

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

ПЕЧЕНЮК АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 629.5.(012+016+017):532

**МЕТОД ОПТИМАЛЬНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ НОСОВОЇ ЧАСТИНИ СУДНА
В ЗАДАЧІ ЗНИЖЕННЯ ОПОРУ ЙОГО РУХУ**

Спеціальність 05.08.03 – конструювання та будування суден

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Миколаїв – 2017

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Національному університеті «Одеська морська академія» (НУ «ОМА») Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент

Давидов Ігор Пилипович,

Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри теорії та устрою судна

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Нєкрасов Валерій Олександрович,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК), завідувач кафедри теорії та проектування суден

кандидат технічних наук

Єгоров Олександр Геннадійович,

Морське Інженерне Бюро, старший науковий співробітник

Захист відбудеться "___" _____ 2017 р. в _____ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9, ауд. 360.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9.

Автореферат розісланий "___" _____ 2017 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

доктор технічних наук, професор

Зайцев В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТЫ

Актуальність дослідження. Форма корпусу є ключовим елементом у складі пропульсивного комплексу судна. Зниження опору корпусу безпосередньо конвертується в економію пального, отже, веде до підвищення проектних показників та економічної ефективності. Однак питання проектування і вдосконалення обводів у сучасній практиці є слабо узагальненими та формалізованими. Вони вирішуються за допомогою комбінації наукових знань, інженерного досвіду та критеріїв з області мистецтва.

Наукова проблема, що зв'язана із оптимізацією форми корпусу, в теорії корабля є однією з ключових. Вона обумовлена недостатньою вивченістю впливу форми корпусу на параметри, що визначають ходові якості. Проблема тісно пов'язана з адекватною оцінкою буксирувального опору, сили засмокування, а також формалізованим описом геометрії корпусу.

На різноманітних рівнях, від розробки поодиноких проектів, до пошуків оптимальних суднових форм, застосовувалися та продовжують застосовуватися експериментальні, теоретичні та чисельні методи дослідження.

Експериментальний підхід при високої надійності визначення опору реалізується як метод проб і помилок. Методи чисельного моделювання, що активно розвиваються, у методологічному відношенні є близькими до експериментальних.

Відносна системність у використанні експериментальних результатів була досягнута за рахунок статистичних методів, заснованих на результатах спеціальних серійних випробувань та статистичної обробці даних з архівів гідродинамічних лабораторій. Однак, ця системність поширилась лише на рівень найбільш значимих показників – співвідношень головних розмірів, а не всіх показників форми корпусу.

У межах теоретичного підходу добре відомими є дослідження із глибоким опрацюванням методологічної бази, яка через проблеми оцінки опору знайшла лише обмежене практичне застосування.

Ця ситуація у послідовності проектування відповідає розриву між початковою стадією, коли обґрунтовуються основні параметри форми корпусу, і заключною, на якій виконується експериментальне дослідження ходових якостей судна. Наявність розриву призводить до того, що в процесі проектування якості суднових обводів важко контролювати.

У даній роботі запропонований метод, що дозволяє на систематичній основі вивчати вплив форми корпусу водотоннажних суден на опір руху. Увага в роботі сфокусована лише на обводах носової частини.

Актуальність теми обумовлена винятковою важливістю комплексного дослідження впливу форми суднових обводів на опір руху, що сприяє вдосконаленню процесу проектування, покращенню проектних показників та економічної ефективності судна.

Наукове значення результатів роботи полягає у розробці нового метода дослідження, що дозволяє вивчати вплив форми суднових обводів на буксирувальний опір корпусів водотоннажних суден.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Напрямок дисертаційного дослідження відповідає Закону України «Про пріо-

ритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» № 3715-VI від 08.09.2011 (редакція від 05.12.2012), ст. 4 «Стратегічні пріоритетні напрями інноваційної діяльності на 2011-2021 роки» (п. 2 «освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки»); положенням Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., № 2174-р); рішенню Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 р. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. № 463/2008).

Дисертація включає результати науково-дослідної роботи (НДР) «Дослідження вдосконалених обводів для повного тихохідного судна за допомогою теоретичних та експериментальних методів» № 0115U005602, що виконана у відповідності до планів наукових досліджень кафедри «Теорія та устрій судна» НУ «ОМА», де здобувач брав участь як виконавець, а також результати робіт в межах Згоди про науково-технічне співробітництво між кафедрами теорії та устрою судна НУ «ОМА» і теорії та проектування корабля ім. Ю.Л. Воробйова ОНМУ.

Об'єктом дослідження є процес проектування форми корпусу водотоннажних суден.

Предметом дослідження є форма обводів носової частини корпусу водотоннажних суден.

Метою дисертаційної роботи є розробка метода визначення оптимальної трансформації носової частини водотоннажних суден з метою зниження опору їх руху.

Основні задачі наукового дослідження. Для досягнення цілі роботи передбачено вирішення наступних задач:

1. Аналіз сучасного стану проблеми вдосконалення суднових обводів, формулювання критерію якості обводів та постановка задачі дослідження.
2. Розробка методики визначення опору судна методами обчислювальної гідродинаміки (ОГД), оцінка її адекватності та меж застосовності.
3. Розробка математичної моделі та програмного забезпечення моделі систематичних трансформацій (МСТ), яка дозволяє автоматизувати проектування форми корпусу судна у відповідності до варіюванням розподілу водотоннажності.
4. Розробка метода зниження опору корпусу судна, який використовує методику визначення опору методами ОГД, а також МСТ форми корпусу.
5. Застосування метода оптимальної трансформації до носових частин тестових суден для всебічного аналізу його роботи на конкретних прикладах.
6. Оцінка адекватності і надійності метода за допомогою модельного експерименту в опитовому басейні.

Методи дослідження. У дослідженні використані теоретичні, чисельні та експериментальні методи гідромеханіки та теорії корабля. У методологічному відношенні задача вдосконалення обводів розглянута у взаємодії із теорією проектування суден. Для дослідження впливу трансформацій носової частини корпусу на буксирувальний опір в роботі широко застосовувалися методи ОГД, що засновані на чисельному рішенні рівнянь руху в в'язкої рідини. Трансформація теоретичних корпусу-

сів об'єктів дослідження здійснювалася за допомогою спеціально розроблених автором засобів сучасних графічних САПР.

Дисертація базується на трудах вітчизняних та закордонних вчених в області теорії корабля і теорії проектування суден, в тому числі великий вплив на неї вчинили роботи А.Ш. Готман, О.О. Костюкова, М.Г. Крейна, І.О. Мізіна, Л.М. Ногіда, Г.Є. Павленко, В.М. Пашина, В.Г. Сізова, Т.Н. Havelock, Т. Inui, Н. Lackenby, L. Larsson, Н.С. Raven та інш. В частині практичної реалізації робота розвиває напрямок, сформований В.Г. Сізовим. Чисельні методи, що зіграли велику роль під час підготовки роботи, розроблені науковим колективом на чолі з А.О. Аксьоновим, О.О. Дядькіним, В.І. Похилко.

На захист виносяться основні результати роботи – сукупність теоретичних, методичних та практичних питань, пов'язаних із задачею вдосконалення носових обводів судна для зниження опору руху, що викладені у висновках до відповідних розділів. Крім того, на захист виноситься **наукове положення**, сформульоване на основі результатів рішення задачі:

Вплив форми носової частини на опір судна визначається залежністю локального коефіцієнта поздовжньої повноти від поздовжньої координати, що віднесена до довжини поперечної хвилі.

Наукова новизна роботи полягає у створенні комплексного метода оптимальної трансформації носової частини водотоннажних суден, що відрізняється від відомих раніше, декомпозицію поздовжнього і вертикального розподілу повноти суднової поверхні, та встановленні залежностей впливу розподілу повноти на буксирувальний опір судна. Отримані наступні нові результати:

1. **Вдосконалено** методику чисельного моделювання процесу обтікання суднових корпусів шляхом включення до неї рекомендацій щодо призначення поздовжніх розмірів розрахункової області для судна із заданими головними розмірами, а також по формуванню областей концентрації елементів прямокутної розрахункової сітки, яка розділяє потік, що обтікає судновий корпус. Вдосконалення методики, що виконані на основі систематизації параметрів і результатів проведеного моделювання обтікання корпусів 47 суден різноманітної форми і швидкісних режимів руху, забезпечили виконання розрахунків буксирувального опору еталонних суден з точністю, яка відповідає рівню сучасних світових стандартів у порівнянні з надійними даними експериментальних досліджень.
2. **Вперше** запропоновано математичну модель систематичних трансформацій форми корпусу, основоположним принципом якої стало використання локального коефіцієнта поздовжньої повноти в якості характеристики поздовжнього розподілу водотоннажності. Модель здійснює варіювання величини та поздовжнього розподілу водотоннажності носової частини корпусу шляхом змінення обмежених ділянок її поверхні, що дозволяє досліджувати тонкі ефекти впливу відносно малих трансформацій суднової поверхні на буксирувальний опір, при яких змінення водотоннажності складають порядку десятих часток відсотку.
3. На базі запропонованої моделі систематичних трансформацій розроблено метод зниження опору руху судна, в основу якого **вперше** введено припущення

про незалежність впливу форми різних ділянок носової частини корпусу, які виділені по довжині судна, на його буксирувальний опір. Метод забезпечує надійну оцінку впливу трансформацій суднової поверхні на буксирувальний опір та дозволяє визначати комбінацію трансформацій, яка відповідає оптимальній формі носової частини за критерієм мінімального питомого опору корпусу судна.

4. **Набуло подальшого розвитку** дослідження задачі впливу форми суднового корпусу на його буксирувальний опір на основі аналізу результатів застосування метода до двох різних за характером обводів і швидкісним режимом суден, які були підтверджені для одного з них спеціальним експериментальним дослідженням в опитовому басейні. Згідно з даними виконаних досліджень, поздовжній перерозподіл водотоннажності в носовій частині суден є головним фактором у зниженні їх буксирувального опору.
5. В результаті узагальнюючого аналізу вдосконалених за допомогою метода носових обводів суден *вперше* встановлено, що вплив форми носової частини на хвильовий опір судна визначається залежністю локального коефіцієнта поздовжньої повноти від поздовжньої координати, віднесеної до довжини поперечної хвилі. Використання вказаної залежності сприяє спрощенню і формалізації задачі пошуку форми носової частини, яка забезпечує мінімальний повний опір судна.

Практична цінність отриманих результатів:

1. Розроблена методика чисельного моделювання обтікання корпусу забезпечує коректний підхід до визначення буксирувального опору суден різноманітного типу в широкому діапазоні швидкісних режимів, що може використовуватися в практичному проектуванні для відпрацювання форми корпусу та дослідження ходових якостей.
2. Метод оптимальної трансформації носової частини дозволяє оптимізувати параметри поздовжнього розподілу водотоннажності в носовій частині, які до сих пір не були охоплені формальними методиками чи достатньо докладними рекомендаціями, що поширює методологічну базу теорії проектування і забезпечує зниження буксирувального опору, згідно отриманим у роботі результатам, на 4–6% у тихохідного судна змішаного плавання та на 9% у середньошвидкісного контейнеровозу.
3. Модель систематичних трансформацій, що реалізована в САПР T-FLEX, дозволяє здійснювати узгоджені трансформації теоретичної поверхні корпусу, яка представлена 3D моделлю, що може використовуватися у практичному проектуванні.
4. Отримані результати вдосконалення носових обводів мають практичне значення для проектування нових суден.
5. Результати вдосконалення носових обводів суден змішаного плавання (СЗП) мають практичне значення для модернізації існуючих суден, причому результати дослідження бульбового доточування відрізняються високим ступенем готовності до практичного використання.

Впровадження результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи впроваджені у межах НДР «Дослідження вдосконалених обводів для повного тихо-

хідного судна за допомогою теоретичних та експериментальних методів» №0115U005602 кафедри «Теорія і устрій судна» НУ «ОМА»; до навчального процесу НУ «ОМА» на кафедрі «Теорія і устрій судна». Методика чисельного моделювання обтікання корпусу і метод оптимальної трансформації носової частини в цілому впроваджені у робочий процес ТОВ “Digital Marine Technology” (Одеса, Україна) для відпрацювання форми корпусу і дослідження ходових якостей суден на етапі проектування. Також методика чисельного моделювання обтікання корпусу судна впроваджена у робочий процес компанії «ТЕСИС» (Москва, Росія) для тестування і вдосконалення ПК FLOWVISION, а також складання рекомендацій користувачам. Результати, що отримані за допомогою методики чисельного моделювання обтікання корпусу і метода оптимальної трансформації носової частини, використовувалися в проектах суден Морського Інженерного Бюро (МІБ, Одеса, Україна).

Особиста участь здобувача. Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням. Усі теоретичні та практичні результати дисертації були отримані здобувачем особисто.

У наукових публікаціях, що підготовлені у співавторстві, автору належать наступні результати:

- аналітичний огляд методів дослідження ходових якостей суден – у праці [15];
- розробка і застосування методики чисельного моделювання обтікання судна в задачах проектування форми корпусу та дослідження ходових якостей суден – у працях [1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 16, 17, 20, 21, 22];
- розробка і застосування метода оптимальної трансформації носової частини судна в процесі його проектування для зниження опору руху – у працях [6, 7];
- розробка вдосконалених обводів СЗП, виконання по ним чисельних розрахунків, обробка і аналіз результатів експериментів – у працях [2, 8].

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи докладалися й отримали позитивну оцінку на наступних науково-технічних конференціях:

- I Международный форум молодых морских лидеров у межах 4-ї Всесвітньої морської технологічної конференції (Росія, м. Санкт-Петербург, Центральний військово-морський музей, 1 червня 2012 р.);
- III Міжнародна науково-технічна конференція "Інновації в суднобудуванні і океанотехніці" (Україна, м. Миколаїв, НУК, 4-6 жовтня 2012 р.);
- Міжнародна конференція «Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека» (Україна, м. Одеса, ОНМА, 16–17 листопада 2012 р.);
- 3rd International Conference on High Performance Computing (HPC-UA 2013) (Україна, м. Київ, НТУ «Київський політехнічний інститут», 7-11 жовтня 2013 р.);
- Всеукраїнська науково-технічна конференція "Сучасні технології проектування, будування, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів та інженерних споруд" (Україна, м. Миколаїв, НУК, 21-23 травня 2014 р., 20-22 травня 2015 р.);
- III Міжнародна науково-технічна конференція «Експериментальні методи теорії корабля» (Україна, м. Миколаїв, НУК, 8-10 жовтня 2014 р.);
- 3rd National CFD Conference of Shipbuilding and Marine Engineering (KHP, м.

Далянь, Далянський морський університет, 25-26 липня 2014 р.);

- Міжнародні форуми «Инженерные системы-2012-2015» (Росія, м. Москва, Міжнародний інформаційно-виставковий центр «ИнфоПространство», 10-11 квітня 2012 р., 15-16 квітня 2013 р., 7-8 квітня 2014 р., 6-7 квітня 2015 р.);
- 16th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean IMAM 2015 – Towards Green Marine Technology and Transport (Хорватія, м. Пула, 21-24 вересня 2015 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 22 наукові праці, з них: 7 відображують основні наукові результати (4 у збірниках наукових праць, що рекомендовані переліком ДАК МОН України, з яких одна без співавторів, і 3 в іноземних журналах, у співавторстві); 10 праць апробаційного характеру, з яких 5 без співавторів та 5 у співавторстві; 5 статей, що додатково відображають результати дисертації (2 без співавторів і 3 у співавторстві), 2 праці з перелічених включені до бібліографічної та реферативної бази “Scopus”.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п’яти розділів, висновку, списку використаних джерел та тринадцяти додатків. Дисертація містить 177 аркушів основного матеріалу, 85 рисунків, 17 таблиць, 101 найменування літературних джерел. Обсяг додатків складає 73 аркуша.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТЫ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, визначені мета та задачі дослідження, показана наукова новизна та практична значимість роботи, наведені положення, які виносяться на захист.

У першому розділі розглянутий стан проблеми, існуючі і перспективні підходи до її вирішення, сформульована постановка задачі.

Забезпечення найкращих ходових якостей є одним з пріоритетних запитів судновласника, який зазвичай строго оформлюється контрактом на будівництво судна у вигляді вимоги до здавальної швидкості. Серед можливостей вплинути на ходові якості судна що проектується центральне місце займає оптимізація форми корпусу з метою зниження буксирувального опору.

У відповідних дослідженнях велику роль грає підхід до визначення опору для відомої форми корпусу: експериментальний, теоретичний чи чисельний, огляд яких представлений у роботі.

Експериментальний підхід залишається найбільш надійним, але його повноцінне використання потребує занадто великих витрат часу та коштів. У відповідальних проектах іноді передбачають порівняння кількох варіантів корпусу, і вибір кращого з них, що відповідає методу проб і помилок. Основною метою експериментального дослідження, яке зазвичай проводиться на завершуючих стадіях проекту, є уточнення швидкості руху і відповідної потужності енергетичної установки. Це суттєво звужує можливості вдосконалення обводів. Необхідність значних змін тягне за собою суттєву переробку проекту, що, як правило, є неприйнятною за строками.

За допомогою статистичних методів (наприклад, метод J. Holtrop й G.G.J. Mennen) вдалося організувати системне використання результатів серійних випробувань і даних, що накопичені у архівах опитових басейнів, для обґрунтування співвідношень головних розмірів – найбільш суттєвих елементів корпусу. Для роботи ж формою обводів статистичні методи малопридатні через слабку чутливість до менш суттєвих за ступенем впливу елементів.

Таким чином, експериментальний підхід не дозволив охопити усі етапи процесу проектування. Між початковими і завершальними етапами проектування утворюється розрив, який обмежує можливості вдосконалення обводів. У своїх роботах В.М. Пашин запропонував здолати його за допомогою методів передбасейнової оптимізації, які не потребують проведення експериментів.

У якості таких можуть розглядатися теоретичні методи пошуку суднових форм найменшого опору. Перше відоме дослідження у цій галузі належить Н.Є. Жуковському (1903). Потім ряд значних успіхів був досягнутий на базі аналітичної теорії хвильового опору, що була сформульована J.H. Michell, й вдосконалена працями багатьох дослідників (А.Ш. Готман, О.О. Костюков, М.Г. Крейн, І.О. Мізін, Г.Є. Павленко, В.Г. Сізов, Л.М. Сретенський, Т.Н. Havelock, G. Weinblum та інші). Були отримані важливі результати, але через низку теоретичних і практичних складностей вирішити задачу щодо судна найменшого опору в аналітичному вигляді не вдалося.

Окремий напрямок склала група теоретичних робіт, у яких розроблялися прийоми вдосконалення обводів на базі аналізу елементарних змін, – E. Hogner,

В.Г. Сізов. Було показано, що для відомої форми корпусу простіше визначити вигідні напрямки вдосконалення обводів.

Оскільки зустрінуті труднощі багато в чому були пов'язані із завданням суднової поверхні у вигляді аналітичного виразу, був запропонований новий підхід, у якому вплив корпусу на потік моделювався за допомогою гідродинамічних особливостей (Т. Inui). Було показано, що від оптимального розподілу особливостей можна перейти до замкнених ліній струму, що відповідають обводам корпусу (Р.С. Pien). Хоч рішення задачі про найменший опір не було отримане через низку математичних та обчислювальних ускладнень, підхід забезпечив більш високу відповідність результатів експериментальним даним, бо був краще пристосований до об'ємних комп'ютерних обчислень. За низкою якостей його можна вважати перехідним до чисельних методів.

У чисельних методах рівняння механіки суцільного середовища вирішуються в окремих точках, які належать потоку або поверхні тіла, а диференціали змінних величин замінюються різницевиими аналогами. Спочатку були розроблені панельні методи, в яких об'єкт що досліджується представляється набором плоских панелей, у центрах або кутах яких розташовуються гідродинамічні особливості, що моделюють потік (V. Bertram, C.W. Dawson, C.E. Janson, K.J. Kim, S.Y. Ni, H.C. Raven, F. Xia та інші). Панельним методам притаманні недоліки, пов'язані із неповним урахуванням в'язких явищ.

Більш точне моделювання в'язкого потоку стало доступним за допомогою рішень рівнянь Нав'є-Стокса чисельними методами. Вперше результати моделювання обтікання корпусу судна на базі чисельного рішення рівнянь в'язкої рідини були представлені D.B. Spalding та його співавторами з Імперського коледжу Лондона у 1978 р.

Чисельні методи у теперішній час продовжують бурно розвиватися, й при загальних теоретичних основах характеризуються великою різноманітністю особливостей реалізації. Тому у прикладних галузях велике значення набули процедури їхнього тестування та атестації (verification and validation). У гідродинаміці судна авторитетні рекомендації по цих процедурах були розвинені у межах міжнародного семінару щодо проблем чисельного моделювання обтікання суднового корпусу в'язким потоком, який з 1980 р. по 2010 р. проходив по чергову у Гетеборзі та Токіо. Результати семінару «Гетеборг-2010» показали, що точність чисельних методів при визначенні буксирувального опору судна у середньому дещо нижче, ніж досягається в експерименті, але вже порівнянна з нею.

Чисельні методи, які реалізовані у сучасних програмних комплексах (ПК) інженерного аналізу, по строкам та вартості досліджень, а також можливостям візуалізації потоку мають переваги у порівнянні до експериментальних. Це робить застосування чисельних методів в задачі вдосконалення обводів особливо перспективним, оскільки число варіантів форми, що розглядаються одночасно, можна суттєво збільшити.

Огляд методів досліджень показав, що підхід до послідовного вдосконалення форми корпусу, який був використаний у методі В.Г. Сізова, є найбільш коректним. У більш пізніх роботах, де в основному передбачена оцінка буксирувального опору за допомогою експериментальних або чисельних методів, не застосовувалася більш

досконала методологічна база.

Разом з цим, методика, що дозволяє реалізувати переваги чисельних методів в задачі вдосконалення обводів, по теперішній час не була розроблена. У проектній практиці ситуація набула риси **протиріччя** на емпіричному і теоретичному рівні, оскільки з'явилася можливість вивчення великого числа варіантів форми при наявності потужних засобів візуалізації та аналізу, однак не сформульовані принципи організації дослідження, що дозволяють синтезувати вдосконалену суднову поверхню.

Сформульована на основі аналізу стану проблеми постановка задачі базується на: 1) фіксації незмінних головних розмірів та їхніх співвідношень, включаючи величину водотоннажності, а також контуру діаметральної площини (ДП); 2) критерії питомого опору R/V , який застосовується як до корпусу в цілому, так і до локальних ділянок його поверхні у відповідності до концепції метода В.Г. Сізова; 3) трансформаціях локальних ділянок корпусу за допомогою МСТ, які супроводжуються варіюванням розподілу водотоннажності корпусу; 4) оцінці впливу трансформацій корпусу на його буксирувальний опір за допомогою ОГД; 5) пошуку оптимальної конфігурації трансформацій корпусу за допомогою спеціально розробленого метода зниження опору.

У другому розділі викладені особливості методів ОГД, які використані у роботі; обґрунтована методика чисельного моделювання обтікання корпусу судна, наведені результати тестування методики на еталонних суднах.

Застосування методів ОГД в задачах моделювання ходових якостей суден у теперішній час здійснюється, в основному, за допомогою потужних ПК, таких як: FLUENT, STAR-CCM+, CFX, SHIPFLOW, ANSYS та інші. Вони поєднують у собі результати численних розробок як в області гідродинаміки, так і в області програмування та обчислювальної техніки. У даній роботі використаний ПК FLOWVISION, вибір якого пояснюється, поперед всього, доступною в ньому технологією побудови розрахункової сітки, яка є вельми зручною для виконання великої кількості розрахунків, у яких варіюється форма корпусу.

Для виконання чисельного моделювання обтікання суднового корпусу з метою отримання його опору та інших буксирувальних характеристик в ПК FLOWVISION була розроблена спеціальна методика створення і розрахунку проекту, яка включає рекомендації по наступним діям: 1) формування фізичної моделі проекту; 2) постановка задачі чисельного моделювання; 3) контроль виконання розрахунку.

Фізична модель обтікання корпусу судна побудована на базі моделі нестисливої рідини, яка включає рівняння нерозривності й рівняння Рейнольдса, доповнене рівняннями стандартної $k-\epsilon$ моделі турбулентності для визначення турбулентної динамічної в'язкості μ_t . Для моделювання вільної поверхні використовувався модифікований метод VOF (от англ. Volume of Fluid – об'єм рідини).

В якості раціональної постановки задачі чисельного моделювання буксировки була прийнята схема гідролотка, в якому модель судна обтикається оберненим потоком рідини. Це дозволяє зменшити розміри розрахункової області (РО). Вибір її мінімальних розмірів був обґрунтований з точки зору впливу границь на результати моделювання. Геометрія РО представляє собою прямокутний паралелепіпед, розби-

тий на грані у відповідності до схеми розстановки граничних умов (ГУ) – рис. 1. При симетричних обводах моделюється лише половина потоку. На поверхні корпусу використовується ГУ стінки з логарифмічним законом для швидкості, яке добре відповідає повністю розвинутому турбулентному пограничному шару (ПШ).

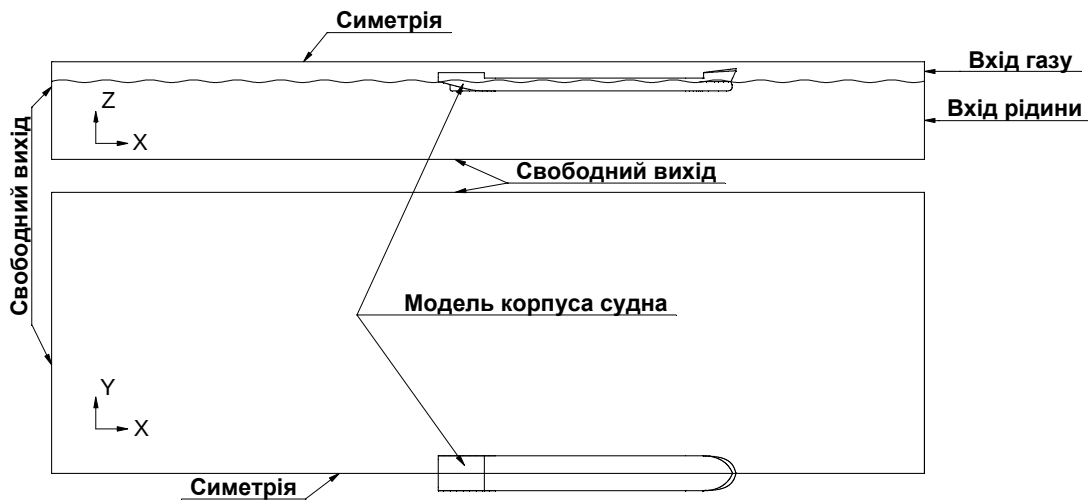


Рисунок 1 – РО и розстановка ГУ

Дослідження питання о впливі розмірів РО показало, що її поперечні розміри можуть бути призначені згідно рекомендаціям по проведенню модельних випробувань. Для довжини РО запропоновані наступні рекомендації (L , B , d – головні розміри судна):

- ділянка за кормою моделі судна

$$l_A \geq L; \quad (1)$$

- ділянка перед носом моделі судна

$$l_F \geq 10\sqrt{Bd}. \quad (2)$$

Постановка задачі вдосконалення обводів значною мірою залежить від адекватності методів ОГД та їхньої точності. Для забезпечення необхідної точності застосовувалися відносно докладні сітки з числом розрахункових елементів 1 – 4 млн. Розрахунки з такими параметрами сіток виконувалися за допомогою паралельних обчислень на суперкомп'ютерах.

Розрахункові сітки будувалися на основі прямокутних нерівномірних початкових сіток. Найбільш дрібні елементи початкової сітки були згруповані біля кінцевостей суден, де спостерігаються максимальні перепади тиску, а також в районі вільної поверхні, де формується система корабельних хвиль. Для вибору параметрів розрахункової сітки, які забезпечують бажаний баланс між точністю й витратами обчислювальних ресурсів, в межах дослідження еталонних суден виконувався аналіз збіжності по сітці. Збіжність по сітці розглядалася як залежність буксирувального опору від числа розрахункових елементів.

Контроль виконання розрахунків здійснювався на основі залежності сили буксирувального опору від модельного часу. На початкових етапах обтікання корпусу супроводжувалося нестационарними явищами, що викликані початковими умовами, в ході яких відбувалося формування полів швидкостей та тисків, а також систем корабельних хвиль на вільній поверхні. Заключний етап розрахунку відповідає досяг-

ненню в квазістаціонарному режимі обтікання із практично постійним буксирувальним опором.

Для обґрунтування параметрів методики використовувалися дані розрахунків, виконаних автором для 47 суден, що проектувалися та модернізувалися, для 10 з яких малися результати модельних випробувань, для 25 – приймально-здавальних випробувань. У якості еталонних об'єктів для тестування методики були прийняті два судна, по яким малися вельми надійні експериментальні дані: контейнеровоз KCS, запропонований на міжнародному семінарі «Гетеборг-2000» для тестування чисельних методів, а також повне і тихохідне судно змішаного плавання, по якому експериментальні дані були отримані у великому глибоководному басейні Криловського державного наукового центра. Основні характеристики еталонних об'єктів представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики еталонних суден

Характеристики об'єктів	KCS	СЗП
Довжина по ватерлінії L_{WL} , м	232.1	137.8
Ширина B , м	32.2	16.5
Висота борта D , м	19.0	6.0
Осадка d , м	10.8	4.6
Водотоннажність об'ємна V , м ³	52030.0	9325.8
Площина змоченої поверхні S , м ²	9424.0	3271.6
Коефіцієнт загальної повноти C_B	0.651	0.892
Відносна абсциса ЦВ L_{CB} (%), в нос «+»	-1.48	+1.23
Розрахунковий діапазон чисел Фруда	0.17–0.28	0.14–0.18

Згідно отриманим результатам відносна похибка у зрівнянні з надійними результатами експериментів склала для СЗП -0.2%, для судна KCS +0.7% для моделі, що закріплена у початковому положенні, і +4.3% для моделі з вільною посадкою (+1.4% при $Fr > 0.26$). Вказані похибки відповідають сучасному світовому рівню точності чисельних методів, який був оцінений за підсумком міжнародного семінару «Гетеборг-2010».

Порівняння розрахункових та експериментальних даних по хвильовій системі судна KCS показало, що вони достатньо добре узгоджуються – рис. 2.

На основі результатів досліджень були зроблені висновки про те, що методи ОГД, що використовуються у роботі, мають достатній рівень адекватності й точності для отримання передбачених постановкою задачі якісних та кількісних результатів. Цей рівень досягнутий за рахунок вибору ПК, розробки методики чисельного моделювання обтікання корпусу та тестування цієї методики за допомогою еталонних суден.

Отримані результати по еталонним суднам можуть служити надійною базою подальших досліджень задачі.

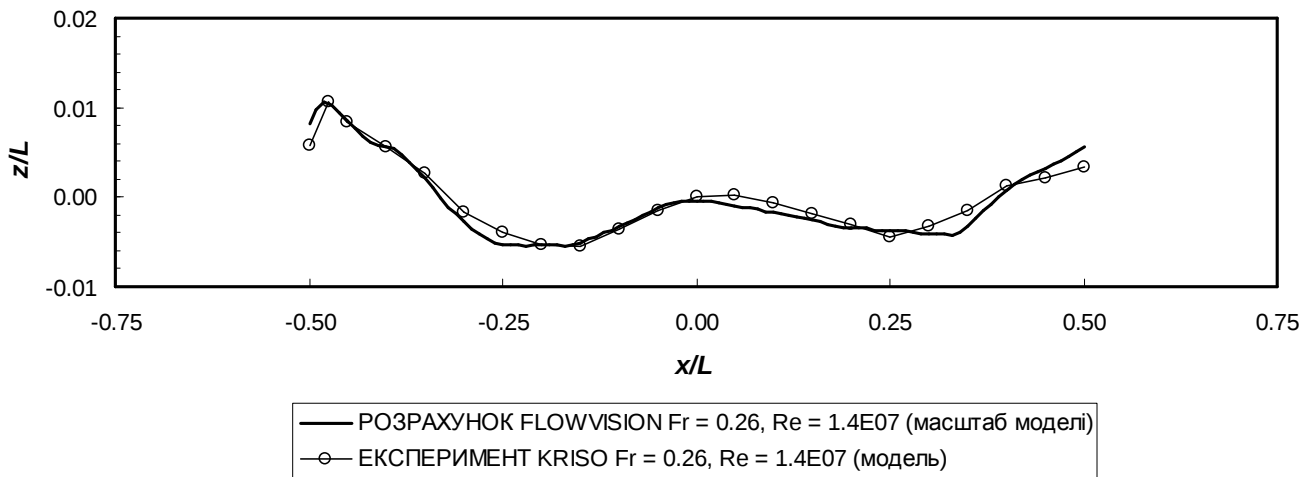


Рисунок 2 – Хвильовий профіль на поверхні корпусу KCS

Третій розділ посвячений розробці метода оптимальної трансформації носової частини судна і результатам його застосування до тестових суден. Комплексний метод оптимальної трансформації носової частини судна складається з двох основних компонентів – МСТ форми корпусу і метода зниження опору.

Постановка задачі передбачає варіювання форми корпусу при систематичній зміні тої її характеристики, яка у найбільшому ступені впливає на буксирувальний опір, при дотриманні усіх прийнятих обмежень. При незмінності головних розмірів, їхніх співвідношень та контуру ДП, форму обводів визначають характеристики поздовжнього та вертикального розподілу повноти. Вертикальний розподіл не має оптимуму по хвильовому опору, яке є основним активним компонентом, особливо щодо відношення до форми носової частини. Тому в основу МСТ покладено варіювання поздовжнього розподілу повноти. В роботі вперше запропоновано виражати його за допомогою *локального коефіцієнта поздовжньої повноти* K_{PE} , який не залежить від загальної повноти обводів:

$$K_{PE}(x) = \frac{\int_0^x A_F(x) dx}{x \cdot A_F(x)}, \quad (3)$$

де $A_F(x)$ – площа шпангоута з абсцисою x .

Варіювання функції (3) передбачено шляхом модифікації ділянок безрозмірної стройової по шпангоутах – рис. 3 (показана носова частина стройової). Модифікація ділянки дає варіант стройової із позитивним або негативним приростом водотоннажності δV . Комбінуючи модифікації на різних ділянках, можна скласти безліч стройових, які відрізняються від початкової та відповідають умові постійності водотоннажності.

Для трансформації суднової поверхні у відповідності до різноманітних варіантів стройової запропоновано розподіляти площі шпангоутів по висоті способом афінного перетворення – *базова МСТ*, або за допомогою вдосконаленого способу, який представляє собою комбінацію афінного перетворення та зсуву, – *розширена МСТ*. На практиці трансформації реалізовані у вигляді 3D моделей корпусів за допомогою спеціально розроблених автором засобів графічної САПР T-FLEX.

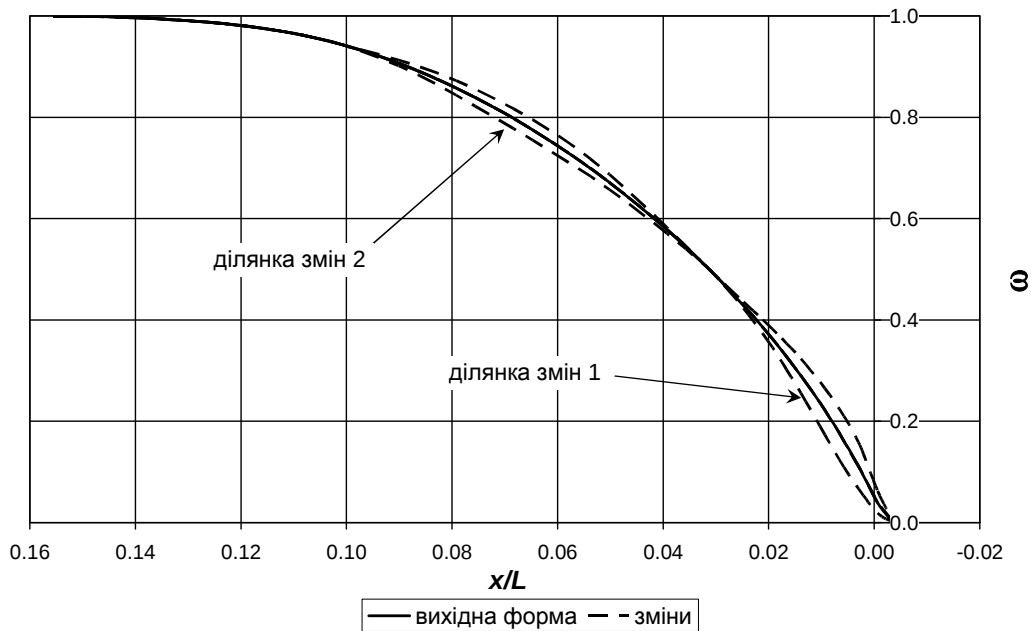


Рисунок 3 – Систематичні локальні зміни стройової по шпангоутах

Можливості МСТ дозволяють реалізувати оптимізаційний підхід, у якому параметри, що описують зміни геометрії, варіюються з деяким кроком. В результаті формується низка корпусів, відповідна щодо різноманітних комбінацій параметрів, які грають роль змінних, що оптимізуються. Геометрія корпусів використовується для отримання буксирувального опору за допомогою методики чисельного моделювання. Аналіз результатів дозволяє знайти у дослідженому діапазоні геометрію корпусу, яка відповідає мінімуму опору, а також іншим завданям умовам.

Вказаний підхід потребує вивчення великого числа варіантів, яке при простому переборі двох параметрів n і p (n – число ділянок, p – число варіантів стройової на кожній ділянці) досягає максимального значення p^n . Високі вимоги до обчислювальних ресурсів, які притаманні задачі чисельного моделювання обтікання корпусу у теперішній час, не дозволяють виконувати подібні обсяги розрахунків у прийнятні строки.

Для підготовки більш ефективного метода зниження опору був виконаний аналіз процесів в потоці, що обтікає корпус, які супроводжують зміни геометрії. Аналіз показав, що найбільший вплив надають процеси у системі корабельних хвиль, які підкоряються принципу інтерференції. На цій підставі була сформульована *гіпотеза* о незалежності впливу різних ділянок корпусу по довжині на буксирувальний опір, яка вперше встановлює кількісний взаємозв'язок між формою ділянок корпусу і його буксирувальним опором.

Гіпотеза використовується при обробці результатів моделювання, в якій сумарний ефект від трансформацій на повний опір прогнозується як суперпозиція ефектів усіх ділянок. Цім шляхом число варіантів, яке необхідно досліджувати, знижується до величини $(pn+1)$, включаючи перевірочний розрахунок корпусу із вдосконаленими обводами.

Результати розрахунків для кожної з ділянок представляються у вигляді неперервної залежності приросту опору від приросту об'єму $\delta R = f(\delta V)$. При двох мо-

дифікаціях стройової на ділянці ($p = 2$) реконструкція такої залежності виконується по трьох точках.

Поточні значення δV_i є параметрами, що варіюються. Оптимальна комбінація параметрів, яка відповідає вдосконаленим обводам, відповідає цільовій функції:

$$Z = \min \left(\sum_{i=1}^n \delta R_i(\delta V_i) \right). \quad (4)$$

Умова постійності водотоннажності відповідає функції обмеження:

$$\sum_{i=1}^n \delta V_i = 0. \quad (5)$$

Для пошуку оптимуму виконується апроксимація залежності $\sum \delta R_i(\delta V_i)$, що входить до (4), яка складена зі значень, що задовольняють умові (5). Аналіз апроксимуючої функції дозволяє знайти її мінімум. Методи аналізу залежать від складності функції, яка визначається, перш за все, кількістю ділянок n . При $n = 2$ потрібен аналіз функції однієї змінної, при $n = 3$ – двох і так далі.

Значення δV_i , які відповідають мінімуму опору, використовуються для побудови теоретичного корпусу із вдосконаленими обводами. За допомогою чисельного моделювання цього корпусу виконується перевірка й уточнення отриманих результатів. Вдосконалений корпус тоді можна приймати у якості початкового і повторювати наступні процедури до тих пір, поки буде існувати можливість зниження опору, тобто при умові:

$$\sum_{i=1}^n \delta R_i(\delta V_i) < 0. \quad (6)$$

Принципова блок-схема алгоритму використання метода оптимальної трансформації, або алгоритму вдосконалення форми (АВФ), представлена на рис. 4.

Метод оптимальної трансформації носової частини судна в межах роботи застосований до носових обводів двох еталонних суден, які суттєво відрізняються одне від одного за формою корпусу та швидкісним режимом (табл. 1).

Вдосконалення носових обводів **СЗП** було виконано за два кроки АВФ, на кожному з яких модифікації задавалися на двох ділянках стройової. Вибір числа ділянок, величин приростів δV та застосування базової МСТ були обумовлені особливостями геометрії корпусу, яка відрізняється коротким та різким носовим загостренням. У якості розрахункової була прийнята швидкість 13 вуз. ($Fr = 0.182$).

Відмінність у поздовжньому розподілі повноти вдосконалених та початкових обводів відповідає переносу об'єму носової частини ближче до форштевня за рахунок загострення ділянки, що лежить далі від нього. Зниження буксирувального опору корпусу склало 9.75 кН або 4.1%. Довжина трансформованої ділянки склала 14% довжини по ватерлінії.

Аналіз показав, що мінімум опору при постійній водотоннажності добре відповідає теоретичному критерію В.Г. Сізова – значення похідних опору по об'єму dR/dV в точці мінімуму приблизно рівні на обох ділянках. Оскільки в задачі розглянуті дві ділянки, пошук рішення виконувався за допомогою функції однієї змінної – рис. 5. Знак приростів δV відповідає модифікації першої ділянки (рахуючи від форштевня).

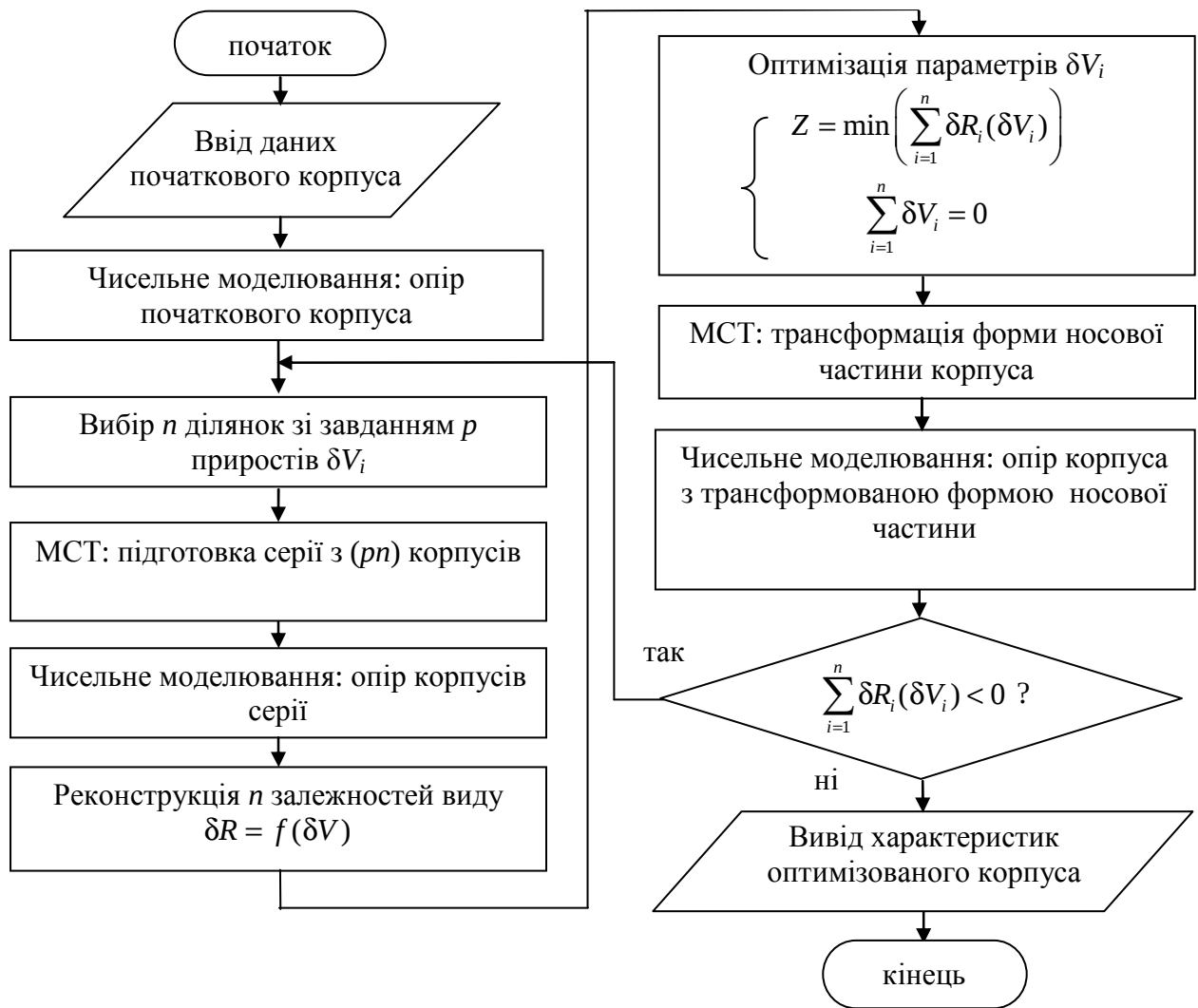


Рисунок 4 – Принципова блок-схема АВФ

Точність прогнозу, виконаного на базі гіпотези про незалежність впливу ділянок, склала 79%. Візуалізація хвильових систем показала, що при зниженні опору відбувається помітне ослаблення поперечних хвиль та посилення розбіжних за носовою частиною, де були змінені обводи, – рис. 6.

Виграш в опорі зберігається у деякому діапазоні ($Fr = 0.16 \div 0.18$) поблизу максимальної швидкості, на яку виконувалася оптимізація. При низьких Fr , де доля хвильового опору стає незначною, опір вдосконаленого корпусу вище, ніж початкового.

Результати оптимізації форми носової частини СЗП показали, що вигідно не тільки трансформувати її при постійній водотоннажності, але й наростити по-

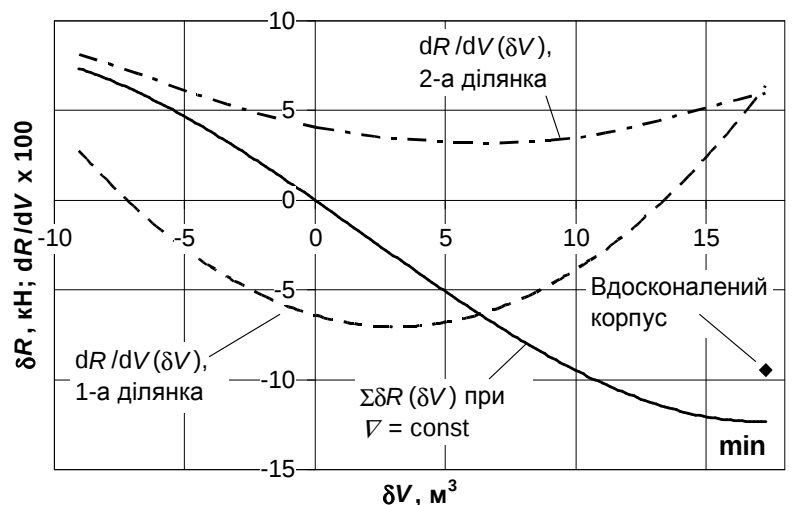


Рисунок 5 – Аналіз даних і пошук оптимуму для СЗП

вноту поблизу форштевня, наприклад, за рахунок бульбового доточування на початкові обводи. По даним чисельного моделювання, доточування, встановлене на ділянку початкового корпусу протяжністю 2% довжини по ватерлінії, забезпечує зниження опору на 5.6%. Таким чином, встановлення бульбового доточування дозволяє підвищити ефективність існуючих суден.

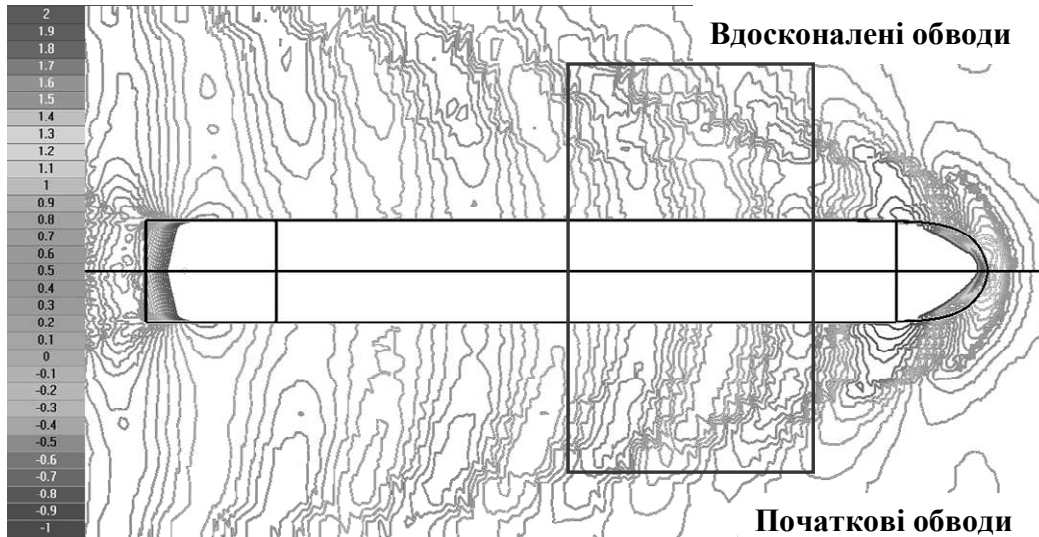


Рисунок 6 – Ізолінії рівня вільної поверхні СЗП при $Fr = 0.182$

При оптимізації носових обводів морського судна помірної повноти і швидкості **KCS** був передбачений один крок АВФ, що згідно досвіду дослідження СЗП достатньо ефективно при мінімальному обсязі чисельних розрахунків. На трьох ділянках носової частини були завдані по дві модифікації стройової, що дало шість нових варіантів корпусу. З урахуванням призначення судна (контейнеровоз) трансформації виконувалися при збереженні форми палуби за допомогою розширеної МСТ – рис. 7. У якості розрахункової була прийнята швидкість 26 вуз. ($Fr = 0.282$).

Оскільки до задачі були включені три ділянки, пошук рішення виконувався за допомогою функції двох змінних – рис. 8, роль яких відіграли прирости δV на першій і другій ділянках (рахуючи від форштевня). Приріст об'єму на третій ділянці при постійній водотоннажності зводиться до залежної змінної.

Мінімум опору отриманий при повному переносі об'єму з другої ділянки на першу. Третя ділянка в такої комбінації не бере участі, що пояснюється її більш слабким впливом на опір. Оцінка виграшу склала 319.8 кН або 12.1%. Чисельний розрахунок обтікання оптимізованого корпусу показав зниження опору на 243.4 кН або на 8.9% при довжині трансформованої ділянки 26% довжини по ватерлінії.

Точність прогнозу на базі гіпотези про незалежність впливу ділянок склала 73%. Візуалізація хвильових систем показала, що зниження опору супроводжується помітним ослабленням поперечних хвиль та підсиленням розбіжних – рис. 9.

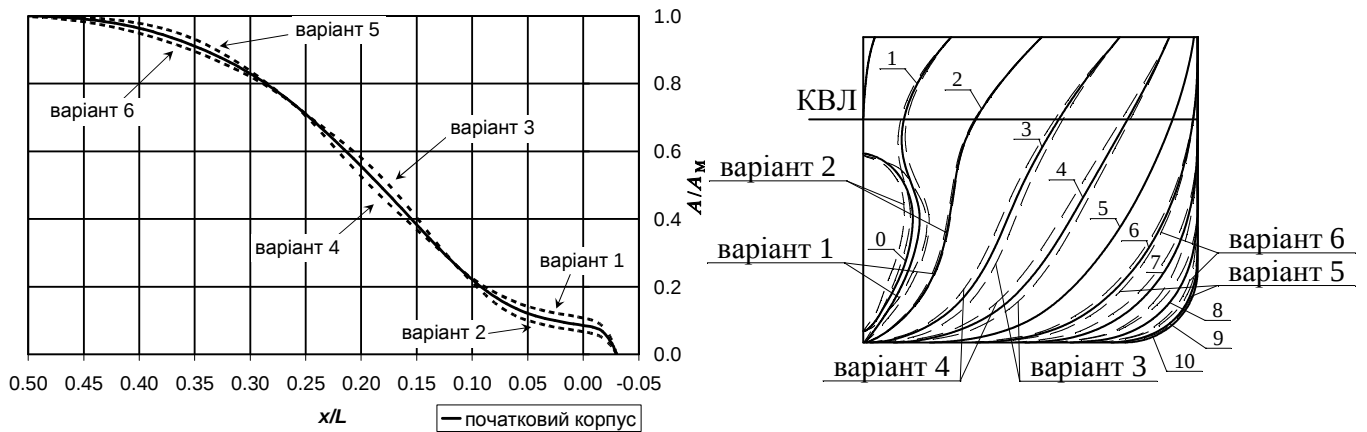


Рисунок 7 – Трансформації носової частини KCS на стройової по шпангоутах та проєкції «корпус»

Четвертий розділ присвячений експериментальному дослідженню, в якому перевірені адекватність та ефективність метода оптимальної трансформації носової частини на прикладі СЗП класу «Волго-Дон макс», до якого за характеристиками форми й швидкісним режимом відноситься один з об'єктів, розглянутих в третьому розділі.

За допомогою експерименту досліджені три корпусу з різними варіантами носових обводів: 1) початкові обводи; 2) носові обводи з перерозподілом водотоннажності, отримані у третьому розділі; 3) початкові обводи з додаванням бульбового доточування. Початкові носові обводи мали деякі відмінності від об'єкту третього розділу.

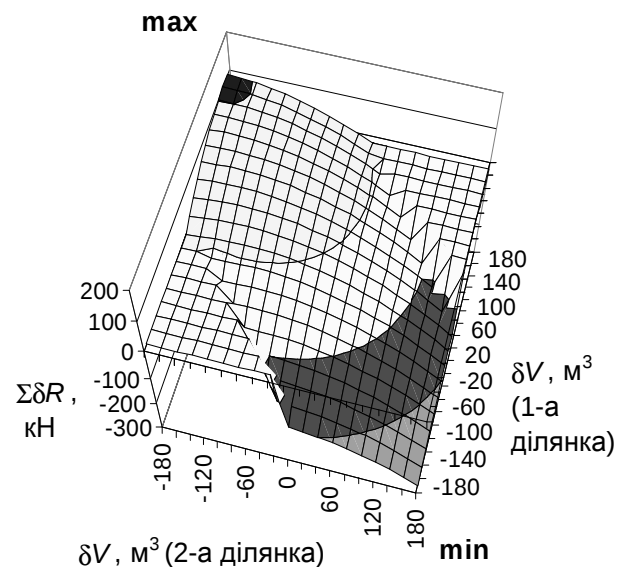


Рисунок 8 – Аналіз даних і пошук оптимуму для KCS

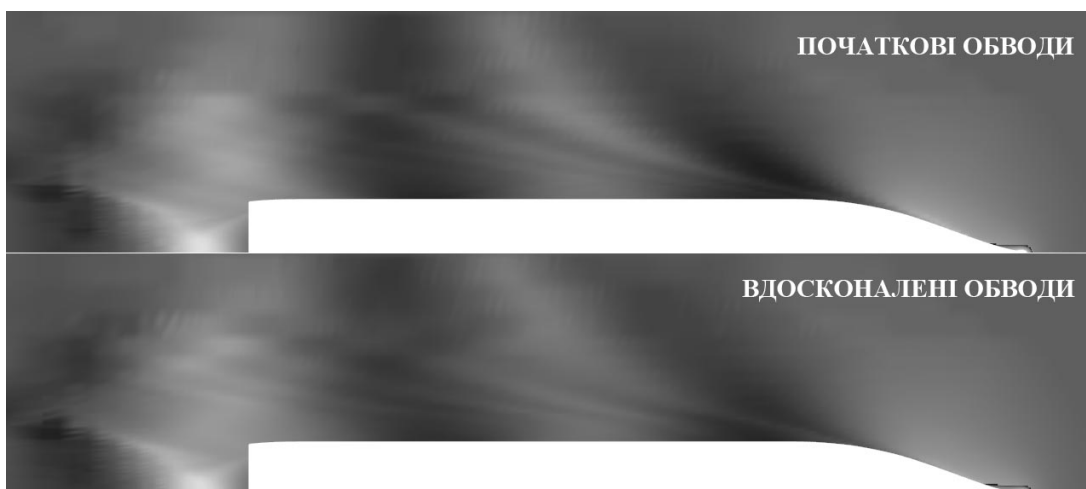


Рисунок 9 – Порівняння перепадів рівня вільної поверхні для KCS з різними обводами носової частини при $Fr = 0.282$

Буксирувальні випробування трьох моделей були виконані влітку 2014 р. в опитовому басейні ОНМУ під керівництвом А.В. Демидюка за стандартною методикою. Моделі були виготовлені в масштабі 1:50 з пінопласту і покриті сплавом парафіну з воском. Для забезпечення турбулентного режиму течії в ПШ в носових частинах моделей встановлювалися дрові турбулізатори.

В експериментах використовувалася модернізована система вимірювання швидкості руху моделі басейну ОНМУ, яка передбачає запис та обробку даних в цифровому форматі. Для вибору розгінних вантажів, що забезпечують рівномірний рух моделі, виконувалося декілька пробігів з одним вантажем що буксирує та кількома розгінними.

В межах дослідження була виконана оцінка похибки вимірювання швидкості моделей, яка могла позначитись на співставленні величин буксирувального опору. Оцінка була виконана одним з рекомендованих Міжнародною конференцією опитових басейнів (МКОБ) методів на базі чотирнадцяти пробігів, що були повторені в однакових умовах. Величина відносної невизначеності швидкості руху моделі склала $\pm 0.46\%$, що відповідає відносній невизначеності для буксирувального опору $\pm 0.92\%$.

Згідно отриманим результатам, буксирувальний опір моделей з перерозподілом водотоннажності та бульбовим доточуванням нижчий, ніж моделі з початковими обводами. Зниження опору корпусу з перерозподілом водотоннажності в носовій частині при $Fr = 0.183$ (13 вузлів для натури) склало в модельному масштабі 10.1%, у натурному 15.6%. Опір корпусу з бульбовим доточуванням знизився на 4.4% в модельному масштабі, на 7.1% у натурному. Результати випробувань в модельному масштабі представлені на рис. 10. Різниця між величинами опору моделей значно вище оцінки невизначеності вимірів $\pm 0.92\%$, яка позначена на діаграмі рис. 10 відповідним маркером у значення моделі 2.

Результати експерименту показали, що найменший опір має корпус з перерозподілом водотоннажності в носовій частині (модель 2), в той час як корпус з бульбовим доточуванням (модель 3) забезпечує менший вигреш. При вдосконаленні обводів була зафіксована зворотна ситуація. Значно більшою виявилася і різниця в опорі моделей з різними носовими обводами.

Аналіз причин вказаних невідповідностей показав, що початкові носові обводи в експериментальному дослідженні помітно відрізняються поздовжнім розподілом водотоннажності від початкових обводів, які були оптимізовані із застосуванням чисельних методів, причому в сторону, протилежну результатам оптимізації – рис. 11. Цім пояснюються великі відмінності в опорі, зафіксовані в експерименті, а також різна відносна ефективність бульбового доточування. Бульбове доточування дозволяє перерозподілити водотоннажність в носовій частині лише частково, і забезпечує великий вигреш в тих випадках, коли різниця між початковим та оптимальним поздовжнім розподілом повноти відносно невелика.

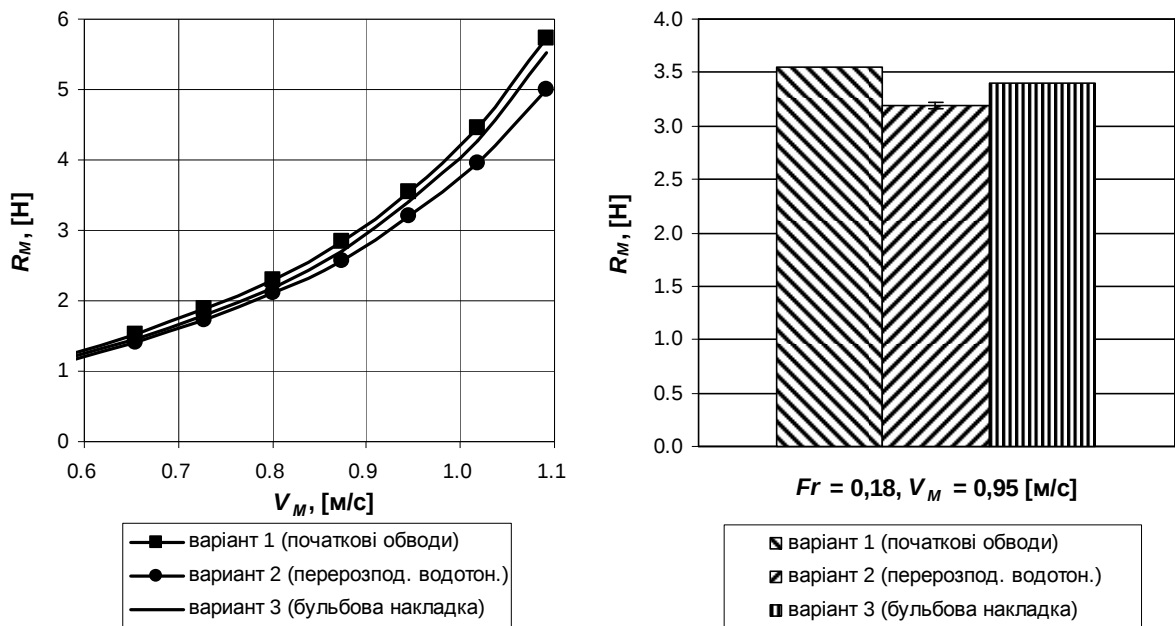


Рисунок 10 – Результати модельних випробувань в модельному масштабі

В цілому результати експериментального дослідження з достатньою надійністю показали, що обводи носової частини, які були отримані за допомогою запропонованого в роботі метода, забезпечують значне зниження буксирувального опору СЗП класу «Волго-Дон макс».

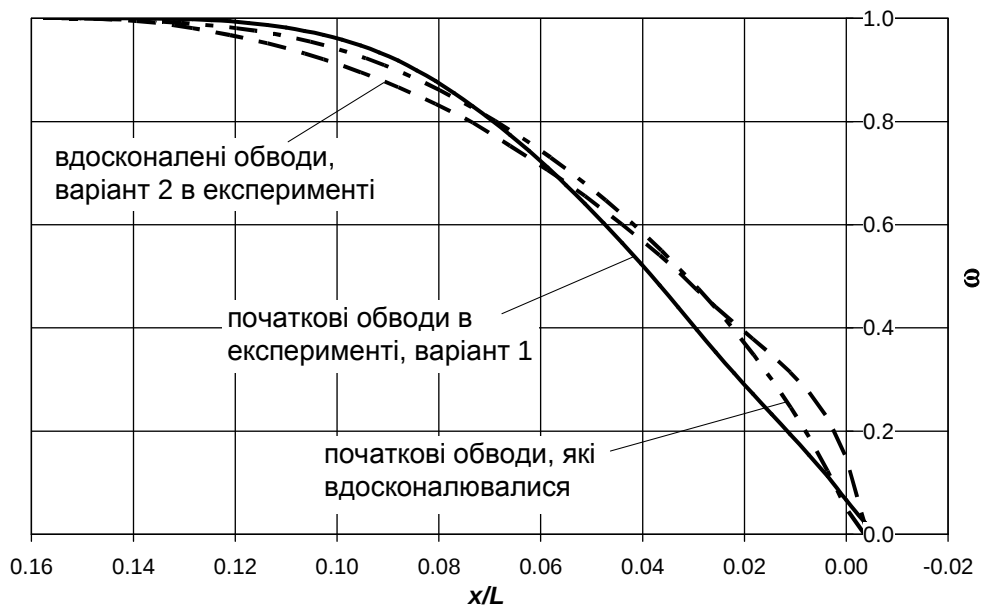


Рисунок 11 – Порівняння безрозмірних стрійових по шпангоутах об'єктів

У **п'ятому розділі** виконана оцінка достовірності результатів роботи, проаналізовані їхні основні теоретичні і практичні аспекти, запропоновані перспективні напрямки подальших досліджень.

Велике значення для достовірності результатів має досягнутий в роботі передовий рівень точності чисельного моделювання. Точність забезпечена застосуванням відносно детальних розрахункових сіток з числом розрахункових елементів 1 – 4 млн., які поки ще рідко використовуються в розрахунках розглянутого типу. Виконання достатньо великого обсягу розрахунків з такими параметрами сіток стало

можливим за рахунок паралельних обчислень на суперкомп'ютерах.

В роботі запропонований комплексний метод оптимальної трансформації носової частини судна, основні компоненти якого МСТ і метод зниження опору є науковими результатами роботи. В МСТ вперше запропоновано для відображення розподілу водотоннажності у загостреннях незалежно від загальної повноти використовувати функцію $K_{PE}(x)$, яка задається виразом (3). Формулювання метода зниження опору відповідає сучасному підходу до оптимізаційних задач, а його новизна полягає у введенні гіпотези про незалежність впливу різних ділянок корпусу по довжині на опір. Отримані в роботі результати дозволяють вважати гіпотезу правдоподібною.

Результати оптимізації форми носових частин двох об'єктів за допомогою метода оптимальної трансформації представляють як практичний, так і теоретичний інтерес. Співставлення залежностей $K_{PE}(x)$ носових частин об'єктів показало, що після оптимізації вони набули подібного характеру, незважаючи на вельми велику різницю у формі обводів та швидкісному режимі. Співставлення ж залежностей $K_{PE}(x)$ з візуалізацією хвильових систем об'єктів дозволило зробити припущення про те, що відмінності, пов'язані з швидкісним режимом Fr , призводять в основному до стиснення чи розтягування залежностей уздовж поздовжньої вісі. Вибір у якості поздовжньої координати довжини поперечної хвилі λ_w дозволив мінімізувати ці відмінності – рис. 12. Відмінності ж у формі обводів можна співвіднести з величиною коефіцієнта K_{PE} всього носового загострення, яка характеризує її відносну повноту. На цій підставі у вигляді гіпотези було сформульовано наступне **наукове положення**:

Вплив форми носової частини на хвильовий опір судна визначається залежністю локального коефіцієнта поздовжньої повноти K_{PE} від поздовжньої координати x , віднесеної до довжини поперечної хвилі λ_w .

З формулювання випливає висновок про те, що при будь-яких Fr та K_{PE} існує форма кривої $K_{PE}(x)$, яка відповідає мініимальному опору носової частини. Судячи по дослідженим об'єктам, така форма має екстремум поблизу форштевня, що є характерним, наприклад, для бульбообразних обводів. Наукове положення розвиває й деталізує висновок про роль коефіцієнта поздовжньої повноти як основного критерію хвильового опору (G. Weinblum).

З практичної точки зору результати оптимізації носових частин об'єктів показали, що вибрані у відповідності до звичайних рекомендацій та інженерного досвіду обводи можуть мати значні резерви зниження опору за рахунок перепроєктування або модернізації (встановлення бульбового доточування).

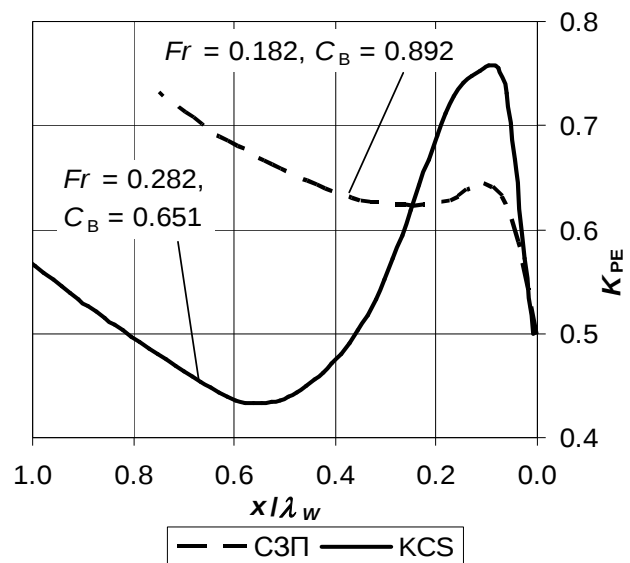


Рисунок 12 – Залежності $K_{PE}(x/\lambda_w)$ оптимізованих носових частин об'єктів

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна задача підвищення техніко-експлуатаційних та економічних показників суден шляхом зниження опору руху за рахунок оптимальної трансформації носової частини корпусу.

Основні результати дисертаційної роботи:

1. **Вдосконалено** методику чисельного моделювання процесу обтікання суднових корпусів шляхом включення до неї рекомендацій щодо призначення поздовжніх розмірів розрахункової області для судна із заданими головними розмірами, а також по формуванню областей концентрації елементів прямокутної розрахункової сітки, яка розділяє потік, що обтікає судновий корпус. Вдосконалення методики, що виконані на основі систематизації параметрів і результатів проведеного моделювання обтікання корпусів 47 суден різноманітної форми і швидкісних режимів руху, забезпечили виконання розрахунків буксирувального опору еталонних суден з точністю, яка відповідає рівню сучасних світових стандартів у порівнянні з надійними даними експериментальних досліджень.
2. **Вперше** запропоновано математичну модель систематичних трансформацій форми корпусу, основоположним принципом якої стало використання локального коефіцієнта поздовжньої повноти в якості характеристики поздовжнього розподілу водотоннажності. Модель здійснює варіювання величини та поздовжнього розподілу водотоннажності носової частини корпусу шляхом змінення обмежених ділянок її поверхні, що дозволяє досліджувати тонкі ефекти впливу відносно малих трансформацій суднової поверхні на буксирувальний опір, при яких змінення водотоннажності складають порядку десятих часток відсотку.
3. На базі запропонованої моделі систематичних трансформацій розроблено метод зниження опору руху судна, в основу якого **вперше** введене припущення про незалежність впливу форми різних ділянок носової частини корпусу, які виділені по довжині судна, на його буксирувальний опір. Метод забезпечує надійну оцінку впливу трансформацій суднової поверхні на буксирувальний опір та дозволяє визначати комбінацію трансформацій, яка відповідає оптимальній формі носової частини за критерієм мінімального питомого опору корпусу судна.
4. **Набуло подальшого розвитку** дослідження задачі впливу форми суднового корпусу на його буксирувальний опір на основі аналізу результатів застосування метода до двох різних за характером обводів і швидкісним режимом суден, які були підтверджені для одного з них спеціальним експериментальним дослідженням в опитовому басейні. Згідно з даними виконаних досліджень, поздовжній перерозподіл водотоннажності в носовій частині суден є головним фактором у зниженні їх буксирувального опору.
5. В результаті узагальнюючого аналізу вдосконалених за допомогою метода носових обводів суден **вперше** встановлено, що вплив форми носової частини на хвильовий опір судна визначається залежністю локального коефіцієнта поздовжньої повноти від поздовжньої координати, віднесеної до довжини попе-

речної хвилі. Використання вказаної залежності сприяє спрощенню і формалізації задачі пошуку форми носової частини, яка забезпечує мінімальний повний опір судна.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, що відображають основні наукові результати дисертації:

1. Вишне夫斯基 Л.И., Егоров Г.В., Станков Б.Н., Печенюк А.В. Проектирование пропульсивного комплекса судна ограниченного района плавания на базе современных методов вычислительной гидродинамики [Текст] / Л.И. Вишне夫斯基, Г.В. Егоров, Б.Н. Станков, А.В. Печенюк // Судостроение. – 2006. – № 2. – С. 27–31.
2. Давыдов И.Ф., Демидюк А.В., Печенюк А.В. Экспериментальное исследование усовершенствованных обводов тихоходного судна большой полноты [Текст] / И.Ф. Давыдов, А.В. Демидюк, А.В. Печенюк // Shipbuilding and Marine Infrastructure, 2015. – № 2 (4). – С. 144–150.
3. Егоров Г.В., Станков Б.Н., Печенюк А.В. Опыт использования CFD-моделирования при проектировании пропульсивного комплекса судна [Текст] / Г.В. Егоров, Б.Н. Станков, А.В. Печенюк // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – № 2. – С. 3–11.
4. Егоров Г.В., Печенюк А.В. Применение методов вычислительной гидромеханики при проектировании корпуса контейнеровоза / Г.В. Егоров, А.В. Печенюк // Проблемы техники. – 2008. – № 3. – С. 3–15.
5. Печенюк А.В. Метод оптимальной трансформации носовой части судна в задаче снижения полного сопротивления его движению на тихой воде [Текст] / А.В. Печенюк // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2016. – № 2. – С. 40–45
6. Станков Б.Н., Печенюк А.В. Оптимизация судовых обводов: новые возможности [Текст] / А.В. Печенюк, Б.Н. Станков // Судостроение. – 2015. – № 3. – С. 15–19.
7. Aksenov A.A., Pechenyuk A.V., Vučinić D. Ship hull form design and optimization based on CFD [Текст] / A.A. Aksenov, A.V. Pechenyuk, D. Vučinić // Proc. of 16th Int. Congress of IMAM (IMAM-2015). – Pula, Croatia, 21–24 September, 2015. – P. 215–223.

Праці апробаційного характеру:

8. Давыдов И.Ф., Демидюк А.В., Печенюк А.В. Экспериментальное исследование улучшенных обводов для тихоходного судна большой полноты [Текст] / И.Ф. Давыдов, А.В. Демидюк, А.В. Печенюк // Программа и материалы III междун. науч.-технич. конф. «Экспериментальные методы теории корабля». – Николаев: НУК, 2014. – С. 11–15.
9. Егоров Г.В., Тонюк В.И., Станков Б.Н., Печенюк А.В. Исследования ходкости судна смешанного река-море плавания с предельно высоким коэффициентом общей полноты [Текст] / Г.В. Егоров, В.И. Тонюк, Б.Н. Станков, А.В. Печенюк // Материалы III междун. научно-техн. конф. «Инновации в судостроении и океанотехнике» – Николаев: НУК, 2012. – С. 92–93.

- 10.Печенюк А.В. Модель изменений судовой поверхности [Текст] / А.В. Печенюк // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК. 2012. – С. 179–181.
 - 11.Печенюк А.В. Оптимизация судовых обводов для снижения сопротивления движению [Текст] / А.В. Печенюк // Инженерные системы – 2015: Труды Международного форума / Инжиниринговая компания «ТЕСИС». – М.: МАКС Пресс, 2015. – С. 60–69.
 - 12.Печенюк А.В. Совершенствование обводов судна KCS умеренной полноты и быстроходности численными методами [Текст] / А.В. Печенюк // Тез. докл. всеукр. науч.-технич. конф. «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Николаев: НУК, 2015. – С. 121–123.
 - 13.Печенюк А.В. Улучшение формы корпуса тихоходного судна с большой полнотой обводов численными методами [Электронный ресурс] / А.В. Печенюк // Тез. докл. всеукр. науч.-технич. конф. «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Николаев: НУК, 2014. – Режим доступа: <http://conference.nuos.edu.ua> (дата обращения 16.12.2014).
 - 14.Печенюк А.В. Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судового корпуса [Текст] / А.В. Печенюк // Инженерные системы – 2014: Труды Международного форума / Инжиниринговая компания «ТЕСИС». – М.: МАКС Пресс, 2014. – С. 43–47.
 - 15.Печенюк А.В., Сизов В.Г. Методы улучшения судовых обводов [Текст] / А.В. Печенюк, В.Г. Сизов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК. 2012. – С. 176–178.
 - 16.CAE Simulation of Water Flow Around a Ship Hull [Текст] / A. Jackson, J. Lorenzana, A. Pechenyuk & A. Aksenov // The Uber Cloud HPC Experiment: Compendium of Case Studies. – 2013.
 - 17.Design of Hull Lines Using Modern CFD Software Package FlowVision [Текст] / A.A. Aksenov, S.V. Zhluktov, A.S. Petrov, A.V. Pechenyuk, B.N. Stankov, Yu. Chung Cheng // Proc. of 3rd National CFD Conf. of Shipbuilding and Marine Engineering. – Dalian, China, 25–26 July, 2014. – P. 262–267.
- Праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:**
- 18.Печенюк А.В. О повышении эффективности пропульсивного комплекса путем совершенствования формы носовой оконечности судна [Текст] / А.В. Печенюк // Судовые энергетические установки. – 2014. – № 34. – С. 87-97.
 - 19.Печенюк А.В. Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судна [Текст] / А.В. Печенюк // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6. – С. 889–899.
 - 20.Программный комплекс FlowVision как современный инструмент проектирования судовых обводов [Текст] / А.А. Аксенов, С.В. Жлуктов, А.С. Петров, А.В. Печенюк, Б.Н. Станков // Судостроение. – 2013. – № 4. – С. 27–31.

21. Станков Б.Н., Печенюк А.В. Цифровые технологии в проектировании судов: использование комплекса FlowVision [Текст] / А.В. Печенюк, Б.Н. Станков // САПР и графика. – 2015. – № 3. – С. 78–82.
22. Virtual Basin for Simulating Ship Sailing Qualities on HPC Resources [Текст] / A. Aksenov, A. Pechenyuk, A. Poyda, E. Ryabinkin, I. Tkachenko, V. Ilyin, V. Velikhov // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 66. – P. 132–139.

АНОТАЦІЯ

Печенюк А.В. Метод оптимальної трансформації носової частини судна в задачі зниження опору його руху. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 - конструювання та будівництва суден. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2017.

Метою дисертаційної роботи є розробка метода визначення оптимальної трансформації носової частини водотоннажних суден з метою зниження опору їх руху.

Розроблений комплексний метод оптимальної трансформації носової частини судна, що включає методику чисельного моделювання, модель систематичних трансформацій корпусу та метод зниження опору.

Застосування метода оптимальної трансформації до носових частин двох суден-об'єктів дозволило суттєво знизити їх буксирувальний опір. Результати по одному з об'єктів були підтверджені за допомогою експериментів в опитовому басейні.

Сформульоване нове наукове положення, згідно до якого вплив форми носової частини на хвильовий опір судна визначається залежністю локального коефіцієнта повздовжньої повноти від повздовжньої координати, що віднесена до довжини поперечної хвилі.

Ключові слова: вдосконалення обводів, оптимізація форми корпусу, опір водотоннажного судна, чисельне моделювання обтікання корпусу, зниження буксирувального опору.

АННОТАЦИЯ

Печенюк А.В. Метод оптимальной трансформации носовой части судна в задаче снижения сопротивления его движению. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 – конструирование и постройка судов. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2017.

Целью диссертационной работы является разработка метода определения оптимальной трансформации носовой части водоизмещающих судов с целью снижения сопротивления их движению.

В диссертации разработана методика численного моделирования обтекания корпуса, позволяющая определять буксировочное сопротивление с точностью, достаточной для адекватной оценки влияния локальных трансформаций корпуса.

Разработан комплексный метод оптимальной трансформации носовой части судна, который помимо методики численного моделирования включает модель систематических трансформаций корпуса и метод снижения сопротивления. Модель систематических трансформаций позволяет варьировать продольное распределение полноты при отсутствии изменений в других характеристиках формы корпуса или их контроле. Метод снижения сопротивления позволяет оптимизировать продольное распределение водоизмещения носовой части судового корпуса на основе сравнительно небольших объемов численных расчетов, что обеспечено введением новой гипотезы о независимом влиянии разных участков корпуса по длине на сопротивление в принятых условиях постановки.

Применение метода оптимальной трансформации носовой части судна к носовым частям двух судов-объектов, которые существенно отличаются по характеристикам формы и скоростному режиму, доказало его работоспособность и позволило значительно снизить буксировочное сопротивление. Результаты по одному из объектов были подтверждены с помощью специально поставленных экспериментов в опытовом бассейне.

С помощью всестороннего анализа результатов по судам-объектам в работе сформулировано новое научное положение: влияние формы носовой части на волновое сопротивление судна определяется зависимостью локального коэффициента продольной полноты от продольной координаты, отнесенной к длине поперечной волны.

Ключевые слова: совершенствование обводов, оптимизация формы корпуса, сопротивление водоизмещающего судна, численное моделирование обтекания корпуса, снижение буксировочного сопротивления.

SUMMARY

Pechenyuk A.V. The method of optimum foreship transformation in the problem of decreasing ship resistance to movement. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.08.03 – design and construction of ships. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolayev, 2017.

The purpose of the dissertation study is development of the method of optimum foreship transformation of the displacement ships for decreasing their resistance to movement.

The comprehensive method of optimum foreship transformation has been developed. It includes the methodic of numerical simulation, the model of systematic hull transformations and the method of resistance decreasing.

The method of optimum foreship transformation was applied to the researched ships and showed significant decrease in towing resistance. The results concerning one of the two ships were validated with the help of experimental research in ship model basin.

The new scientific principle was formulated, wherein the effect of a foreship form on wave resistance is determined by dependence of the local prismatic coefficient versus longitudinal coordinate in relation to the length of transverse wave.

Key words: hull lines improvement, hull form optimization, displacement ship resistance, hull flow simulation, decrease of towing resistance

Заказано. Подписано к печати __. __.2017.
Формат А5 (148×210 мм). Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Гарнитура "Таймс". Тираж ____ экз. Заказ № ____

Печать: ,
;
тел.,
E-mail: