на тихій воді.

Результати як на регулярному, так і на нерегулярному хвилюванні майже співпадають для обох розглянутих форм корпусу. Найвні розбіжності не виходять за межі похибки обчислень. Це означає, що застосовані варіації форми носової частини не мають помітного впливу на додатковий опір в умовах регулярного та нерегулярного морського хвилювання, хоча при цьому значно знижують опір на тихій воді корпусу судна KCS, типового магістрального контейнеровозу.

Висновки. Здійснені дослідження ще раз продемонстрували значний вплив форми носової частини судна на його опір на тихій воді: 3-4 % опору корпусу можна усунути за рахунок його оптимальної форми без додаткових проектних мір. Звичайно, ця різниця має індивідуальний характер, але такий порядок був отриманий для двох сучасних суден різного типу.

Оцінка опору за допомогою запропонованих чисельних методів не виключає певних ризиків. Тим не менш, можуть бути розроблені і способи підвищення надійності та точності результатів. Їх застосування у даній роботі показало, що, хоча уточнення призвело для змінення величини оцінки зниження опору, на якісному рівні результати оптимізації майже не змінилися, тобто уточнення слабо сказалося на формі оптимізованої суднової поверхні.

З багатьох точок зору застосовані зміни форми носової частини можна розглядати як малі та такі, що не впливають на інші морехідні якості та проектні параметри. У даній роботі це продемонстровано за допомогою розрахунків додаткового опору на зустрічному морському хвилюванні. Отримані результати практично не відрізняються для початкового та оптимізованого варіантів корпусів.

Подальші роботи по даному напрямку можуть включати: дослідження більш універсальних методів обробки геометрії корпусів, що дозволить провести аналогічні оптимізаційні процедури для кормових частин корпусів та корпусів іншої архітектури; аналіз більшої кількості різноманітних корпусів та пошук закономірностей у результатах оптимізації; подальший аналіз впливу оптимізації за критерієм мінімум опору на спокійній воді на інші морехідні якості та проектні параметри; включення до оптимізаційного алгоритму інших критеріїв.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сизов В.Г. Об одном способе улучшения формы судна // Вісник Одеського національного морського університету: Зб.наук.праб. – 2006. – № 19. – С. 14-19.
2. Hogner E. Influence lines for the wave resistance of ships // Proc. of the Royal society A: mathematical, physical and engineering sciences. – 1936. – Vol. 155. – P. 292-301.
3. Sample selection method for ship resistance performance optimization based on approximated model / C. Haichao, C. Xide, L. Zuyuan, F. Baiwei, Z. Chengsheng // Journal of Ship Research. – 2016. – Vol. 60 (1). – P. 1-13. DOI: 10.5957/JOSR.60.1.140047
4. Legović D., Dejhalla R. Numerical hydrodynamic optimization of a tanker hull form // Towards Green Marine Technology and Transport – Proc. of 16th Int. Congress of IMAM (IMAM-2015). – Pula, Croatia, 21-24 September, 2015. – P. 75-82. DOI: 10.1201/b18855
5. Печенюк А.В. Метод оптимальной трансформации носовой части судна в задаче снижения полного сопротивления его движению на тихой воде // Зб. наук. праць НУК. – 2016. – № 2. – С. 40-45.
6. Lackenby H. On the systematic geometrical variation of ship forms // RINA Transactions. – 1950. – P. 289-316.
7. Давыдов И.Ф., Печенюк А.В. О практической значимости и достоверности результатов применения метода оптимальной трансформации носовой части судна // Зб. наук. праць НУК. – 2016. – № 3. – С. 3-10.
8. Larsson L., Stern F., Bertram V. Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flows: the Gothenburg 2000 Workshop // Journal of Ship Research. – 2003. – Vol. 47 (1). – P. 63-81. DOI: 10.5957/jsr.2003.47.1.63

9. *Investigating the Problems of Ship Propulsion on a Supercomputer / A.A. Aksenov, S.V. Zhlukto, D.P. Silaev, S.A. Kharchenko, V.A. Ilyin, A.V. Pechenyuk, E.A. Ryabinkin et al. // Proc. of Ivannikov ISPRAS Open Conference (ISPRAS-2017), Moscow, 30 November-1 December 2017. – Los Alamitos (USA): IEEE, 2017. – P. 124-132.*
10. *Gerritsma J., Beukelman W. Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship // International shipbuilding progress. – 1972. – Vol. 19 (217).*
11. *Guliev J.M., Davidov I.F., Elis J.M. System of Computer Programs for Prediction of Seakeeping Qualities of Ships and Marine Structures // Proc. 13th Session SMSSH. – 1984. – Vol. 1 (33).*

REFERENCES

1. *Sizov V.G. (2006). About a method of ship form improvement. Herald of the Odessa National Maritime University, 19, 14-19 [in Russian].*
2. *Hogner E. (1936). Influence lines for the wave resistance of ships. Proc. of the Royal society A: mathematical, physical and engineering sciences, 155, 292-301.*
3. *Haichao C., Xide C., Zuyuan L., Baiwei F. & Chengsheng Z. (2016). Sample selection method for ship resistance performance optimization based on approximated model. Journal of Ship Research, 60 (1), 1-13. DOI: 10.5957/JOSR.60.1.140047*
4. *Legović D. & Dejhalla R. (2015). Numerical hydrodynamic optimization of a tanker hull form. Proc. of 16th Int. Congress of IMAM (IMAM 2015): Towards green marine technology and transport (pp. 75-82). – London (UK): CRC Press. DOI: 10.1201/b18855*
5. *Pechenyuk A. V. (2016). The method of optimum foreship transformation in the problem of total resistance decreasing in the still water. Zbirnyk naukovykh prats NUK, 2, 40-45 [in Russian].*
6. *Lackenby H. (1950). On the systematic geometrical variation of ship forms. RINA Transactions, 289–316.*
7. *Davydov I.P. & Pechenyuk A.V. (2016). About practical significance and reliability of the results obtained by the method of optimum foreship transformation. Zbirnyk naukovykh prats NUK, 3, 3-10 [in Russian].*
8. *Larsson L., Stern F. & Bertram V. (2003). Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flows: the Gothenburg 2000 Workshop. Journal of Ship Research, 47 (1), 63-81. DOI: 10.5957/jsr.2003.47.1.63*
9. *Aksenov A.A., Zhlukto S.V., Silaev D.P., Kharchenko S.A., Ilyin V.A., Pechenyuk A.V., Ryabinkin E.A. et al. (2017). Investigating the Problems of Ship Propulsion on a Supercomputer. Proc. of Ivannikov ISPRAS Open Conference (ISPRAS-2017) (pp. 124-132). – Los Alamitos (USA): IEEE.*

10. Gerritsma J. & Beukelman W. (1972) *Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship. International shipbuilding progress*, 19 (217).
11. Guliev J.M. & Davidov I.F. & Elis J.M. (1984). *System of Computer Programs for Prediction of Seakeeping Qualities of Ships and Marine Structure. Proc. 13th Session SMSSH*, 1 (33).

Стаття надійшла до редакції 10.06.2023

Посилання на статтю: Давидов І.П., Печенюк А.В. Дослідження впливу форми носової частини судна на його опір в умовах тихої воді та хвилювання // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 3 (70). С.7-20. DOI 10.47049/ 2226-1893-2023-3-7-20.

Article received 10.06.2023

Reference a journalartic: Davydov I., Pechenyuk A. Study of forebody shape effect on ship resistance in still water and in waves // Herald of the Odesa National Maritime University. Coll. scient. works, 2023. № 3 (70). P. 7-20. DOI 10.47049/ 2226-1893-2023-3-7-20.