

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Боднарчук Юлія Сергіївна

УДК 629.5.01

**ЗМЕНШЕННЯ ОПОРУ РУХУ СУДЕН ЗА ДОПОМОГОЮ ВИКОРИСТАННЯ
ВИЇМОК ТА ПОВІТРЯНОГО ЗМАЩЕННЯ**

Спеціальність 05.08.03 – Конструювання та будування суден

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент

Король Юрій Михайлович,

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, керівник навчально-
наукового центру гідромеханіки

Офіційні опоненти:

Захист відбудеться "___" _____ 2021 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради _____ Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, проспект Героїв України, 9, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, проспект Героїв України, 9.

Автореферат розісланий "___" _____ 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор

В. В. Зайцев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. У сучасному світі, в період економічної та екологічної кризи, одним з головних напрямків вдосконалення суден є зменшення витрат палива при перевезенні різних вантажів. Безперервне зростання цін на паливо може поставити під питання доцільність використання суден традиційної форми. Тому дослідження, розвиток та вдосконалення засобів зменшення опору води руху суден є актуальними.

Оптимізація методів зниження опору води являється актуальною задачею гідродинаміки судна. Проте питання проектування та вдосконалення методів в сучасній практиці все ще не повністю вивчено. Воно вирішується за допомогою наукових знань та інженерного досвіду. Практичне використання експериментального та чисельного моделювання в задачах вивчення методів зниження опору судна зазвичай зводиться до методу спроб та помилок. Також з'являється проблема при моделюванні в науково-дослідницькому басейні деяких методів зниження опору, які повинні здійснюватися при рівних з натурними не лише числа Фруда, а й числа Рейнольдса, тобто при фізично нездійсненних умовах. Тому єдиним джерелом отримання наукових результатів дослідження є *CFD* моделювання. Проте, верифікація параметрів *CFD* моделювання здійснюється по результатах фізичного експерименту, який не можливо здійснити. Тому і виникає дуже актуальна проблема обґрунтування можливості розв'язування задач аналізу.

Також слід відзначити, що методи, які зменшують товщину прикордонного шару та ширину гідродинамічного сліду, так само зменшують і гідроакустичний шум від турбулентних пульсацій, і це є дуже важливим фактором для суден спеціального призначення, що також є актуальним.

Актуальність теми обумовлюється винятковою важливістю комплексного дослідження з використанням *CFD* технологій ефективності методів зниження опору різних типів суден за допомогою встановлення на їх поверхні спеціальних конструктивних елементів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до положень «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. №463/2008), транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р). Дисертаційне дослідження пов'язане з виконанням прикладних держбюджетних науково-дослідницьких робіт «Удосконалення ефективності та надійності малих та швидкісних металевих суден» (здобувачу належить участь у проведенні чисельних розрахунків, аналіз та співставлення отриманих здобувачем розрахунків), прийнятих Міністерством освіти та науки, молоді та спорту України 25.09.2013 р., номер державної реєстрації №0113U000244, номер теми 1897, «Розробка методології підвищення ефективності та безпеки річкової транспортної системи України» (здобувачу належить участь у проведенні чисельних розрахунків, аналіз та співставлення отриманих здобувачем розрахунків), прийнятої Міністерством освіти та науки України 25.10.2017 р., номер державної реєстрації №0117U000347, номер теми 2085.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розробка та вдосконалення засобів, що забезпечують ефективне зниження опору руху суден.

Для досягнення мети роботи передбачається вирішення наступних задач:

1. Проведення параметричного аналізу гідродинамічних явищ при встановленні виїмок на поверхнях канонічних тіл (шар, циліндр та циліндричне тіло) з метою зниження їх опору.
2. За допомогою методів обчислювальної гідродинаміки провести аналіз ефективності встановлення виїмок на поверхнях суховантажного судна, танкера, швидкісного судна та підводних об'єктів з метою покращення умов обтікання та зниження їх опору.
3. Експериментальне визначення опору моделей танкера та підводного об'єкту сигароподібної форми з встановленими виїмками в науково-дослідницькому басейні з метою верифікації результатів *CFD* моделювання.
4. Дослідження можливості використання повітряного змащення на швидкісних суднах без використання механізмів примусового нагнітання повітря з метою удосконалення даного методу.

Об'єкт дослідження – процес створення та вдосконалення засобів зменшення опору суден та об'єктів океанотехніки шляхом встановлення виїмок та використання повітряного змащення.

Предмет дослідження – закономірності впливу параметрів форми, місця розташування, кількості виїмок та умов подачі повітряного змащення, які забезпечують ефективне зниження опору руху суден.

Методи дослідження. Основним методом дослідження обрано *CFD* моделювання руху натурних об'єктів в рідині, яке містить метод кінцевих об'ємів для чисельного розв'язування рівнянь RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equations). Для отримання надійних результатів виникає необхідність додатково визначати кількість клітинок розрахункової сітки, ступень адаптації сітки, крок по часу, модель турбулентності та забезпечувати ітераційну збіжність, виконувати параметричний аналіз розрахунків. Таке моделювання реалізоване в сучасних *CFD* пакетах, таких як Flow Vision (компанія TESIS) та Flow Simulation (США, Франція, Канада). Також використовувалися метод моделювання в дослідницькому басейні та порівняння отриманих результатів в *CFD* пакетах, метод верифікації, методи загально логічного аналізу та порівняння.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці та вдосконаленні засобів, враховуючи вплив параметрів форми, місця розташування, кількості виїмок та умов подачі повітряного змащення, що забезпечують ефективне зниження опору руху суден і є актуальним завданням. В результаті досліджень отримано наступні наукові результати:

Вперше:

- доведена можливість зниження гідродинамічного опору канонічних тіл шляхом розміщення на їх поверхні спеціальних поглиблень – виїмок, яка отримана за допомогою сучасних методів обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу впливу розмірів, форми, місця розташування, кількості і швидкості руху та

дозволяє знизити опір цих тіл при певних умовах (для розглянутих форм канонічних тіл найвища ефективність при числах Рейнольдса $2 \cdot 10^7 \div 3 \cdot 10^7$) від 5 до 20%;

- науково обґрунтована та доведена можливість зменшення опору різних типів суден шляхом розміщення специфічних виїмок на їх поверхнях за допомогою сучасних методів обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу впливу розмірів, форми, місця розташування, кількості і швидкості руху, що дозволяє знизити опір від 2 до 20% для $Re=1,3 \cdot 10^8 \div 5 \cdot 10^8$ і якщо виїмки розташовані на відстані в 40% довжини судна починаючи з кормового перпендикуляру;

- за ініціативою і рекомендаціями автора в науково-дослідних басейнах було виконано експериментальні дослідження впливу виїмок на опір руху моделей надводного судна і підводного об'єкта та отримано наступні результати: помітного ефекту зниження опору руху моделей з масштабованими виїмками не виявлено, що свідчить про необхідність проведення параметричного аналізу впливу розмірів, форми, місця розташування і кількості виїмок саме для модельних чисел Рейнольдса; експериментальні випробування варіантів виїмок дозволили визначити їх характеристики, які сприяли зниженню опору моделі надводного судна на 3% та підводного об'єкту на 2%; шляхом порівняння отриманих експериментальних результатів з чисельними розрахунковими методами і засобами обчислювальної гідродинаміки доведена їх добра збіжність.

Набула подальшого розвитку:

- технологія використання повітряного змащення для зниження опору руху швидкісних суден без застосування спеціальних приладів нагнітання повітря, яке подається лише за рахунок зниження тиску в зареданному просторі. Методами обчислювальної гідродинаміки доведено, що за рахунок природної подачі повітря опір судна знижується на 10-20% в залежності від швидкості руху при $Re = 1 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^8$.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- 1) Розроблено методику визначення можливості зниження опору руху об'єктів океанотехніки з встановленими місцевими особливостями, в основу якої покладені методи обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу;

- 2) за рахунок застосування запропонованих засобів, опір надводних суден при встановленні на поверхні днища профільованих виїмок може бути знижено до 20%, а підводних об'єктів при встановленні виїмок у вигляді кілець – до 6%;

- 3) доведено, що визначення параметрів виїмок для кожного судна необхідно проводити окремо, а найбільш ефективним засобом є *CFD* моделювання на натурних об'єктах;

- 4) доведено, що використання засобів *CFD* моделювання в практиці наукових досліджень і проектування об'єктів океанотехніки має суттєву перевагу перед фізичними експериментами за рахунок більш високої надійності, економічності та інформативності, окрім того дає можливість проводити дослідження на натурних об'єктах;

5) удосконалено засіб повітряного змащення підводної частини корпусу швидкохідних суден шляхом природної подачі повітря у зону зниженого тиску з ефектом зменшення опору руху до 20%;

6) запропоновані засоби зниження опору можуть бути використані під час проектування нових або модернізації існуючих суден;

7) розроблена загальна схема алгоритму вибору засобів зниження опору руху під час проектування суден, які дають змогу зменшенню витрат палива і вартості перевезеного вантажу (пасажирів) та терміну окупності витрат при впровадженні цих засобів на новому або вже введеному в експлуатацію судні.

Особиста участь здобувача. Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням. Усі теоретичні та практичні результати CFD моделювання дисертації були отримані здобувачем особисто. Співавторами наукових праць є науковий керівник та науковці, спільно з якими проведені дослідження. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок.

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

V науково-практична конференція всеукраїнського конкурсу наукових робіт (м. Миколаїв, 2013р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 09.10.2013р., 09.10.2014р., 09.10.2018р.); Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (м. Миколаїв, 23.05.2013р., 23.05.2014р., 23.05.2018р., 23.05.2019р.); IV International Scientific and Practical Conference «Perspectives of world science and education» (Osaka, 2019р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 6 наукових праць, які відображають основні наукові результати та опубліковані в провідних виданнях за спеціальністю 05.08.03 (одна з них входить до науко-метричної бази SCOPUS, що рекомендована переліком ДАК МОН України), з яких 3 роботи - без співавторів. Крім того, здобувачем разом з науковим керівником отримано патент на корисну модель №134146 «Спосіб регулювання розподілу тиску на змоченій поверхні судна», який зареєстрований у Державному реєстрі патентів України 10.05.2019 р. Результати дисертаційної роботи були презентовані й отримали позитивну оцінку з 11-ю доповідями на науково-технічних конференціях. Результати дисертаційної роботи опубліковано в Україні, Угорщині та Японії.

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних літературних джерел і додатків. Дисертація містить 152 сторінок основного матеріалу, 158 рисунків, 19 таблиць, з цього 133 сторінок основного тексту, 10 сторінок списку використаних джерел (100 найменувань) та 19 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* роботи наведено обґрунтування актуальності теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет

дослідження, представлено наукову новизну і практичну цінність результатів роботи та наведені положення, що виносяться на захист.

У першому розділі на основі огляду літературних джерел проведений аналіз сучасного стану методів зниження опору суден і виявлені основні проблеми та тенденції їх розвитку.

На рисунку 1 наведена блок-схема існуючих методів зниження опору судна.



Рисунок 1 - Блок-схема методів зниження опору судна

Досвід використання проаналізованих методів зниження опору довів їх досить високу ефективність, але виявив і певні недоліки. По-перше, через розмір пристроїв можливі втрати корисних об'ємів судна, що призводить до необхідності збільшення висоти борту судна для виконання вимог класифікаційних товариств до величини надводного борту. В свою чергу, це тягне за собою збільшення маси корпусу і зниження вантажопідйомності судна. По-друге, це складність конструкції пристроїв, яка призводить до того, що при їх експлуатації на судні повинен бути кваліфікований фахівець з обслуговування, який у випадку виходу з ладу пристрою у рейсі міг би полагодити або запобігти остаточному його руйнуванню. По-третє, майже всі пристрої можуть бути використані тільки на нових суднах при їх побудові.

Нещодавно з'явився новий напрямок з використання поверхні м'яча для гольфу для зниження опору різних об'єктів. М'яч для гольфу в порівнянні з гладким м'ячем при ударі пролетить у два рази більшу відстань. Це пов'язано з поведінкою потоку повітря на поверхні м'яча, коли в лунках утворюються вихрові структури, що знижують тиск. Для перевірки цього ефекту на суднах було створено масштабну модель реального судна, Кевін Джозеф Доннеллі, з розмірами $L=2,05$ м, $B=0,34$ м, $H=0,15$ м. На корпусі були створені лунки (рисунок 2), діаметри яких складає 0,37 м. Глибина лунок складає 11% від власного діаметру. Враховуючи коефіцієнт масштабування, діаметр та глибина лунок на моделі становлять 12,7 мм і 1,4 мм

відповідно. Такими лунками була вкрита вся кормова частина корпусу, імітуючи поверхню м'яча для гольфу. Але даний експеримент не показав бажаних результатів у зв'язку з тим, що моделювання судна по числу Re не є можливим, на відміну від м'яча для гольфу, через необхідність задавати об'єкту велику швидкість.

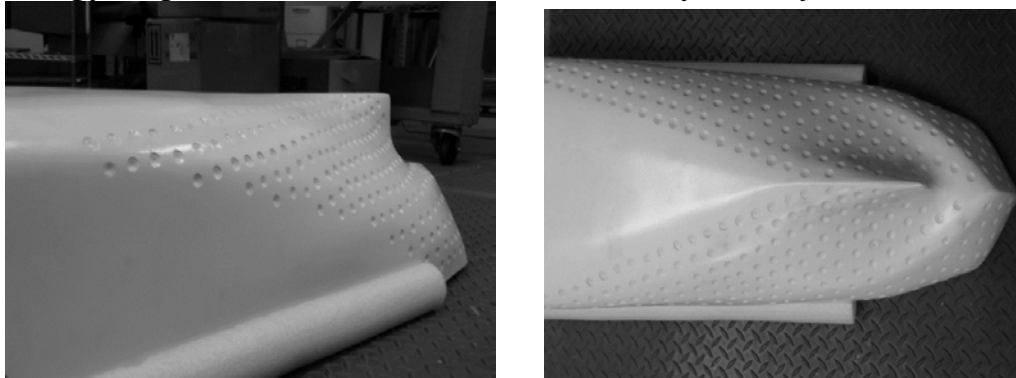


Рисунок 2 - Модель судна з лунками на кормовій поверхні

Встановлення лунок на поверхнях корпусів суден є нетехнологічним, в зв'язку з чим і виникає задача визначення оптимальних параметрів місцевих особливостей (виїмок), які зможуть давати помітне зниження опору в реальних умовах.

У другому розділі описаний алгоритм побудови розрахункових проектів в CFD комплексах Flow Vision та Flow Simulation. Під час створення розрахункового проекту виконується параметричний аналіз за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки, визначаються параметри моделювання для того, щоб працював алгоритм диференціальних рівнянь, які описують рух рідини. Метод кінцевих об'ємів зводить їх до системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Взагалі рух нестисливої рідини описується диференціальними рівняннями в напруженнях в наступному вигляді:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} v_x + \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} v_y + \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} v_z = \vec{\Phi} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z} \right); \quad (1)$$

$$\nabla \vec{v} = 0,$$

де $\vec{v}(x, y, z, t) = \vec{i}v_x(x, y, z, t) + \vec{j}v_y(x, y, z, t) + \vec{k}v_z(x, y, z, t)$ – вектор швидкості; v_x, v_y, v_z – проекції вектору швидкості на координатні вісі з відповідними одиничними векторами $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$; $\vec{\Phi}(x, y, z, t)$ – вектор напруженості масових сил; ρ – густина (питома маса) рідини; $\vec{p}_x(x, y, z, t), \vec{p}_y(x, y, z, t), \vec{p}_z(x, y, z, t)$ – складові векторів напруженості поверхневих сил, що діють на площадки, які розташовані перпендикулярно осях x, y, z і створюють тензор нормальних і дотичних напружень:

$$\begin{bmatrix} p_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & p_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & p_{zz} \end{bmatrix}; \quad \tau_{yx} = \tau_{xy}; \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (2)$$

$\nabla \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$ – дивергенція вектору швидкості.

Далі, за Рейнольдсом, будемо вважати, що вектори швидкості $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}''$ та поверхневого напруження $\vec{p}_n = \vec{p}_n' + \vec{p}_n''$ складаються за часом з повільної та пульсаційної складових, а $\vec{p}_n = \vec{p}_x \cos(n, x) + \vec{p}_y \cos(n, y) + \vec{p}_z \cos(n, z)$, де n – нормаль до поверхневої площадки. Таким чином, рівняння руху приймає вигляд:

$$\frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} + \frac{\partial \vec{v}'}{\partial x} v'_x + \frac{\partial \vec{v}'}{\partial y} v'_y + \frac{\partial \vec{v}'}{\partial z} v'_z = \vec{\Phi} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial (\overline{p'_x} + \overline{p''_x})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{p'_y} + \overline{p''_y})}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{p'_z} + \overline{p''_z})}{\partial z} \right];$$

$$\vec{v}' = 0, \quad (3)$$

де, за узагальненою гіпотезою Ньютона, повільні складові поверхневих напружень визначаються формулами:

$$p'_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial v'_x}{\partial x}; p'_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v'_y}{\partial y}; p'_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial v'_z}{\partial z};$$

$$\tau'_{xy} = \tau'_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v'_y}{\partial x} + \frac{\partial v'_x}{\partial y} \right); \tau'_{xz} = \tau'_{zx} = \mu \left(\frac{\partial v'_z}{\partial x} + \frac{\partial v'_x}{\partial z} \right);$$

$$\tau'_{yz} = \tau'_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v'_z}{\partial y} + \frac{\partial v'_y}{\partial z} \right), \quad (4)$$

в яких $p(x,y,z,t)$ - тиск в рідині, а μ – динамічний коефіцієнт в'язкості.

Пульсаційні складові поверхневих напружень пов'язані з відповідними складовими швидкостей наступними формулами:

$$p''_{xx} = -\rho \overline{v''_x v''_x}; p''_{yy} = -\rho \overline{v''_y v''_y}; p''_{zz} = -\rho \overline{v''_z v''_z}$$

$$\tau''_{xy} = \tau''_{yx} = -\rho \overline{v''_x v''_y}; \tau''_{xz} = \tau''_{zx} = -\rho \overline{v''_x v''_z}; \tau''_{zy} = \tau''_{yz} = -\rho \overline{v''_z v''_y} \quad (5)$$

Далі, за гіпотезою Бусінеска, ці складові визначаються як:

$$p''_{xx} = -\frac{2}{3}\rho k + 2\mu_T \frac{\partial v'_x}{\partial x}; p''_{yy} = -\frac{2}{3}\rho k + 2\mu_T \frac{\partial v'_y}{\partial y}; p''_{zz} = -\frac{2}{3}\rho k + 2\mu_T \frac{\partial v'_z}{\partial z}$$

$$\tau''_{xy} = \tau''_{yx} = \mu_T \left(\frac{\partial v'_y}{\partial x} + \frac{\partial v'_x}{\partial y} \right); \tau''_{xz} = \tau''_{zx} = \mu_T \left(\frac{\partial v'_z}{\partial x} + \frac{\partial v'_x}{\partial z} \right);$$

$$\tau''_{zy} = \tau''_{yz} = \mu_T \left(\frac{\partial v'_z}{\partial y} + \frac{\partial v'_y}{\partial z} \right), \quad (6)$$

де k – кінетична енергія турбулентності, а μ_T – коефіцієнт турбулентної в'язкості, що визначаються обраною моделлю турбулентності. Наприклад, для так званої стандартної $k - \varepsilon$ моделі вони визначаються наступними формулами [60], де ε – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності.

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}' k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_T G - \rho \varepsilon;$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}' \varepsilon) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_T G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (8)$$

де $G = D_{ij} \frac{\partial v'_i}{\partial x_j}$; $D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \vec{v}' + \frac{\rho k}{\mu_T} \right) \delta_{ij}$; $S_{ij} = \frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i}$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$.

Таким чином, рівняння (3 – 8) створюють замкнену систему рівнянь, що описують рух нестисливої рідини.

Для підтвердження коректності та правильності розрахунків виконуються процеси верифікації та валідації обраної моделі (рис. 3). В даній роботі процес верифікації виконується за рахунок зміни кількості клітинок, локального зменшення сітки, ступеня та місця адаптації сітки. На результати CFD моделювання суттєвим чином впливає кількість клітинок розрахункової сітки. Тому перед виконанням варіантних розрахунків було виконано дослідження впливу рівня дроблення глобальної і локальної сітки по поверхні на результати розрахунків. Особлива увага приділялася району встановлення засобів зниження опору, так як великий розмір клітинки сітки не дає змоги правильно розрахувати процеси, які там відбуваються.

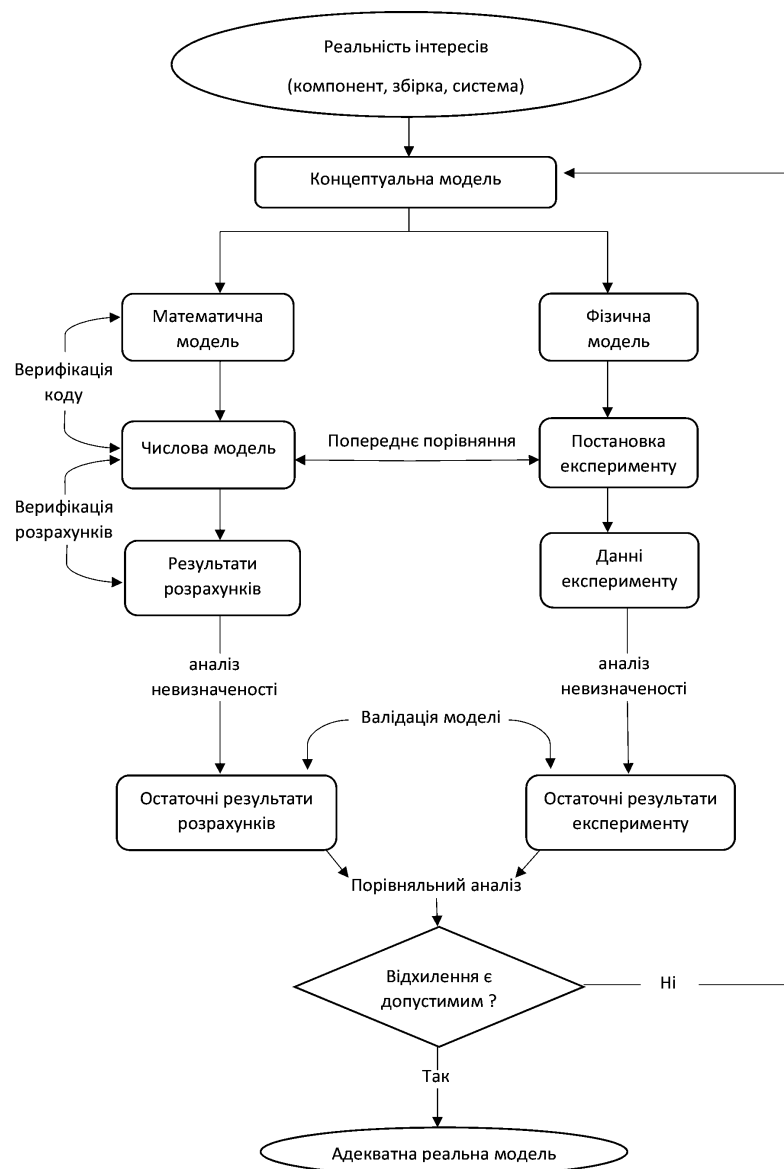


Рисунок 3 - Процеси верифікації та валідації

Процес валідації в даній роботі проводився на простому прикладі дослідження опору гладкої пластини в потоці використовуючи програмний комплекс Flow Vision порівнюючи отримані результати з розрахунками за формулою Прандтля – Шліхтинга. Моделювання обтікання гладкого шару та шару для гольфу виконувались в тому ж комплексі, а отримані результати порівнювались з великою кількістю експериментів різних компаній з відповідними параметрами швидкості, розмірів об’єктів дослідження тощо. Процес валідації програмних продуктів Flow Vision та Flow Simulation при моделюванні обтікання корпусів суден виконувався в різних варіантах. Моделі танкеру проекту 005RST01 та моделі підводного об’єкту сигаро-подібної форми досліджувалися в дослідницькому басейні Одеського Національного Морського Університету (ОНМУ) та у науково-дослідницькому басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК). Порівняння результатів розрахунків у вказаних програмних комплексах з даними фізичних експериментів показали дуже високу інформативність і достатню, для практичного використання, точність цих програм.

Третій розділ. Як правило, вибір параметрів числового моделювання потребує багато часу та великої потужності обчислювальної техніки. Тому для підтвердження можливості зниження опору за рахунок зміни характеристик прикордонного шару за допомогою встановлення лунок на поверхні шара та виїмок на поверхнях циліндричних тіл виконувався параметричний аналіз впливу форми, розмірів, місця розташування та кількості виїмок на опір руху тіла. Оскільки тіла мають достатньо просту форму, отримані результати не потребували значних комп'ютерних ресурсів і це дало можливість відповісти на питання ефективності використання виїмок в процесі зниження опору руху тіла.

Для підтвердження ефекту від встановлення лунок при застосуванні програмного комплексу Flow Vision було досліджено задачу обтікання сфери з лунками. Добре відомо, що залежність коефіцієнту лобового опору сфери від числа Рейнольдса ділиться на 3 області: підкритична, критична і закритична. Досліджуючи гладку кулю та м'яч для гольфу, було виявлено, що для сфери з лунками критичне значення лобового опору зменшується, а закритичне значення збільшується. Тобто критична область м'яча для гольфу зміщується до нижніх чисел Рейнольдса в порівнянні з гладкою кулею, а також точка відриву зміщується вниз за течією (рис.4). Зокрема, при відношенні $k_j/D = 0,05$, де k_j – глибина лунки, а D – діаметр кулі, $C_D = 0,35$ та $Re = 1,8 \cdot 10^4$, що дозволяє знизити опір сфери з лунками в порівнянні з гладкою сферою.

Коефіцієнт лобового опору сфери розраховується за наступною формулою:

$$C_D = \frac{2R_x}{\rho v^2 S_c}; S_c = \pi D^2. \quad (9)$$

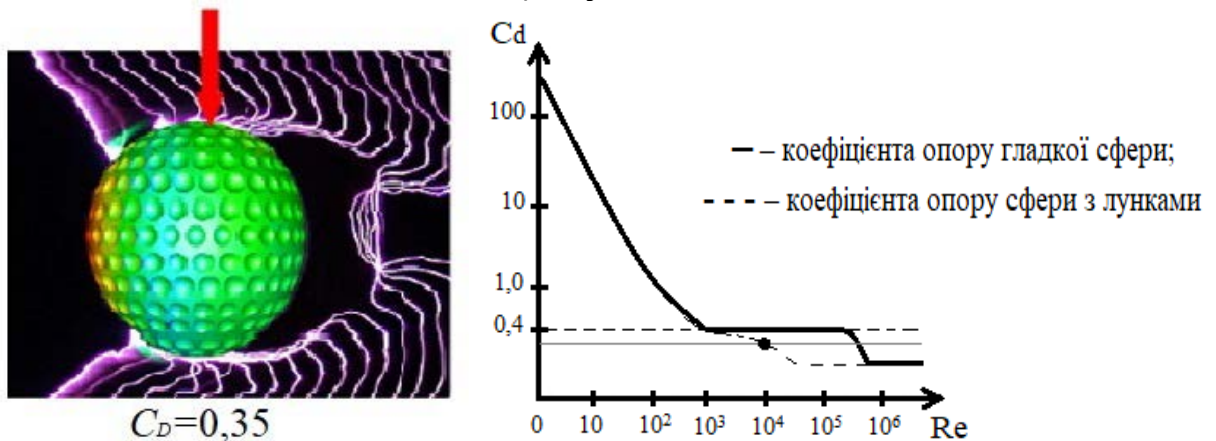


Рисунок 4 - Залежність коефіцієнта опору кулі від числа Рейнольдса та візуалізація обтікання сфери іскровим методом

Отримані результати наштовхнули на думку, що даний ефект та його модифікації можна використовувати на різних об'єктах.

Також у даному розділі проведено дослідження впливу поперечних виїмок на відносно простих об'єктах, таких як циліндричне тіло (рис. 5а,б) та круговий циліндр (рис. 6), які є перехідними етапами до судна та підводного човна відповідно. Геометричні характеристики циліндричного тіла наступні: $l = 10$ м – довжина; $b = 1$ м – максимальний вигин кривої, що імітує ватерлінію; $t = 2$ м – подовження тіла вздовж z напрямку; $x_m = 5$ м – абсциса максимального вигину.

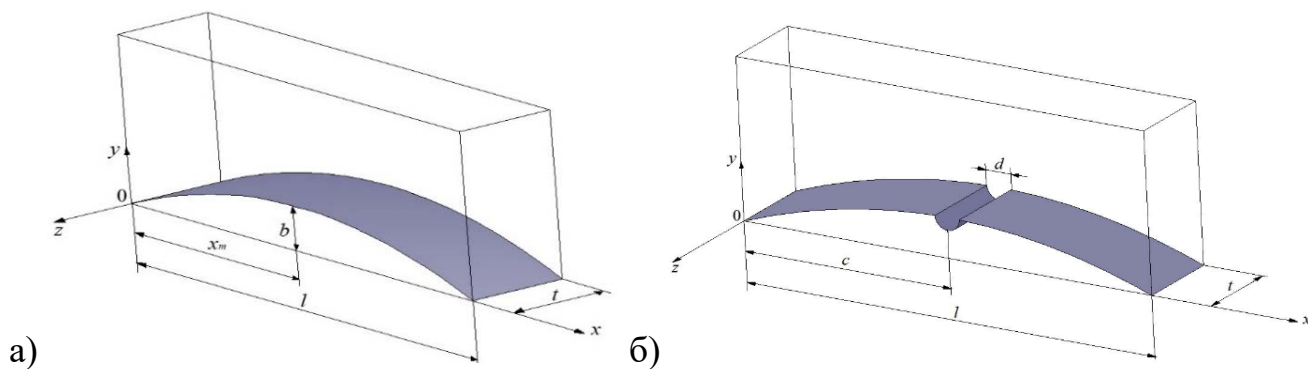


Рисунок 5 – Параметри циліндричного тіла: а – гладкого тіла, б – тіла з встановленою однією поперечною виїмкою

Геометрія кругового циліндра з виїмками за основними розмірами, що дорівнюють $A = 102$ м і $B = 14,8$ м. Параметри d – діаметр виїмки та C – відстань до виїмки є предметами дослідження.

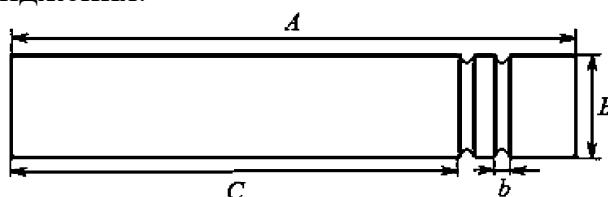


Рисунок 6 – Геометрія поверхні кругового циліндра з виїмками

Для знаходження оптимальних характеристик виїмок, які мають найкращу ефективність зниження опору руху рідини вздовж поверхонь вказаних тіл, виконувався параметричний аналіз місця розташування, розмірів, форми та їх кількості (рис.7 а,б).

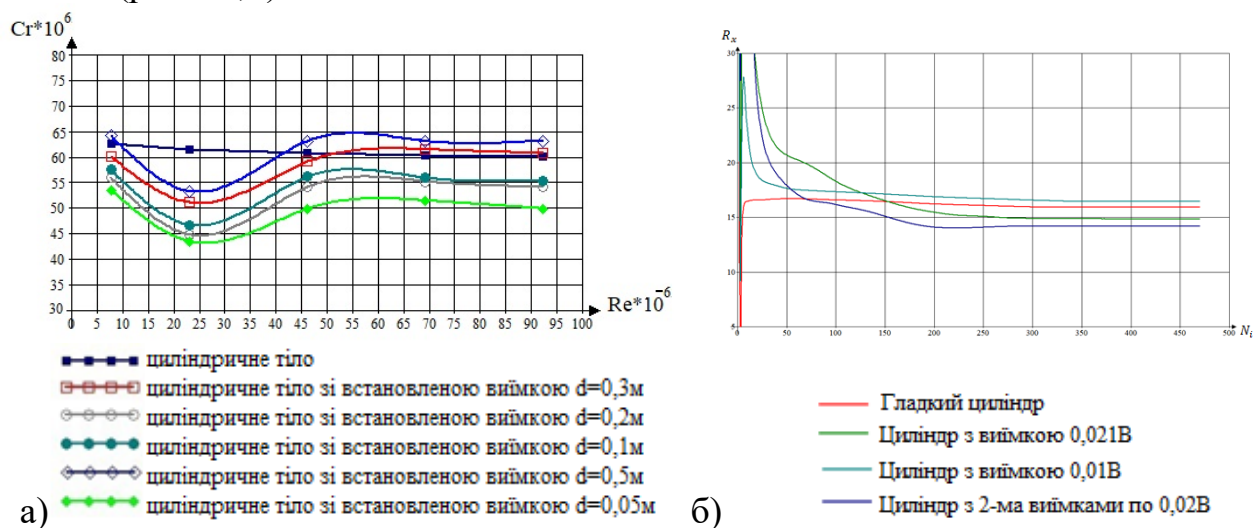


Рисунок 7 – а) обтікання циліндричного тіла з різними розмірами виїмок; б) Порівняння кривих опору кругового циліндра і кругового циліндра з виїмками при швидкості 14 м/с (R_x – опір циліндра, N_i – номер ітерації)

Слід відзначити, що максимальний ефект, при встановленні поперечної виїмки на поверхні циліндричного тіла запропонованої форми, спостерігається в діапазоні від $20 \cdot 10^6$ до $30 \cdot 10^6$ чисел Рейнольдса, при підвищенні чисел ефект також присутній.

В результаті проведених досліджень можна рекомендувати встановлення однієї поперечної виїмки специфічної форми (глибиною $k=0,03$ м) на поверхні

циліндричного тіла, з вказаними параметрами, для зниження опору на 20%, а дві кільцеві виїмки (глибиною $k=0,15\text{м}$) на поверхні кругового циліндру для зниження опору на 10%. В обох випадках виїмки слід розташовувати в кормовій частині об'єкта. Так як використання виїмок на відносно простих об'єктах показало досить непоганий результат, то це дає змогу для подальшого дослідження впливу виїмок на більш складних поверхнях корпусів суден та підводних човнів. Проте слід відмітити, що корпус судна має особливості конструкції та обводів, і тому отримані результати потребують корегування.

Четвертий розділ. При обтіканні корпусу судна існують дві критичні точки, які впливають на зміну характеру обтікання корпусу. У першій точці відбувається зміна потоку з ламінарного в турбулентний, у другій точці відбувається відрив прикордонного шару, за яким слідує завихрення потоку в гідродинамічному сліду. У цих же точках і відбувається зміна розподілу тиску на поверхні корпусу судна. Встановлення виїмок є одним зі способів впливу на пограничний шар, що, в свою чергу, викликає перерозподіл тиску по корпусу судна.

Зазначений «спосіб регулювання розподілом тиску на змоченій поверхні судна» (виїмки) був застосований до суховантажного судна, з параметрами $L_{\text{нб}} = 93,28 \text{ м}$, $B = 12,7 \text{ м}$, $T = 5 \text{ м}$ та до танкера з параметрами $L_{\text{нб}} = 136,37 \text{ м}$, $B = 16,50 \text{ м}$, $T = 4,3 \text{ м}$ (рис. 8 а,б).

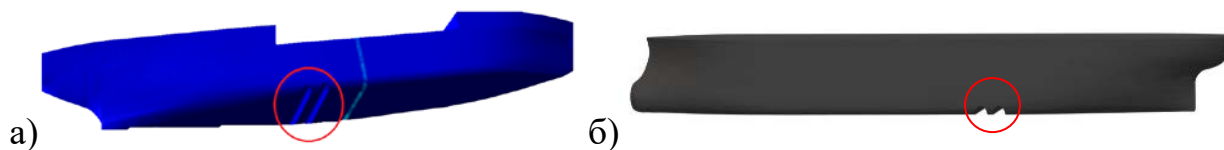


Рисунок 8 - Моделі суховантажного судна та танкера

В процесі дослідження виконувався параметричний аналіз місця розташування, розмірів, форми та кількості виїмок, що необхідно встановити для ефективного зниження опору, для кожного корпусу окремо. Загальний вид та конструкція виїмок представлена на рисунку 9.

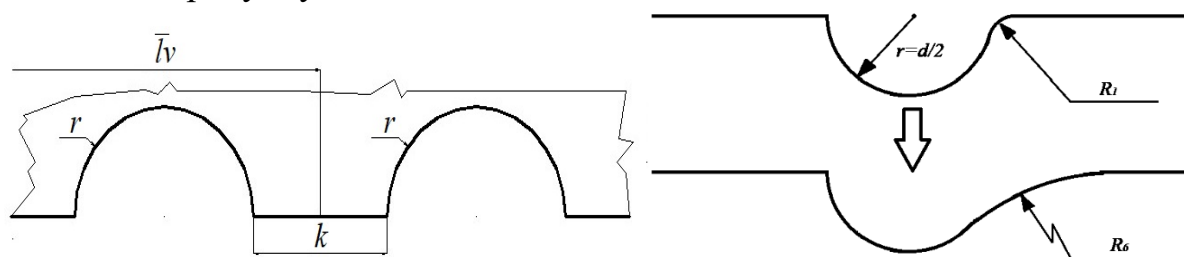


Рисунок 9 – Конструкція виїмок

Де $\bar{l}_v = l_v / L_{\text{нб}}$ – місце розташування виїмки від довжини судна, починаючи з кормового перпендикуляру; r – розмір виїмки, м; k – відстань між виїмками, м; R_i – радіус закруглення кромки, м.

Аналіз отриманих залежностей буксирувального опору від швидкості показав, що для даного суховантажного судна можна рекомендувати встановлення однієї специфічної виїмки капле образної форми шириною 3% від довжини судна та максимальною глибиною $t = 0,34 \text{ м}$ на $\bar{l}_v = 0,41$ місце розташування виїмки від довжини судна, починаючи з кормового перпендикуляру або двох виїмок шириною

$b = 0,73\%$ від довжини судна при тому ж місці розташування для ефективного зниження опору. Для танкера при швидкості 6 м/с за допомогою двох виїмок шириною 0,36% від його довжини та глибиною $t = 0,3$ м опір було знижено на 9%.

Перевіркою ефективності впливу виїмок на ходові якості моделі танкера проекту 005RST01 встановлено наступне. Найкращий результат дала одиночна поперечна виїмка шириною $b = 16$ мм та глибиною $t = 4$ мм ($b/t = 4$), що дозволила знизити опір на $2,5\% \div 3\%$ при швидкості руху моделі від 0,85 до 1,13 м/с ($Fr = 0,165 \div 0,22$; $Re = 1,17 \cdot 10^6 \div 2,64 \cdot 10^6$) (рис. 10).

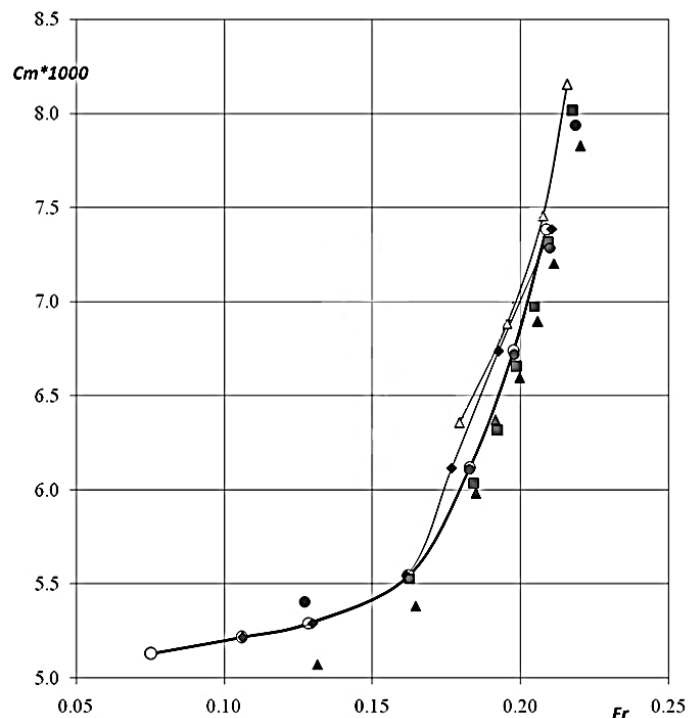


Рисунок 10 – Залежність коефіцієнта повного опору C_m моделі танкера від числа Фруда

Де, —○— — гладкий корпус; —▲— — з виїмкою $b/t = 4$ мм —■— — з виїмкою $b/t = 2$ мм; —△— — з 3-ма виїмками $b/t = 2$; —◆— — з виїмкою $b/t = 4$ мм в носовій частині

Після чого варіанти розташування виїмок на моделі, які показали найкращий результат, були створені у програмному комплексі SolidWorks та дослідженні в програмному комплексі Flow Vision для верифікації CFD пакету. Далі отримані 3D моделі були збільшені до розмірів натурного судна, а CFD розрахунки показали, що опір збільшився на 5%. Тому використання цих виїмок на моделі є доцільним, але для натурного судна виїмки з такими параметрами призводять до зворотного ефекту, тому що моделювання не можливо здійснити при натурних числах Рейнольдса. В результаті чого, розміри і місце розташування виїмок для кожного судна необхідно підбирати окремо, беручи до уваги характеристики обраного натурного судна, а найбільш ефективним засобом є CFD моделювання на натурних об'єктах.

В межах даної роботи виконано чисельні дослідження впливу виїмок на поверхні двох типів підводних об'єктів (рис. 11).

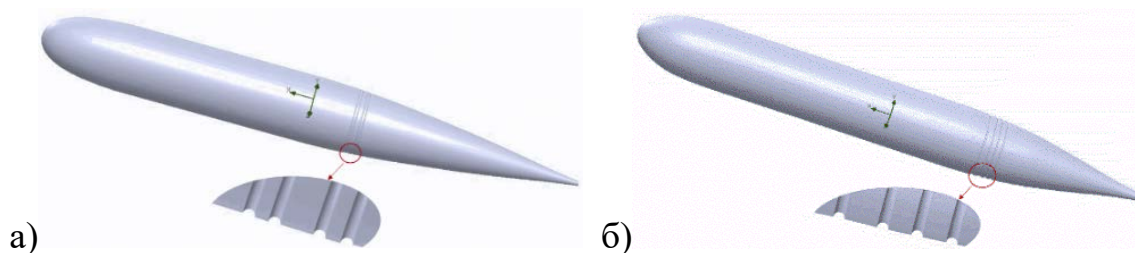


Рисунок 11 – Модель підводного об'єкту типу «Ліра» з виїмками (а) та типу «Гепард» з виїмками (б)

Результати випробувань показали, що при встановленні виїмок товщина прикордонного шару зменшується, що призводить до зменшення товщини гідродинамічного сліду. Крім того, при правильному виборі розмірів, місця розташування та кількості виїмок можна досягти зниження опору на 2-6% для $Re=4 \cdot 10^7 \div 15 \cdot 10^7$ (рис. 12).

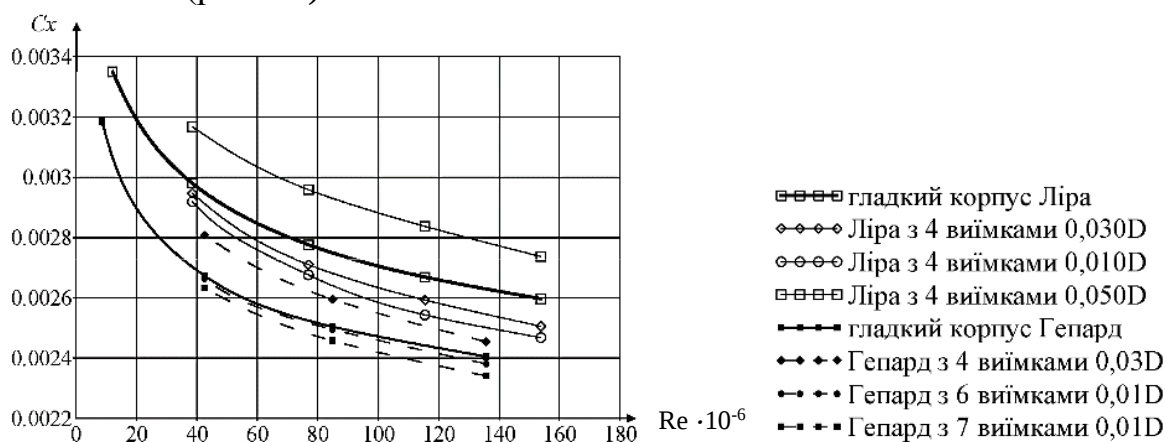


Рисунок 12 – Графік залежності коефіцієнта опору C_x від числа Рейнольдса Re і діаметру виїмок d для підводного об'єкту типу «Ліра» та підводного об'єкту типу «Гепард»

Визначено, що максимальна ефективність встановлення виїмок діаметром $d = 0.01D$ на «Лірі» в 6 % зменшення коефіцієнту опору при $Re = 1,5 \cdot 10^8$ і кількості виїмок в 4 одиниці та 2 % для «Гепарда» при $Re = 1,35 \cdot 10^8$ та кількості виїмок в 7 одиниць з такими ж параметрами виїмок.

Для верифікації результатів CFD моделювання було виконано їх порівняння з даними експериментального випробування в науково-дослідному басейні моделі сигароподібної форми зі встановленими виїмками, яке підтвердило збіжність розрахунків. Враховуючи те, що числа Рейнольдса модельного експерименту дуже малі, то і сам ефект зниження опору малий (2%). Тому модельні експерименти можуть лише підтвердити наявність цього ефекту, а параметри виїмок можна розраховувати лише в CFD пакетах для натурних об'єктів.

Перевага використання даного засобу полягає у тому, що, на відміну від більшості поширених засобів зниження опору, він не потребує суттєвих змін в конструкції корпусу. Це дає можливість використовувати його як на нових об'єктах, так і на об'єктах, що вже введені в експлуатацію. Незважаючи на переваги, дослідження показали, що якщо розміри, місце розташування та кількість виїмок вибрані невірно, то це може призвести до збільшення опору.

П'ятий розділ. Для дослідження ефективності кормової профільованої виїмки на поверхні швидкісного катера (рис. 13) виконувалися два типи розрахунків: без врахування вільної поверхні та з вільною поверхнею.

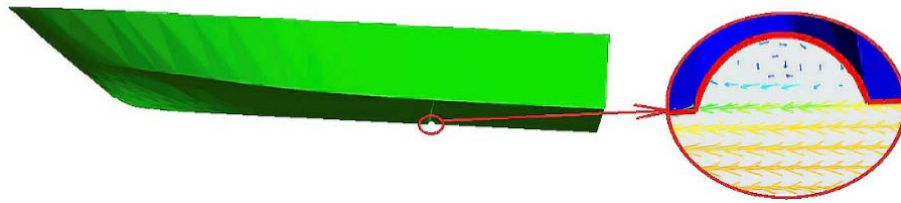


Рисунок 13 – Корпус швидкісного судна зі встановленою виїмкою

Перший тип розрахунку проводився як попередній аналіз впливу виїмки на судно, у зв'язку з досить довгим часом, необхідним для розрахунку моделі з вільною поверхнею. Отримано позитивний результат від встановлення виїмок.

В результаті проведених досліджень, другого типу, можна зробити рекомендації для даного швидкісного судна встановлювати виїмки на $\bar{l}_v = 0,35$ від довжини судна, починаючи з кормового перпендикуляру, та діаметром 7,8% від висоти борту дозволяє знизити опір на 14% (рис. 14).



Рисунок 14 – Графік залежності опору руху глісерів від числа Рейнольдса

Аналізуючи отримані результати, представлені на рисунку 14, можна зробити висновок, що максимальний ефект спостерігається при $Re = 15 \cdot 10^7 \div 24 \cdot 10^7$ опір знизився на 14%, далі з ростом Re ефект зменшується, а в діапазоні $Re = 28 \cdot 10^7 \div 40 \cdot 10^7$ він майже відсутній, при $Re = 48 \cdot 10^7 \div 56 \cdot 10^7$ опір знизився на 12%, тобто сам ефект суттєво залежить від числа Рейнольдса.

Далі виконано дослідження погано обтічного тіла з подачею повітряного змащення, яке представляє собою перехідний етап до дослідження корпусу швидкохідного судна з повітряним змащенням.

За допомогою програмного комплексу Flow Vision спочатку було змодельоване обтікання гладкого погано обтічного тіла (у вигляді паралелепіпеду), яке є первинною моделлю, з якою порівнюються подальші результати. Наступним етапом стало дослідження первинної моделі зі встановленою на поверхні днища спочатку сходинки, потім виїмки. Слід відзначити, що вже на цьому етапі виїмка показала кращий результат за сходинку, зниження опору на 8%. Після отриманих результатів було змодельоване утворення змащення у випадку його подачі за сходинкою, встановленою на поверхні погано обтічного тіла, а потім утворення змащення у

випадку його подачі з профільованої виїмки. За результатами розрахунків, з чотирьох варіантів найкращий результат показала профільована виїмка на поверхні днища погано обтічного тіла, з якої подавалося повітряне змащення. В результаті такого поєднання опір руху води цього тіла знизився на 17%.

Перспективність використання методу повітряного змащення для зменшення опору суден була метою дослідження протягом багатьох років. Проте, виникає досить вагома проблема для подальшого розвитку даного методу. Вона полягає у тому, що для подачі повітря необхідна енергія має досить велике значення, приблизно 2-8% від загальної, що споживається судном. Кількість енергії залежить від розмірів бульбашок та від глибини їх подачі. В результаті потужність, затрачена на подачу повітря, зводить нанівець економію, яку здобули за рахунок зниження опору. Тому пропонується використовувати даний метод без встановлення спеціальних нагнітальних приладів, а замість цього використовувати природний перепад тиску між атмосферою та тиском за сходишкою (реданом).

Для дослідження даного методу зниження опору використовувалась модель швидкісного катеру «Мерлін». Обрана модель досліджувалась у двох CFD пакетах: Flow Vision та Flow Simulation (рис. 15).

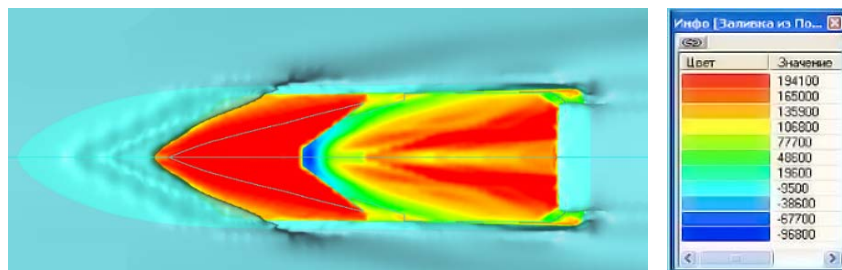


Рисунок 15 – Розподіл тиску по змоченій поверхні днища катеру «Мерлін»

Дослідження чистої моделі показали, що за реданом утворюється зона пониженого тиску, з суттєвим розрідженням і якщо в цю зону подати трубки, які будуть підводити повітря з атмосфери, тоді утвориться природна подача повітря за рахунок різниць тиску. Пропонується встановити трубки, конструкція яких зображена на рисунку 16.

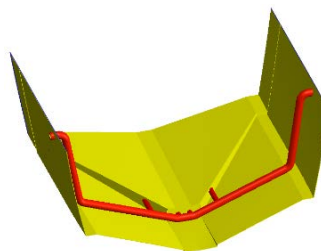


Рисунок 16 – Схема встановлення трубки подачі повітря в зареданий простір

Наступним етапом в 3D моделі були побудовані труби і виконувались розрахунки двох типів: з примусовою подачею повітря (імітуючи роботу нагнітального обладнання) та з використанням ефекту від перепаду тиску (природна подача повітря). Усі розрахунки моделей виконувались в однакових умовах та при однакових швидкостях. Розрахунки показали, що за рахунок природної подачі повітря опір судна знижується на 10-20% в залежності від швидкості руху. Також слід відзначити, що примусова подача повітря з точки зору зниження опору може бути

більш ефективною при більшій інтенсивності подачі повітря, однак, при врахуванні потужності, витраченої на подачу повітря, вся економія буде зводитись нанівець.

Найбільш характерною особливістю процесу проектування є постійний пошук компромісних рішень, забезпечуючи досягнення найбільшої ефективності судна та виконання багатьох та суперечливих вимог до його якості. На сьогоднішній день в умовах постійної конкуренції судновласників головною ціллю при проектуванні судна для суднохідних компаній є отримання доходу, хоча ефективність судна оцінюється також і за іншими економічними показниками. Тому оцінку економічної ефективності методу зниження опору пропонується проводити з урахуванням зменшення витрат палива, що в свою чергу зменшує вартість перевезеного вантажу або пасажирів та терміну окупності витрат при впровадженні методу на новому або вже введеному в експлуатацію судні. Враховуючи усі вище перераховані аспекти була сформована загальна схема алгоритму вибору засобів зниження опору руху під час проектування суден, які дають змогу зменшенню витрат палива і вартості перевезеного вантажу (пасажирів) та терміну окупності витрат при впровадженні цих засобів на новому або вже введеному в експлуатацію, яка зображена на рисунку 17.

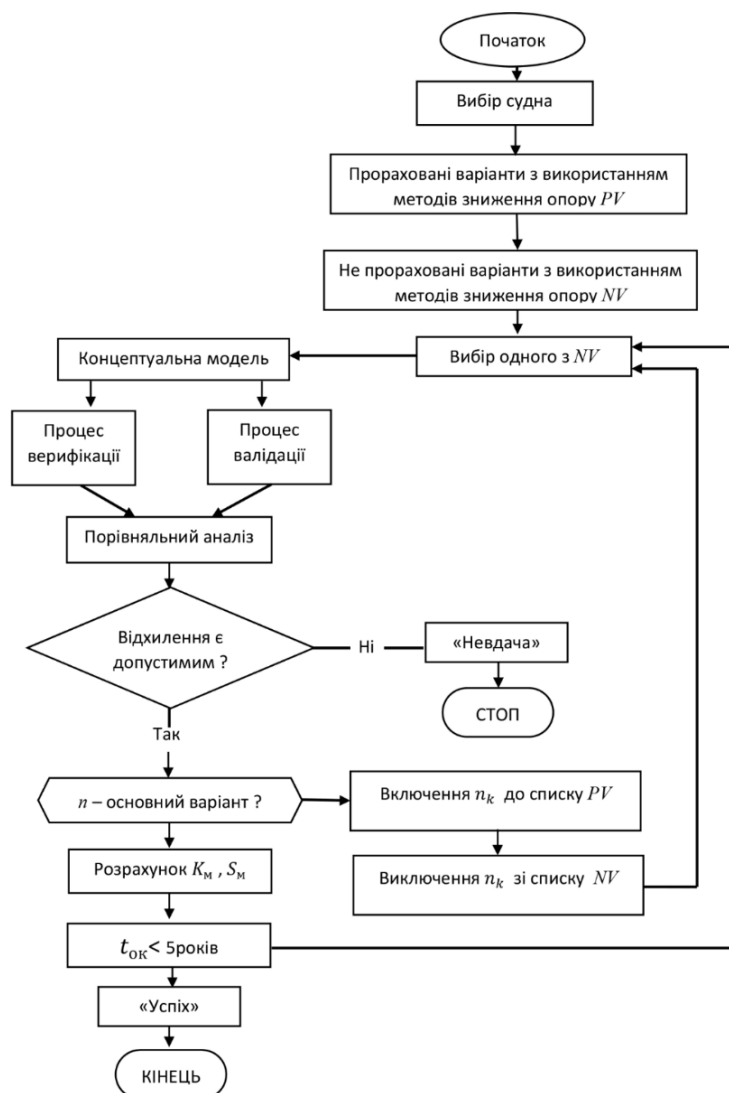


Рисунок 17 – Загальна схема алгоритму вибору засобів зниження опору руху під час проектування суден

Економічний показник роботи об'єкта до та після введення модернізації характеризується собівартістю, тобто $E_{\text{заг}}^{\text{м}}$ – загальними експлуатаційними витратами на утримання модернізації в експлуатації на годину, які приходяться на $Q_{\text{год}}$ – витрати палива на годину після модернізації, $\frac{y.o.}{\text{тон. год}}$;

$$S_{\text{м}} = \frac{E_{\text{заг}}^{\text{м}}}{Q_{\text{год}}} . \quad (10)$$

Економічна ефективність та доцільність модернізації визначається за формулою терміну повернення витрат, рік:

$$t_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{м}}}{(S_{\text{до}} - S_{\text{після}}) \cdot Q_{\text{год}}} < 5 \text{ років} , \quad (11)$$

де $S_{\text{до}}$, $S_{\text{після}}$ – собівартість до та після модернізації, $\frac{y.o.}{\text{тон. год}}$; $K_{\text{м}}$ – вартість модернізації. Тобто модернізація судна буде доцільна, якщо термін повернення витрат на модернізацію з приростом прибутку не буде перевищувати 5 років.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної задачі – розробки та вдосконаленню засобів, що забезпечують ефективне зниження опору руху суден.

1. Проведений параметричний аналіз конфігурацій виїмок на поверхні канонічних тіл (шар, циліндр та циліндричне тіло), результати розрахунків показали, що при правильному розташуванні та при виборі правильної форми виїмки можна знизити опір для розглянутих форм канонічних тіл, при певних умовах, від 5 до 20%, при цьому найвища ефективність при числах Рейнольдса $2 \cdot 10^7 \div 3 \cdot 10^7$.

2. Проведений аналіз ефективності встановлення специфічних виїмок на поверхнях суховантажного судна, танкера, швидкісного судна та підводних об'єктів за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу. При правильному виборі параметрів виїмок можна знизити опір даних типів суден від 2 до 20% для $Re = 1,3 \cdot 10^8 \div 5 \cdot 10^8$ і якщо виїмки розташовані на відстані в 40% довжини судна починаючи з кормового перпендикуляру.

3. Доведена добра збіжність *CFD* моделювання з фізичним експериментом у науково-дослідницькому басейні, що показує їх дуже високу інформативність і достатню для практичного використання точність, також було виявлено, що ефект зниження опору руху моделей з виїмками не значний через малі числа Рейнольдса, експериментальні випробування варіантів виїмок показали зниження опору моделі надводного судна на 3% та підводного об'єкту на 2%;

4. Доведено, за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки, можливість використання повітряного змащення на швидкісних судах без застосування механізмів примусового нагнітання повітря, а використовувати природній перепад тиску атмосферного до пониженого на дні судна при цьому опір судна знижується на 10-20% в залежності від швидкості ходу при $Re = 1 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^8$.

Грунтуючись на економічних показниках була сформована загальна схема алгоритму вибору засобів зниження опору руху під час проектування суден, які дають змогу зменшенню витрат палива і вартості перевезеного вантажу (пасажирів) та терміну окупності витрат при впровадженні цих засобів на новому або вже введеному в експлуатацію.

Враховуючи усі результати роботи було розроблено методику визначення можливості зниження опору руху об'єктів океанотехніки з встановленими місцевими особливостями в основу якої покладені методи обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу.

Впровадження результатів.

1. Отримані результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Національного Університету Кораблебудування імені адмірала Макарова під час лекцій, практичних і лабораторних занять по дисциплінах з теорії корабля та проектування суден.

2. Розробки схвалені у організації ООО «Артіль» ЛТД і будуть використовуватися в процесі конструювання, проектування і модернізації суден. Зокрема це розробка варіантів проекту пасажирського катамарану АВП24 класу ріка-море із звичайним корпусом та корпусом із виїмками.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

основні наукові професійні видання

1. Боднарчук Ю. С., (2013), Влияние лунок на аэрогидродинамическое сопротивление пластины, шара и кругового цилиндра / Ю. С. Боднарчук// Вісник НУК імені адмірала Макарова, №4, С. 7-13.

2. Боднарчук Ю. С., (2013), Эффективность кормовой профилированной выемки для снижения сопротивления воды движению судна / Ю. М. Король, Ю. С. Боднарчук// Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування, №4, С.21-24. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

3. Bodnarchuk J. S., (2018), Stern profiled recess efficiency for reducing the water resistance of high-speed vessels / J. S. Bodnarchuk, Y. M. Korol// Shipbuilding and marine infrastructure, No.2 – pp. 107-110. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

4. Bodnarchuk J. S., (2019), Reducing poorly streamlined body water resistance by using active boundary layer control devices / J. S. Bodnarchuk // Shipbuilding and marine infrastructure, No.1 (11), pp. 4- 8.

5. Боднарчук Ю. С., (2019), Розрахунок опору різної форми ватерлінії та ватерлінії зі встановленими виїмками на її поверхні методами обчислюваної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VII (24), pp-49-52. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

6. Боднарчук Ю. С., (2020), Study of the influence of recesses on the resistance to the motion of submarines by methods of computational hydrodynamics/ Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король, М. І. Мунесан// Східно-Європейський журнал передових технологій, №5 (107), pp.2-22. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

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

1. Боднарчук Ю. С., (2013), Ефект лунки та її вплив на опір пласкої пластини / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// V науково-практична конференція всеукраїнського конкурсу наукових робіт – Миколаїв, С. 7-9.

2. Боднарчук Ю. С., (2013), Моделирование активного управления пограничным слоем в CFD пакете Flow Vision / Ю. С. Боднарчук// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 50-51.

3. Боднарчук Ю. С., (2013), Исследование эффективности кормовой профилированной выемки для снижения сопротивления судна / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// IV міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 405-406.

4. Боднарчук Ю. С., (2014), Снижение вязкостных составляющих сопротивления судна при помощи кормовых профилированных выемок / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 8-9.

5. Боднарчук Ю. С., (2014), Зниження опору руху тіла за допомогою пристроїв активного керування прикордонним шаром / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// V міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 384-385.

6. Боднарчук Ю. С., (2018), CFD технологии в проблемах совершенствования элементов движительно-рулевого комплекса/ Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю– Миколаїв, С. 5-9.

7. Боднарчук Ю. С., (2018), Влияние локального регулятора распределения давления на различных поверхностях /Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// IX міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 319-320.

8. Боднарчук Ю. С., (2018), Зниження опору руху швидкісних суден за допомогою кормової профільованої виїмки/Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 27-28.

9. Боднарчук Ю. С., (2019), Дослідження засобів зниження опору методами обчислювальної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// X міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 45-48.

10. Боднарчук Ю. С., (2019), Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації розрахунків опору методами обчислювальної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// X міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 41-44.

11. Боднарчук Ю. С., (2019), Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації розрахунків при використанні методів обчислювальної гідродинаміки/ Ю. С. Боднарчук// IV International Scientific and Practical Conference – Osaka, No.4, pp.-254 - 262.

АНОТАЦІЯ

Боднарчук Ю. С. Зменшення опору руху суден за допомогою використання виїмок та повітряного змащення – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 «Конструювання та будування суден» – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2021 р.

В дисертаційному дослідженні представлені засоби зниження опору судна у вигляді локальних поперечних поглиблень (виїмок) на днищовій поверхні різних типів суден та поглиблень (виїмок) у вигляді кілець на поверхні підводних човнів, а також вплив подачі повітряного мастила природним шляхом на поверхню швидкісного судна. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.

В роботі описаний алгоритм побудови розрахункових проектів в computational fluid dynamics комплексах Flow Vision та Flow Simulation. Під час створення розрахункового проекту виконується параметричний аналіз за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки. Визначаються параметри моделювання для того, щоб працював алгоритм диференціальних рівнянь, які описують рух рідини, метод кінцевих об'ємів зводить їх до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Процес валідації програмного продукту Flow Vision та Flow Simulation при моделюванні обтікання корпусів суден виконувався для моделі танкера проекту 005RST01 та підводного об'єкту сигаро подібної форми в різних науково-дослідницьких басейнах. Порівняння результатів розрахунків у вказаних програмних комплексах з даними фізичних експериментів показали дуже високу інформативність і достатню для практичного використання точність цих програм.

Також в роботі описується процес дослідження впливу виїмок на відносно простих об'єктах, таких як циліндричне тіло та круговий циліндр, які є перехідними етапами до судна та підводного човна відповідно. Проводилося дослідження ефективності локального поперечного поглиблення (виїмок) на днищовій поверхні суховантажного судна. Перевірка ефективності впливу виїмок на ходові якості судна була виконана на моделі танкера проекту 005RST01. Окрім того, за допомогою computational fluid dynamics пакетів було виконано моделювання як для моделі, так і для натурного судна. Слід відмітити, що розміри і місце розташування виїмок для кожного судна необхідно підбирати окремо, беручи до уваги характеристики обраного натурного судна. В програмних продуктах Flow Vision та Flow Simulation проводилися розрахунки впливу встановлених виїмок на поверхнях двох типів підводних човнів.

Проведено дослідження методів зниження опору для швидкісних суден. В програмному комплексі FlowVision моделювалось швидкісне судно, зі встановленою виїмкою в двох варіантах: без урахування вільної поверхні і з урахуванням вільної поверхні для скорочення часу розрахунку і більш детального вивчення ефекту. На моделі погано обтічного тіла, у вигляді паралелепіпеду, досліджувалось питання про ступінь ефективності одночасного використання декількох засобів впливу на прикордонний шар спрямованих на зниження опору тіл при їх русі в рідині. На моделі швидкісного судна досліджується вплив на зниження опору подачі повітря на днищову поверхню корпусу через канали при заданій швидкості та за рахунок

перепаду тиску на дні судна та атмосферного тиску зверху, що дало позитивний результат.

Сформована загальна схема алгоритму вибору засобів зниження опору руху під час проектування суден, які дають змогу зменшенню витрат палива і вартості перевезеного вантажу (пасажирів) та терміну окупності витрат при впровадженні цих засобів на новому або вже введеному в експлуатацію.

Розроблено методику визначення можливості зниження опору руху об'єктів океанотехніки з встановленими місцевими особливостями в основу якої покладені методи обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу.

Ключові слова: прикордонний шар, виїмка, повітряне змащення, судна, підводний човен, мінімізація опору, експериментальне і чисельне моделювання, параметричний аналіз, обчислювальна гідродинаміка, погано обтічне тіло.

АННОТАЦИЯ

Боднарчук Ю. С. Снижение сопротивления судов посредством использования выемок и воздушной смазки - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 «Конструирование и строительство судов» - Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2021 г.

В диссертационном исследовании представлены средства снижения сопротивления судна в виде локальных поперечных углублений на днищевой поверхности различных типов судов и углублений в виде колец на поверхности подводных лодок, а также влияние воздушной смазки на поверхности скоростного судна. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и списка использованных источников.

В работе описан алгоритм построения расчетных проектов в computational fluid dynamics комплексах Flow Vision и Flow Simulation. Во время создания расчетного проекта выполнялся параметрический анализ с помощью методов вычислительной гидродинамики. Определялись параметры моделирования для того, чтобы работал алгоритм дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости, метод конечных объемов, который сводит их к системе линейных алгебраических уравнений. Процесс валидации программного продукта Flow Vision и Flow Simulation при моделировании обтекания корпусов судов выполнялся для модели танкера проекта 005RST01 и подводного объекта сигарообразной формы в различных научно-исследовательских бассейнах. Сравнение результатов расчетов в указанных программных комплексах с данными физических экспериментов показали очень высокую информативность и достаточную для практического использования точность этих программ.

Также в работе описывается процесс исследования влияния выемок на относительно простых объектах, таких как цилиндрическое тело и круговой цилиндр, которые являются переходными этапами к судну и подводной лодки соответственно. Проводилось исследование эффективности локального поперечного углубления (выемок) на днищевой поверхности сухогруза. Проверка эффективности воздействия выемок на ходовые качества судна была выполнена на модели танкера проекта

005RST01. Кроме того, с помощью computational fluid dynamics пакетов было выполнено моделирование как для модели, так и для натурального судна. Следует отметить, что размеры и расположение выемок для каждого судна необходимо подбирать отдельно, учитывая характеристики выбранного натурального судна. В программных продуктах Flow Vision и Flow Simulation проводились расчеты влияния установленных выемок на поверхностях двух типов подводных лодок.

Проведено исследование методов снижения сопротивления для скоростных судов. В программном комплексе Flow Vision моделировалось скоростное судно с установленной выемкой в двух вариантах: без учета свободной поверхности и с учетом свободной поверхности для сокращения времени расчета и более детального изучения эффекта. На модели плохо обтекаемого тела, в виде параллелепипеда, исследовалось вопрос о степени эффективности одновременного использования нескольких средств воздействия на пограничный слой направленных на снижение сопротивления тел при их движении в жидкости. На модели скоростного судна исследуется влияние на снижение сопротивления при подаче воздуха на днищевую поверхность корпуса через каналы, при заданной скорости, за счет перепада давления на дне судна и атмосферного давления сверху, что дало положительный результат.

Разработана общая схема алгоритма выбора средств снижения сопротивления движению при проектировании судов, которые позволяют уменьшить расход топлива и стоимость перевозимого груза (пассажиров), а также срока окупаемости затрат при внедрении этих средств на новом или уже введенном в эксплуатацию судне.

Разработана методика определения возможности снижения сопротивления движению объектов океанотехники с установленными местными особенностями в основу которой положены методы вычислительной гидродинамики и параметрического анализа.

Ключевые слова: пограничный слой, выемка, воздушное смазка, суда, подводная лодка, минимизация сопротивления, экспериментальное и численное моделирование, вычислительная гидродинамика, плохообтекаемое тело.

ABSTRACT

Bodnarchuk J. S. Reducing ship drag through the use of recesses and air lubrication - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.08.03 "Design and construction of ships" - National university of shipbuilding of a name of Admiral Makarov, Nikolaev, 2021.

The dissertation research presents the means of reducing the resistance of the vessel in the form of local transverse depressions on the bottom surface of different types of vessels and depressions in the form of rings on the surface of submarines, as well as the effect of air oil on the surface of the speedboat. The dissertation consists of an introduction, three sections, conclusions, a list of used sources and appendices.

The paper describes an algorithm for constructing computational projects in computational fluid dynamics complexes Flow Vision and Flow Simulation. During the creation of the computational project, parametric analysis is performed using computational fluid dynamics methods. The modeling parameters are determined in order for the algorithm of differential equations describing the motion of a fluid to work, the method of finite

volumes, which reduces them to a system of linear algebraic equations. The process of validation of the software product Flow Vision and Flow Simulation in modeling the flow around the hulls of ships was carried out for a model tanker of project 005RST01 and an underwater cigar-shaped object in various research basins. Comparison of the results of calculations in the indicated software complexes with the data of physical experiments showed a very high information content and the accuracy of these programs sufficient for practical use.

The paper also describes the process of studying the effect of excavations on relatively simple objects, such as a cylindrical body and a circular cylinder, which are transitional stages to a ship and a submarine, respectively. A study of the effectiveness of the local transverse recess (recesses) on the bottom surface of the bulk carrier was carried out. Checking the effectiveness of the impact of excavations on the ship's sailing performance was carried out on a model tanker of project 005RST01. In addition, using computational fluid dynamics packages, simulations were performed for both the model and the full-scale vessel. It should be noted that the size and location of the recesses for each vessel must be selected separately, taking into account the characteristics of the selected full-scale vessel. In software products Flow Vision and Flow Simulation, calculations were made of the effect of installed cuts on the surfaces of two types of submarines.

A study of methods for reducing drag for high-speed vessels has been carried out. In the software package Flow Vision, a high-speed vessel with an installed recess was modeled in two versions: without taking into account, the free surface and taking into account the free surface to reduce the calculation time and study the effect in more detail. On the model of a bluff body, in the form of a parallelepiped, the question of the degree of efficiency of the simultaneous use of several means of influencing the boundary layer aimed at reducing the resistance of bodies when they move in a fluid was investigated. On the model of a high-speed vessel, the influence on the reduction of resistance when air is supplied to the bottom surface of the hull through the channels, at a given speed, due to the pressure drop at the bottom of the vessel and atmospheric pressure from above, is investigated, which gave a positive result.

The general scheme of the algorithm for choosing the means of reducing the resistance to movement in the design of ships has been developed, which allows reducing the fuel consumption and the cost of the transported cargo (passengers), as well as the payback period when these funds are introduced on a new or already commissioned ship.

A method has been developed for determining the possibility of reducing the resistance to movement of objects of ocean engineering with established local characteristics as a basis, which is based on the methods of computational fluid dynamics and parametric analysis.

Key words: boundary layer, excavation, air oil, vessels, submarine, resistance minimization, experimental and numerical modeling, computational hydrodynamics, applications and poorly streamlined body.