

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ імені адмірала Макарова**

Мунесан Мохаммад Ібрагім

УДК 629.5.016.8:629.585

**ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ МОРЕХІДНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
ЯКОСТЕЙ ПІДВОДНИХ ЧОВНІВ**

Спеціальність 05.08.03 – Конструювання та будування суден

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Миколаїв 2018

Дисертація є рукописом.

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

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Король Юрій Михайлович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова,
доцент кафедри конструкції та механіки судна

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук ,
провідний науковий співробітник
Нестерук Ігор Георгійович
Інститут гідромеханіки НАН України,

кандидат технічних наук, доцент
Демидюк Олександр Володимирович,
завідувач кафедри «Кафедра теорії та
проектування корабля ім. проф.
Ю.Л.Воробйова»
Одеський Національний Морський Університет.

Захист відбудеться "17" грудня 2018р. о 11³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, проспект Героїв України, 9, ауд. 360

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

Автореферат розіслано

"__" _____ 2018р.
Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради доктор технічних наук,
професор Зайцев В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Ефективність використання малих та середніх підводних човнів суттєво залежить від їх радіусу дії, тобто від дальності плавання і автономності. Тому підвищення цих експлуатаційних якостей є однією з важливих задач проектування підводних човнів, а дослідження засобів її рішення – актуальним.

Одним з напрямків підвищення дальності плавання є зменшення опору руху підводного човна за рахунок оптимізації форми його корпусу. Вплив сукупності параметрів форми корпусу на його опір оцінюється шляхом розв'язування певної послідовності задач аналізу за допомогою експериментального або чисельного методів. Добре відомо, що для підводних човнів, які рухаються на великому зануренні під вільною поверхнею, моделювання в науково-дослідному басейні повинно здійснюватися при рівних з натурою числах Рейнольдса, тобто при фізично нездійсненних швидкостях. З іншого боку, верифікація параметрів *CFD* (Computational Fluid Dynamics) моделювання виконується по результатах фізичного експерименту який не можливо здійснити. Тому і виникає дуже актуальна проблема обґрунтування можливості розв'язування задач аналізу.

Для виконання задач потайного спостереження, вентиляції відсіків та зарядки акумуляторної батареї підводний човен певний час повинен рухатися на перископному, або шноркельному зануренні. При наявності хвилювання та характерних для підводних човнів малих значеннях метацентричної висоти амплітуди кильової та бортової хитавиці можуть бути настільки великими, що стати несумісними з умовами перебування екіпажу і взагалі можливістю функціонування. Тому дослідження хитавиці підводних човнів в цих умовах з метою визначення мінімально безпечної глибини занурення також є актуальним.

Актуальність теми обумовлюється винятковою важливістю комплексного дослідження впливу параметрів форми корпусу підводних човнів на опір руху, можливості здійснення експериментальних досліджень опору в науково-дослідних басейнах та визначенню мінімальної безпечної глибини занурення для здійснення ефективної роботи шноркелю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до положень рішення 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), Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), "Стратегічний флот Ісламської Республіки Іран, необхідність та цілі - Код 1099", було заявлено, що "Іранський морський флот (кораблі та підводні човни повинні мати можливість рухатися вздовж широти 10 градусів (до Індійського океану та Червоного моря)". Згідно з цим документом, малі та середні підводні човни повинні мати можливість рухатися в бурхливих морях. Морська доктрина України на період

до 2035:постанова Кабінету Міністрів України від 7 жовтня 2009р. №1307//ОВУ. – 2009. – №94. – Ст.2136.

Об’єкт дисертаційного дослідження. Об’єктом дослідження є морехідні та експлуатаційні якості малих та середніх підводних човнів, що рухаються при великих і малих зануреннях в умовах тихої води та хвилювання.

Предмет дослідження. Основними предметами дослідження є форма корпусу, гідродинаміка руху та конструкція шноркелю підводних човнів.

Метою дисертаційної роботи є розробка засобів забезпечення ефективної роботи шноркелю в умовах хвилювання та збільшення радіусу дії малих і середніх підводних човнів шляхом зменшення їх опору.

Основні задачі наукового дослідження. Для досягнення мети роботи передбачається вирішення наступних задач:

1. аналіз сучасного стану проблем проектування обводів корпусу підводних човнів та засобів забезпечення морехідності на малих глибинах занурення в умовах хвилювання;
2. експериментальне визначення опору підводних човнів в науково дослідницькому басейні з метою верифікації результатів *CFD* моделювання та удосконалення технології фізичного експерименту;
3. параметричний аналіз характеристик форми корпусу підводних човнів з метою мінімізації його опору;
4. аналізу ефективності заспокоювачів хитавиці для підводних човнів, що рухаються на малих глибинах занурення;
5. оцінка характеристик морехідності підводних човнів при різних умовах експлуатації з метою визначення безпечної глибини занурення;
6. збільшення радіусу дії підводного човна за рахунок визначення оптимальної форми корпусу та вибору належної глибини занурення з мінімальним хвилювим опором.

Методи дослідження. У дослідженні використовувалися чисельні та експериментальні методи гідромеханіки та теорії корабля. Параметричний аналіз впливу умов експлуатації та характеристик форми корпусу підводних човнів на його опір і морехідність здійснювався за допомогою методів *CFD* для ідеальної та реальної рідини. 3D моделі корпусу підводних човнів створювалися за допомогою сучасних САПР (Систем Автоматизованого Проектування), наприклад, SolidWorks.

На захист виносяться основні результати роботи – сукупність теоретичних, методичних та практичних питань пов’язаних із задачею збільшення радіусу дії за рахунок зменшення опору та поліпшення морехідності. Крім того на захист виносяться **наукові положення**, сформульовані на основі рішення задач:

– мінімізації опору підводного човна без виступаючих частин при фіксованих відносних довжинах корпусу і циліндричної вставки може бути здійснена за рахунок форми носової та кормової частин методом параметричного аналізу за допомогою *CFD* моделювання;

–підвищення морехідності в умовах хвилювання під час вентиляції відсіків та зарядки акумуляторної батареї за рахунок визначення безпечної глибини занурення та за допомогою гнучкого шноркелю розробленої системи «Moon-Korol».

Наукова новизна одержаних результатів. У результаті аналізу ефективності використання малих та середніх підводних човнів встановлено, що їх радіус дії суттєво залежить від опору руху та інтенсивності поверхневого хвилювання. Збільшення радіусу дії є однією з важливих задач проектування підводних човнів. Основними засобами вирішення цієї задачі обрано зменшення опору та забезпечення потрібної морехідності під час роботи шноркелю. Наукова новизна отриманих у цьому напрямку результатів полягає в наступному.

1. **Вперше** на основі спільного аналізу даних фізичного і чисельного (методами CFD) експериментів доведено, що при числах Рейнольдса більших ніж $5 \cdot 10^6$ коефіцієнти опору моделі і натури корпусу підводного човна практично постійні, що утворює основу для фізичного моделювання опору підводних човнів у дослідних басейнах.

2. **Вперше** методами параметричного аналізу форми підводних човнів малої та середньої тоннажності шляхом використання систематичних чисельних розрахунків загального опору методами обчислювальної гідродинаміки визначені оптимальні за критерієм мінімуму лобового опору форми носової, кормової частини корпусу та його видовження (L/D).

3. **Вперше** систематичними чисельними розрахунками за допомогою панельного методу та обчислювальної гідродинаміки досліджено морехідність підводного човна, в результаті чого побудовано колові діаграми як теоретичну основу оперативного визначення морехідності відносно амплітуд кильової хитавиці та вертикальних прискорень при різних курсових кутах до хвиль, швидкостях руху та на різних глибинах занурення, що дозволило за допомогою індексу працездатності виявити безпечний рівень заглиблення при патрулюванні в умовах поверхневого хвилювання заданої інтенсивності.

4. **Здобула подальшого розвитку** методика визначення хвильового опору підводних човнів в залежності від глибини занурення за допомогою чисельного моделювання в CFD пакетах *FlowVision* та *Flow3d*, що дало змогу визначити мінімальну глибину занурення малих і середніх підводних човнів з практично відсутнім хвильовим опором.

5. **Здобула подальшого розвитку** технологія експериментального дослідження опору моделей підводних човнів у дослідних басейнах, що, зокрема, дозволило визначити інтерференційну складову опору стійок модельного динамометра, підвищити завдяки цьому точність моделювання і підтвердити коректність результатів, отриманих розрахунками у CFD пакетах *FlowVision* та *Flow3d*.

Практичне значення отриманих результатів.

Доказана можливість здійснення буксирувальних випробувань моделей підводних човнів при великих зануреннях в дослідному басейні, що суттєво розширює можливості наукових досліджень і підвищує якість проектування.

1. Виконано верифікацію засобів *CFD*-моделювання підтверджує їхню високу надійність, економічність і інформативність, що має велике значення для використання цих засобів в практиці наукових досліджень і проектування.

2. Впроваджено *CFD* технологію в процес проектування підводних човнів, що дозволяє за короткий час виконати значно більший обсяг наукових досліджень його морехідних якостей, знайти параметри форми корпусу, що мінімізують опір, та забезпечити безпечне функціонування на малих глибинах занурення в умовах хвилювання.

3. Зменшення опору в зануреному стані, можливість здійснювати вентиляцію відсіків та зарядку акумуляторної батареї при хвилюванні 4-5 балів за рахунок занурення на визначену безпечну глибину безумовно є засобами, що забезпечують суттєве збільшення радіусу дії підводних човнів (за результатами порівняльного аналізу на 9,1% в повністю зануреному стані і в 8,61разів в умовах хвилювання).

Впровадження результатів. Результати дослідження

1. 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. впроваджені у діяльність науково-дослідного басейну Національного Університету Кораблебудування імені адмірала Макарова при експериментальному дослідженні опору об'єктів океанотехніки;

3. схвалені у Siemens corporation, Denmark і будуть використовуватися в процесі конструювання, проектування і модернізації підводних човнів;

4. схвалені у Noran Energy England і будуть використовуватися в процесі проектування і експлуатації ROV, AUV;

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:

– на основі аналізу даних виконаних фізичних та чисельних експериментів доказана можливість визначення опору руху підводних човнів у дослідних басейнах – у працях [1,2,3];

– розроблена серія корпусів підводних човнів, для якої методами обчислювальної гідродинаміки виконано параметричний аналіз впливу показників форми носової та кормової кінцевостей і видовження на опір руху в зануреному стані з метою його мінімізації – у працях [5,6,7,10,12,13,14,17,18,23, 26];

– розроблено і застосовано для визначення умов безпечної експлуатації методики розрахунку морехідних якостей підводних човнів, що рухаються з певним зануренням під вільною поверхнею в умовах хвилювання – у працях [9,23,25];

– за допомогою фізичних і чисельних експериментів досліджено вплив глибини занурення підводного човна на його хвильовий опір – у працях [3,4,8,15,23];

– за допомогою фізичних і чисельних експериментів досліджено вплив стійок динамометра на результати визначення опору моделей підводних човнів в зануреному стані у дослідних басейнах – у працях [3,23].

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

1. Moonesun M. General Arrangement and Architectural Aspects in Midget Submarine / M. Moonesun, P. Charmdooz // USYS (4th-Underwater System Technology) conference. – Malaysia, 2012. – ISBN: 978-983-43178-6-7.

2. Moonesun M. A review study on the bare hull form equations of submarine / M. Moonesun, Y. M. Korol // MIC2014 (16th Marine Industries Conference). – Iran, 2014.

3. Moonesun M. Resistance in submarine shape design / M. Moonesun, Y. M. Korol // NOUS Conference ISOT 2014. – Nikolaev, 2014. – P. 399-403.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 26 наукових праць з яких 10 відображають основні наукові результати і опубліковані в провідних виданнях за спеціальністю 05.08.03 (які входять до науко-метричної бази SCOPUS, що рекомендована переліком ДАК МОН України), з яких одна без співавторів. 12 праць з співавторами за темою дисертації опубліковано в виданнях за тією ж спеціальністю, які входять до інших науко-метричних баз Азіатського регіону, але не входять в перелік ДАК МОН України. В співавторстві з науковим керівником в видавництві Lambert Academic Publishing за матеріалами дисертації надруковано книгу «Naval Submarine Body Form Design and Hydrodynamics» [23]. Окрім цього здобувачем разом з науковим керівником оформлена заявка (U21804207) на корисну модель гнучкого шноркелю системи «Moon-Korol». Результати дисертаційної роботи були презентовані й отримали позитивну оцінку на 3 науково-технічних конференціях тези доповідей яких опубліковано в Малайзії, Ірані і Україні.

Структура роботи. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновку, списку використаних літературних джерел і додатків. Дисертація містить 149 сторінок основного матеріалу, 74 рисунків, 40 таблиць, зокрема: 139 сторінок основного тексту, 10 сторінок списку використаних джерел (125 найменування) та 17 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** роботи наведено обґрунтування актуальності теми дисертації, визначено мету та завдання дослідження, показано наукову новизну і практичне значення роботи, наведено положення, що виносяться на захист.

У першому розділі сформульована і обґрунтована мета дослідження, яка полягає в розробці засобів забезпечення ефективності роботи шноркелю в умовах хвилювання та збільшення радіусу дії малих і середніх підводних човнів шляхом зменшення їхнього опору. Далі виконано огляд літератури, в якому зазначені класичні роботи Діна, Урселла, Огілві, Чапліна, Йу та інших авторів, що визначали гідродинамічні сили на занурених тілах під час їхнього коливання, або під дією хвиль за допомогою теорії потенціалу швидкості руху рідини. Відмічається наближеність цих методів і низька практична цінність для цілі дослідження. Також виконаний огляд сучасних засобів фізичного і чисельного дослідження в якому підкреслюється проблема обґрунтування можливості виконання фізичного моделювання руху повністю занурених підводних човнів. Після огляду літератури, можна стверджувати, що приблизно всі попередні дослідження базуються на потенційному потоці ідеальної рідини. Для моделювання 3D-об'єктів та розрахунку їх гідродинамічних коефіцієнтів слід використовувати методи, такі як теорія смуги та конформне відображення, які в основному несумісні з зануреним тілом. Але використання цих методів для підводних човнів буде ефективним лише на ранніх етапах розробки. На цих ранніх стадіях достатньо оціночних та наближених значень. Як кращий варіант, для виконання наступних етапів і отримання більш інформативних і ретельних результатів використовують моделі підводного човна з точною 3D-формою, а також чисельні розрахунки за методами *CFD*. Чисельні методи є більш трудомісткими, ніж аналітичні, але вони дають кращі результати. Існує кілька програм *CFD*, здатних моделювати океанські хвилі (регулярні або нерегулярні). Прикладом може бути *Flow-3D*, *IOWA* та *OpenFOAM*. Також наша увага буде зосереджена на панельному методі шляхом моделювання в програмному забезпеченні *Maxsurf*.

Основною метою дослідження вибрано забезпечення безпечної роботи шноркелю в умовах хвилювання та збільшення радіусу дії підводного човна. Організація процесу дослідження наведена на рисунку 1.

Максимальний радіус дії підводного човна, що згідно з рисунком 2

дорівнює $r_{\max} = \frac{1}{2} (2L_1 + L_2)$, можна розрахувати за формулою

$$r_{\max} = \frac{1}{2} \frac{R_{prt}^*}{\kappa_{prj}} \sum_{i=1}^{N+1} u_i t_i^* + \frac{R_{prj}}{\kappa_{prj}} \sum_{j=0}^N u_j t_j^*,$$

де R_{prt}^* і R_{prj}^* опір прототипу і проекту відповідно, u_i і t_i – середня швидкість та час руху на великій глибині занурення; R_{prt} і R_{prj} опір прототипу і проекту відповідно, u_j і t_j – середня швидкість та час руху на шноркельній глибині, а $u_0 = 0$; N – кількість можливих режимів руху на шноркельній глибині. Очевидно, що чим більше $r_{\max}$, тим вище ефективність підводного човна.

Розглянемо ретельніше характеристики, що впливають на $r_{\max}$. Перш за все це величина N , яка залежить від запасів палива, постачання та інтенсивності

морського або океанського хвилювання у районі дії підводного човна. Під час руху на шноркельній глибині при поверхневому хвилюванні підводний човен буде здійснювати хитавицю, амплитуди якої можуть досягати величин не сумісних з процесами вентиляції відсіків та зарядки акумуляторної батареї.

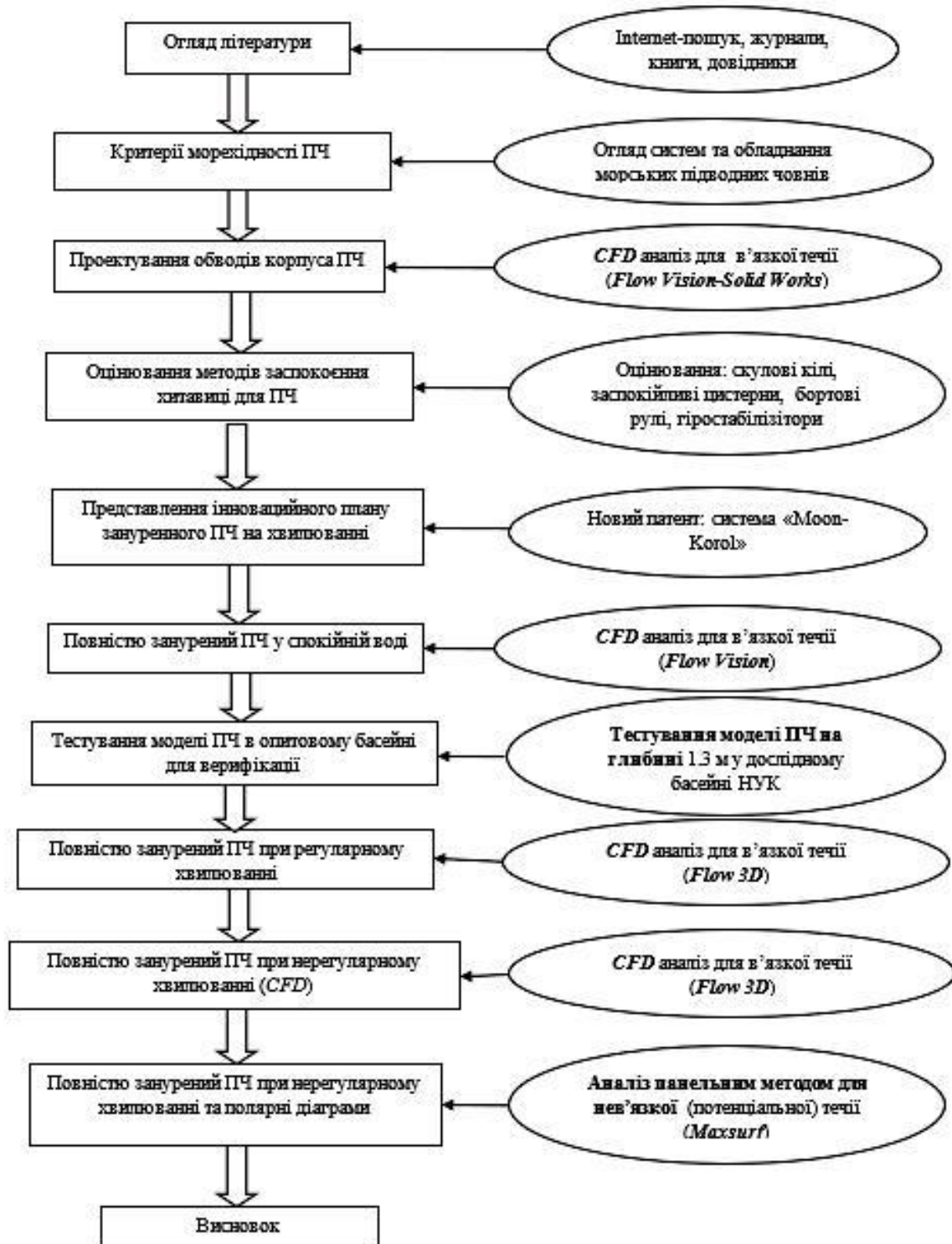


Рисунок 1 – Етапи і методи дослідження

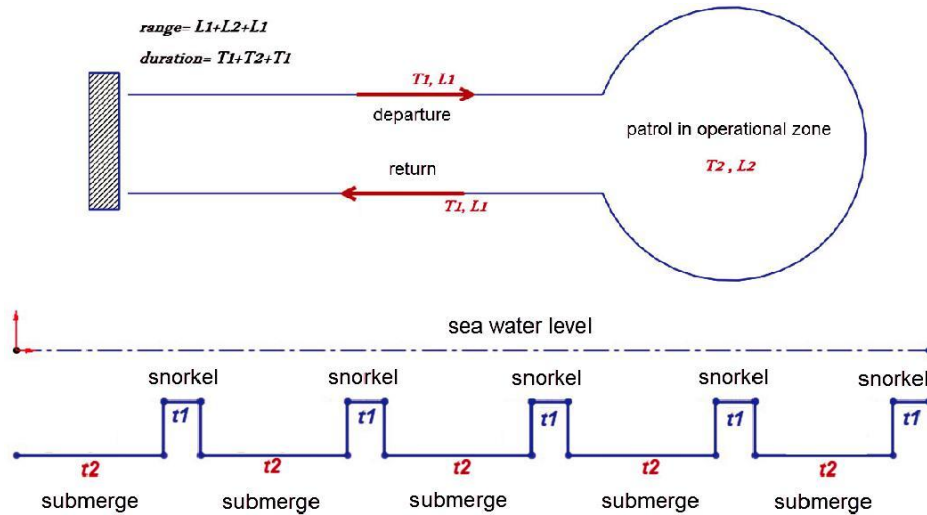


Рисунок 2 – Загальний вигляд траєкторії руху та циклограма роботи підводних човнів

Так, наприклад, для малих підводних човнів класу «Гадир» водотоннажністю 120 т та середніх підводних човнів класу «Фатех» водотоннажністю 500т у районах дії морського хвилювання 4-5 балів використання встановлених на них шноркельних систем неприпустимо і тому величина N зменшується, а, відповідно, зменшується і $r_{\max}$. Якщо хвилювання відсутнє, то N приймає максимальні значення і величина $r_{\max}$ для проекту буде залежати від R_{prj} та R^*_{prj} . Чим значення цих опорів менше – тим більше $r_{\max}$.

Другий розділ дисертації містить наступні дослідження: спектр нерегулярних хвиль, складові морехідності, CFD-моделювання та панельний спосіб дослідження.

Для опису нерегулярного хвилювання обґрунтовано використання спектру

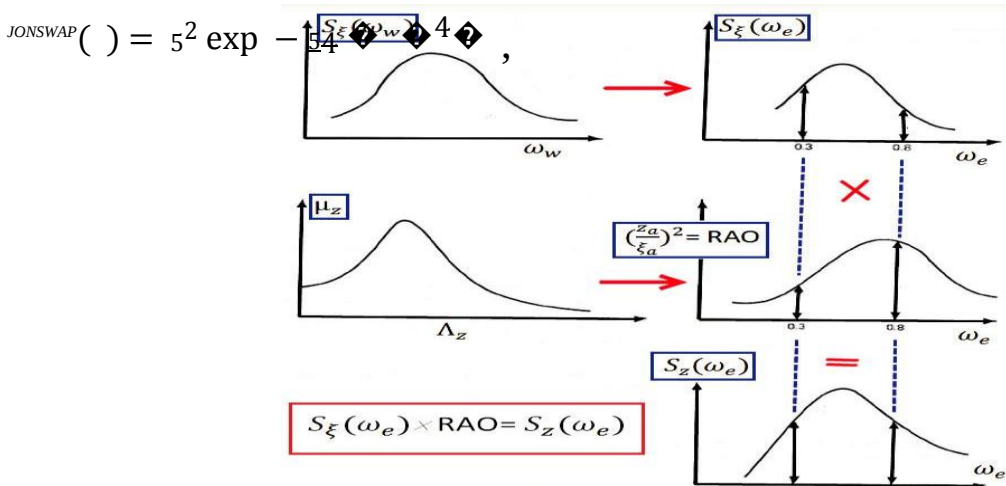


Рисунок 3 – Прогнозування руху судна в умовах нерегулярного хвилювання

$$= 0.076 \quad ; 10$$

9

де ω – швидкість вітру на висоті 10 метрів над вільною поверхнею води; L – відстань від берегу; g – прискорення сили тяжіння;

частота¹⁰

2

ХВИЛЬОВА

Рух судна в умовах нерегулярного морського хвилювання визначається наступними кроками:

1. для конкретного морського шляху, в якому судно повинне працювати вибирається відповідний хвильовий спектр;
2. далі хвильовий спектр перетворюється в спектр, де розглядається частота зіткнень, а не абсолютна частота хвилі (рисунок 3). Однак площа модифікованого спектру збігається з площею вихідного, оскільки загальна енергія залишається незмінною;
3. будується графік, на якому ординати представляють собою амплітуду руху (кільова, бортова або вертикальна хитавиця), а абсциси - розподіл частот, який можна отримати аналітично або експериментальним шляхом з регулярними або нерегулярними хвилями в дослідному басейні;
4. діаграма, що отримана на 3-му кроці, модифікується таким чином, щоб ординати представляли співвідношення квадрата амплітуди руху, поділеної на квадрат амплітуди хвилі (ця діаграма називається оператором амплітуди відгуку (RAO) або просто "спектром перетворення");
5. спектр амплітуди руху знаходять шляхом множення ординат трансформованого хвильового спектру на ординати RAO для відповідних заданих частот;
6. нарешті, площа під спектром амплітуди руху визначається для того, щоб отримати необхідні характеристики руху (наприклад, середня, середня однієї третини максимальної, або середня однієї десятої максимальної амплітуди руху).

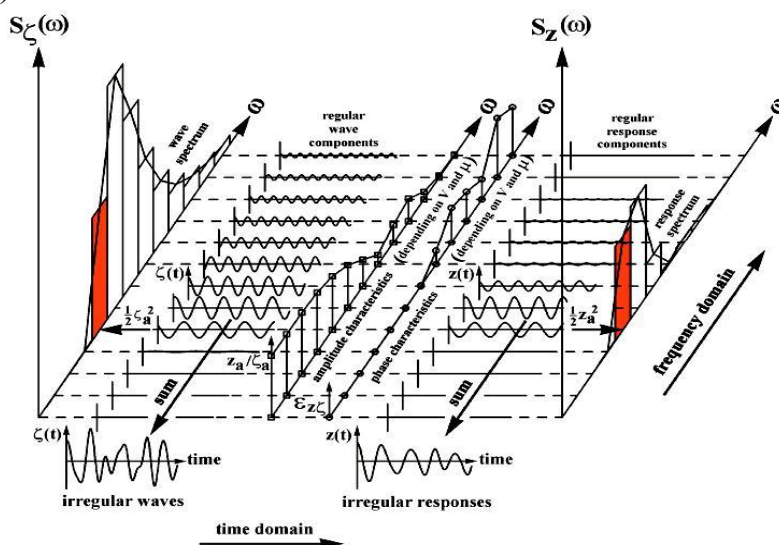


Рисунок 4 – Взаємозв'язок хвильового спектру і спектра відгуку за часовою і частотною шкалою

Рисунок 4 описує зв'язок між хвильовим спектром і спектром відгуку в концепції часової та частотної областей.

Для визначення гідродинамічних сил, що діють на підводний човен під час руху на різних глибинах занурення в умовах тихої води і хвилювання використовуються CFD пакети *FlowVision* і *Flow3D* для яких обґрунтовано вибір математичної моделі руху в'язкої рідини *RANS* і *k - ε* моделі турбулентності, а також визначена методологія чисельного моделювання.

Визначення параметрів хитавиці підводних човнів під час руху на різних глибинах занурення і різних курсових кутах в умовах хвилювання зручно здійснювати в середовищі *Maxsurf Seakeeping*, в якому гідродинамічні сили визначаються за допомогою панельного методу. Недоліки цього методу добре відомі (дуже мала швидкість поздовжнього руху), але для цього дослідження з похибкою в безпечному напрямку доведено, що цей недолік є несуттєвим.

Третій розділ роботи присвячено експериментальному визначенню опору руху підводних човнів в дослідному басейні. Добре відомо, що коефіцієнт

загального опору $C_D = \frac{2R_D}{\rho u^2 \Omega} = C_F + C_{VP} + C_W + \Delta C$ складається з

- коефіцієнта тертя C_F , що залежить від числа Рейнольдса $Re = u L / \nu$ і практично не залежить від форми корпусу (R_D - загальний опір);
- коефіцієнта опору форми C_{VP} , що залежить від форми корпусу і числа Рейнольдса (ρ - густина води, u - швидкість руху);
- коефіцієнту хвильового опору C_W , що залежить від форми корпусу і числа Фруда $Fr = u / \sqrt{gL}$ (L , Ω - довжина і змочена поверхня корпусу);
- коефіцієнту додаткових частин опору ΔC (виступаючі частини, шорсткість і т.і.).

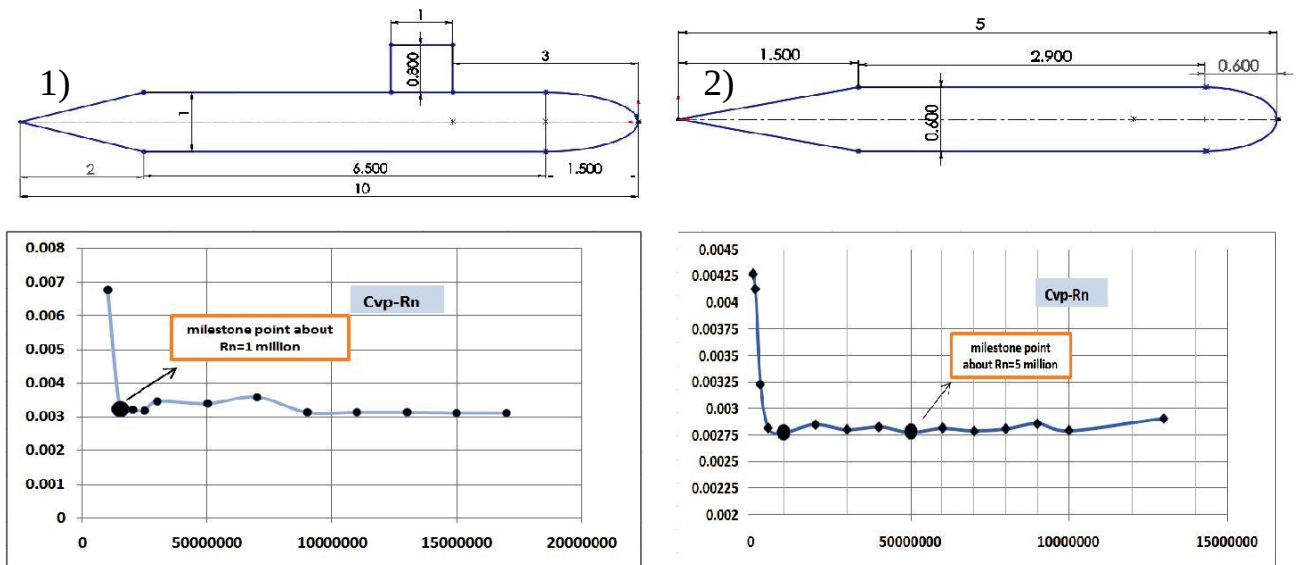


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнту C_{VP} (Re) для натурних об'єктів 1) і 2)

В зануреному стані хвильовий опір підводних човнів практично відсутній, тому для здійснення моделювання в дослідному басейні необхідною умовою є рівність чисел Рейнольдса для моделі і натури, що є фізично не здійсненним.

Саме це стримувало проведення буксирувальних досліджень для підводних човнів і апаратів. Тому з метою усунення цієї проблеми було виконано *CFD* випробування двох натурних підводних човнів, результати яких наведено на рисунку 5, де згідно з європейськими стандартами $Rn = Re$; $Fn = Fr$.

В дослідному басейні Ісфаганського технологічного університету виконані буксирувальні дослідження моделі підводного човна «*Tango nose*» з масштабом 1/32. Результати дослідження в порівнянні з попередніми об'єктами 1) і 2) для коефіцієнту загального опору C_D (Re) наведено на рисунку 6.

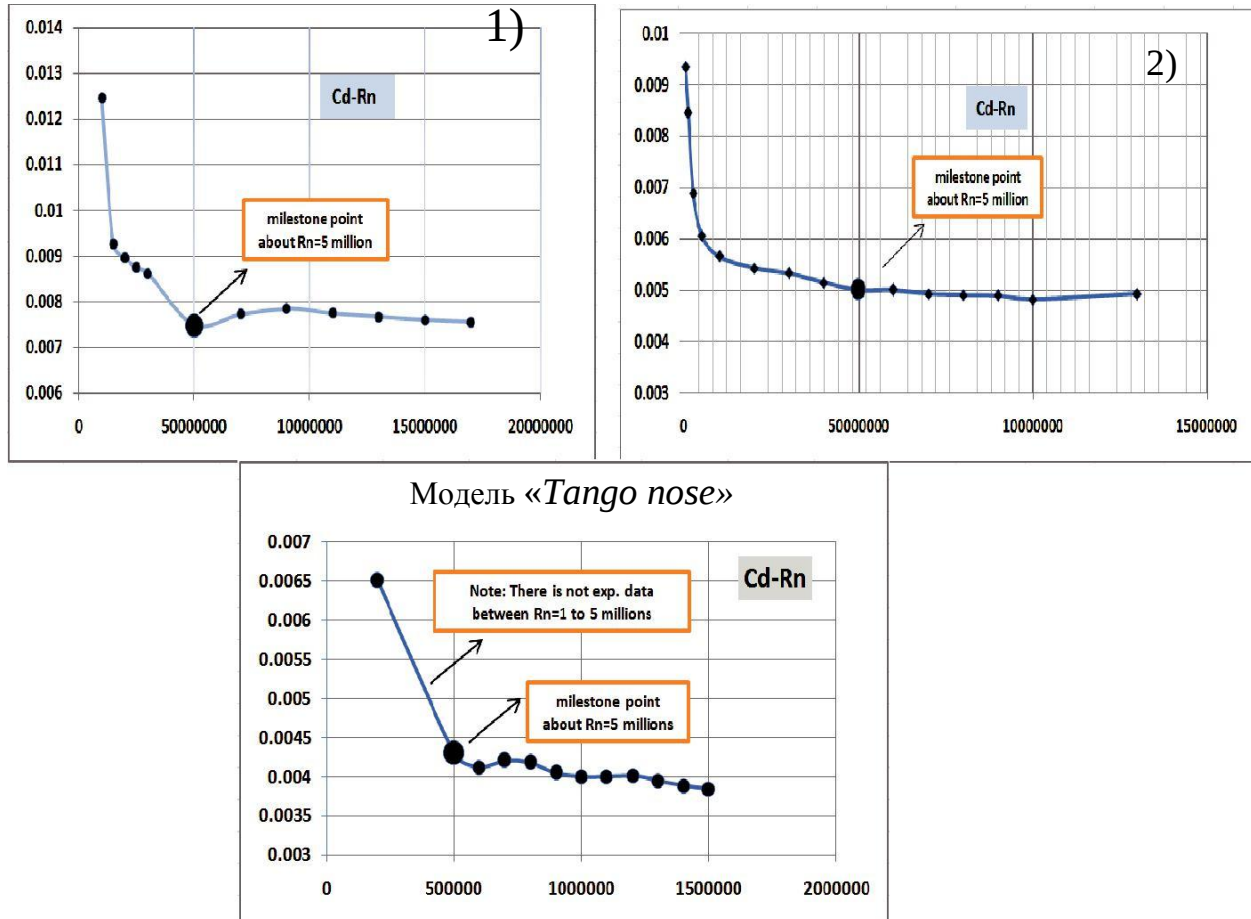


Рисунок 6 – Залежність C_D (Re) для натурних об'єктів 1) і 2) і моделі «*Tango nose*»

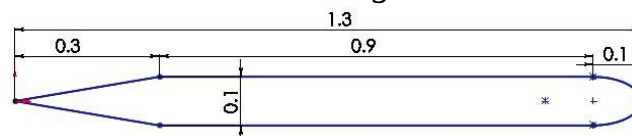


Рисунок 7 – Геометричні характеристики моделі *Persia 110*

Аналіз отриманих залежностей C_{VP} (Re) дозволяє зробити дуже важливий з практичної точки зору висновок-зона автотельності (зона незалежності від числа Re) коефіцієнтів форми для повністю занурених підводних човнів починається з $Re = 10^6$, що дозволяє по-перше обґрунтувати можливість проведення буксирувальних досліджень в дослідному басейні і по-друге – здійснювати перерахунок результатів цих модельних досліджень на натуру за звичайною схемою. Окрім того, залежності C_D (Re), наведені на рисунку 6,

свідчать про те, що і для коефіцієнта повного опору також існує зона автmodelьності, але починається вона з $Re = 5 \cdot 10^6$.

Вплив вільної поверхні для моделі *Persia 110* з геометричними характеристиками, наведеними на рисунку 7 досліджувався в дослідному басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Метою цього дослідження була верифікація CFD пакету *Flow3D* та визначення впливу стійок динамометра на результати фізичного експерименту. По-перше були визначені параметри CFD моделювання, такі як граничні умови, розміри розрахункового боксу, блоки розрахункової сітки (бокс – 10^6 , корпус – 10^6 та для умов занурення на глибину шноркеля стійки – $2,5 \cdot 10^6$ чарунок кубічної форми), крок за часом $\Delta t = 0,0003 - 0,0005$ с, час моделювання – 10с. Порівняння результатів фізичного і чисельного моделювання наведено на рисунку 8 і свідчить про їхній добрий збіг.

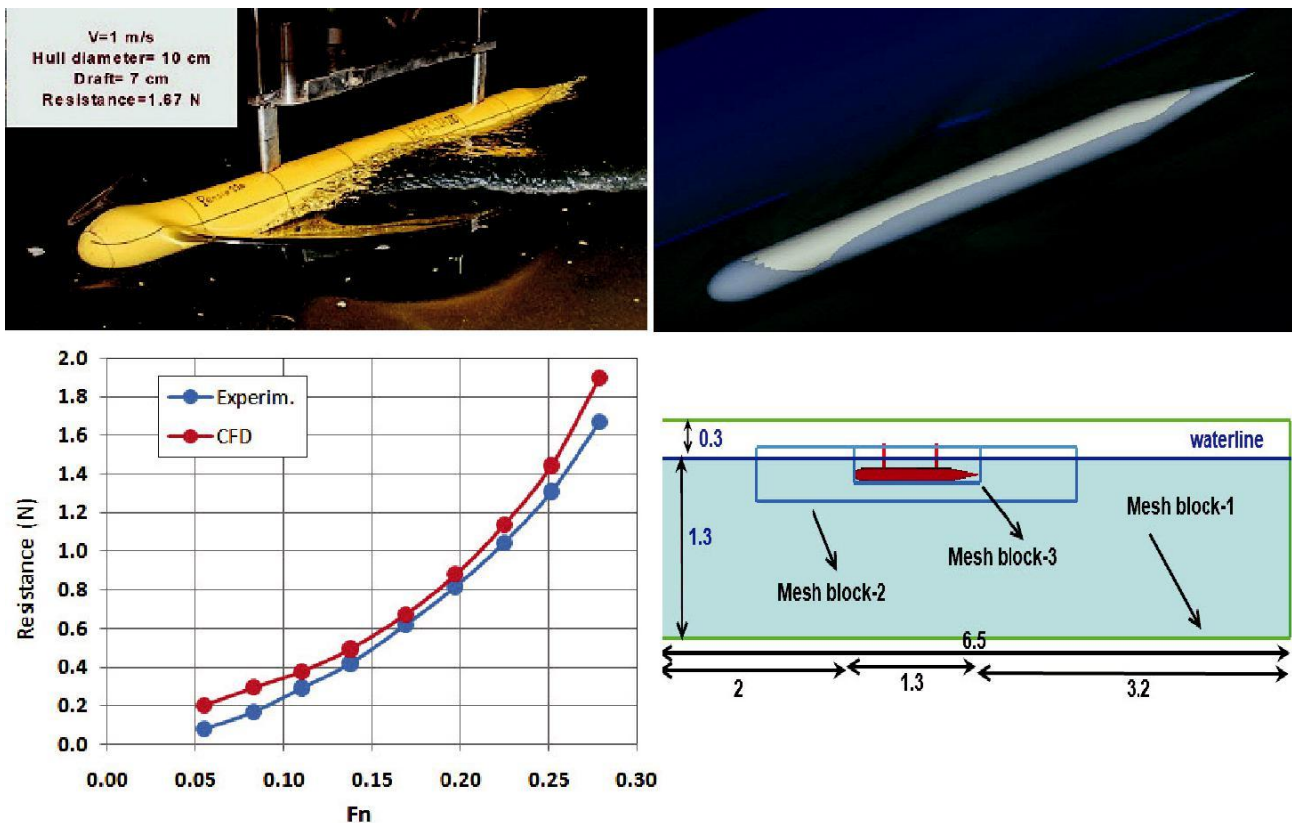


Рисунок 8 – Порівняння результатів визначення опору підводних човнів за допомогою *CFD* та експериментальних методів

При заглибленні під вільну поверхню до опору підводного човна додається опір стійок динамометра. Як правило, опір стійок динамометра визначався додатковими буксировками стійок без корпусу і далі вилучався із опору системи корпус + стійки. При цьому виникала похибка, бо опір стійок без корпусу більший ніж в його присутності. За допомогою *CFD* моделювання встановлено, що опір стійок, визначений за допомогою буксирування, треба зменшити на 30%. Таким чином удосконалено методику експериментальних досліджень підводних човнів у дослідних басейнах.

Четвертий розділ роботи присвячено оптимізації форми голого корпусу з метою мінімізації його опору. У вступі до цього розділу виконано аналіз робіт з цього напрямку, в результаті якого для визначення впливу параметрів форми корпусу підводних човнів, що зображені на рисунку 9 застосовуються наступні рівняння:

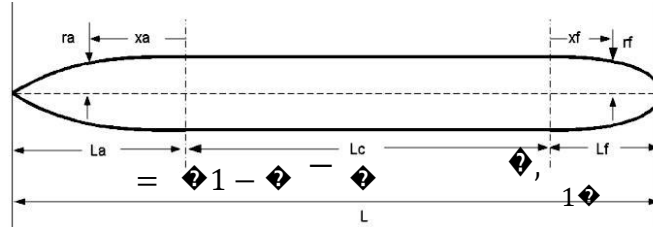


Рисунок 9 – Координати та параметри корпусу підводного човна

де r_a, r_f – радіуси

x_a, x_f –

L_a, L_c, L_f –

частин корпусу, L – довжина кормової, носової і середньої частини корпусу, $D=2R$ – діаметр корпусу, L/D – довжини кормової, носової і середньої частини корпусу, n_f, n_a – фактори повноти кормової та носової частин.

дослідження була створена серія з 11 корпусів підводних човнів з однаковими загальними характеристиками, наведеними в таблиці 1 і різними факторами n_f, n_a що послідовно змінюються від 1,35 до 4,00.

Таблиця 1 - Основні характеристики моделей

v	L	L_f	L_c	L_a	$D=2R$	L/D
м/с	м	м	м	м	м	-
10,0	7,0	2,4	1,0	3,6	1,0	7,0

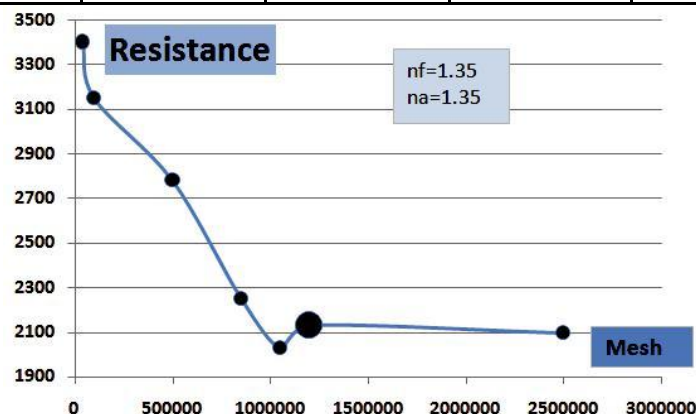


Рисунок 10 - Оцінка впливу кількості чарунок сітки

Далі в *CAD SolidWorks* будуються 3D моделі корпусів і випробувального боксу для створення проектів у *CFD FlowVision*. Вплив кількості чарунок сітки на результати розрахунків оцінювався за допомогою експоненціального методу послідовного збільшення їх кількості. Характерна залежність опору моделі в ньютонках від кількості чарунок наведена на рисунку 10, з якої добре видно, що

починаючи з кількості чарунок $N_m = 1,2 \cdot 10^6$ подальше збільшення їх числа не є необхідним. Тому всі подальші дослідження виконувалися для сітки з $N_m \approx 1,2 \cdot 10^6$.

вигляді залежності коефіцієнта повного опору C_t і коефіцієнта

(*Semnan*) від номеру моделі, з яких добре видно, модель №3 є найкращою з параметрами $n_f = 1,35$ і $n_a = 4,00$. Таким чином ми визначили модель з найкращою формою корпусу. У таблиці 2 приведено порівняння радіусу дії прототипу та проекту зі знайденою найкращою формою.

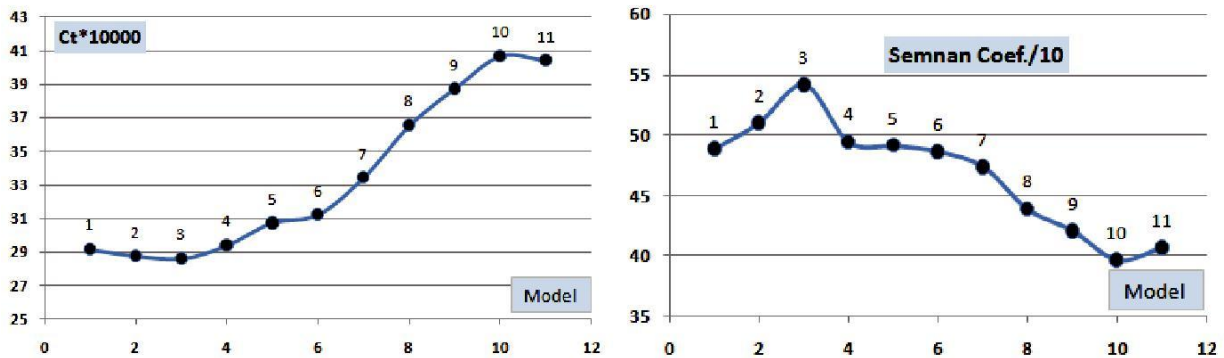


Рисунок 11 – Залежність коефіцієнта повного опору і *Semnan* коефіцієнта від номеру серійної моделі

Таблиця 2 - Вплив форми корпусу на радіус дії підводного човна

	na	nf	L (m)	V (m/s)	Ct*10000	R (N)	t(hr)	R.R (km)	Increase (%)
Model-10	2.75	4	7	10	40.64	3812	10	180	-
Model-3	4	1.35	7	10	28.6	2456	10	279	55%

П'ятий розділ дисертації містить оцінку ефективності застосування стабілізуючих систем на підводних човнах. В результаті ретельного аналізу розташування приміщень, механізмів, устаткування пристроїв і систем встановлено, що коефіцієнт використання об'єму на підводних човнах дуже високий і спроба встановлення додаткового обладнання неодмінно приводить до збільшення його розмірів і водотоннажності. Другою особливістю підводних човнів є їх мала остійність, що становить велику перешкоду їхньому використанню в умовах поверхневого хвилювання, особливо під час вентиляції відсіків і зарядки акумуляторної батареї навіть при використанні шноркелю. Особливо небезпечним для малих і середніх підводних човнів є хвилювання 4-5 балів з висотою хвилі 1,5 – 3 метри.

Найпростішим пасивним заспокоювачем хитавиці є скулові килі, які здатні зменшити амплітуду бортової хитавиці до 26%, але зовсім не ефективні для заспокоювання кільової хитавиці.

Іншим засобом заспокоювання хитавиці є стабілізуючі цистерни, в якості яких можна використовувати всі існуючі на підводному човні цистерни, об'єм яких може досягати 40% загального об'єму. На етапі проектування необхідно

визначити, чи є компенсаційні баластні резервуари достатніми для усунення всіх можливих змін ваги підводного човна та x координати розташування центру тяжіння. Для цього вплив кожної цистерни побудований як функція ваги та моменту, як показано на рисунку 12. Багатокутник, що приведений а цьому рисунку вказує на максимальний вплив, який може бути досягнутий системою баластних резервуарів для стабілізації. За допомогою цього багатокутника дуже зручно розглядати варіанти використання цистерн, але результати свідчать про те, що це не є ефективним засобом керування деферентом (див. рис. 12.а). Для всіх варіантів моменти хвиль набагато більші, ніж моменти від цистерн. Для того, щоб ефективно використовувати стабілізуючі цистерни, необхідно збільшити їх об'єм від 2 до 3 разів (див. рис. 12.б). Таким чином, і цей засіб стабілізації кильової хитавиці не є ефективним.

Нарешті заспокоювачами хитавиці можуть бути бортові керувальні рулі. Добре відомо, що вони можуть на 90-95% зменшувати амплітуди бортової хитавиці, але за рахунок малої площі не можуть бути ефективними для заспокоювання кильової хитавиці. Розрахунки показують, що для створення необхідних стабілізуючих моментів співвідношення загального розмаху рулів до довжини човна повинно бути не менш ніж 0,76 як зображено на рисунку 13.

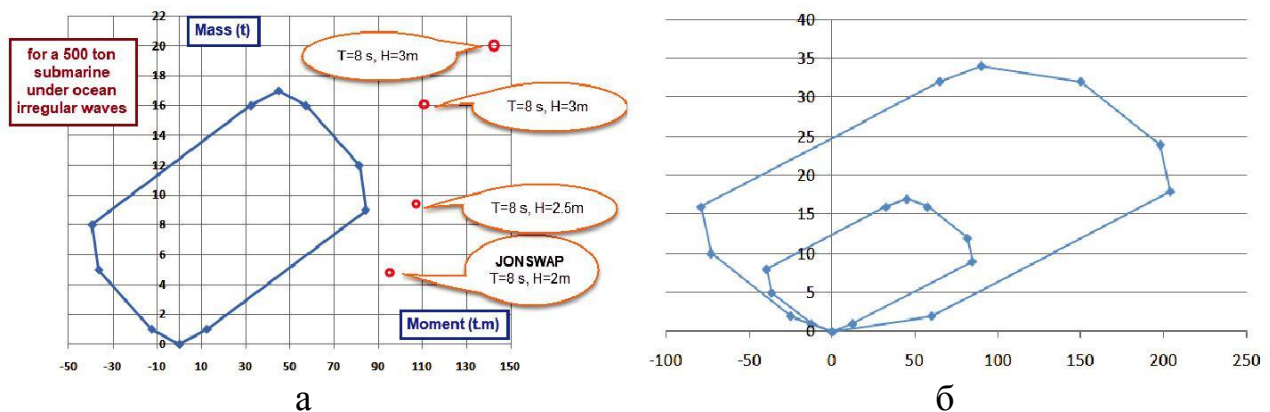


Рисунок 12 – Порівняння хвильового моменту та моменту цистерн

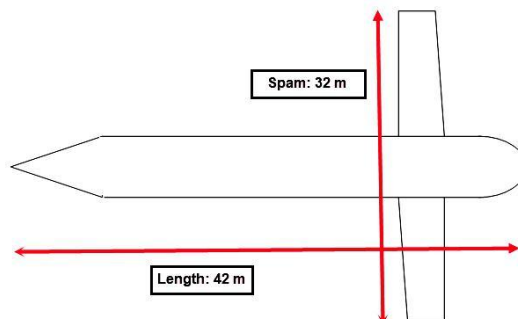


Рисунок 13 – Розрахункові розміри переднього руля для скасування хитавиці індукованої хвильовими моментами

Встановлення такого руля приведе до збільшення опору на 36% і суттєвого збільшення потужності його приводу, що не є доцільним.

Досить ефективним засобом є гіроскопічні заспокоювачі хитавиці, які можуть зменшувати кути бортової хитавиці на 90% і кільової – на 45%. Але значні габарити і вага потребують збільшення довжини підводного човна приблизно на 10-13%, що приводить до збільшення опору і, крім того, створюють певні проблеми для переміщення екіпажу вздовж човна.

Таким чином, всі розглянуті засоби заспокоювання хитавиці підводних човнів мають суттєві недоліки і не можуть бути ефективними в умовах хвилювання. На нашу думку єдиним засобом уникнення небажаних наслідків хитавиці є зменшення її інтенсивності за рахунок збільшення глибини занурення при роботі шноркелю. Щогла звичайного жорсткого шноркелю має обмежену довжину, яка не відповідає безпечним умовам її експлуатації на хвилюванні. Тому для уникнення цієї проблеми була запропонована система «Moon-Korol» з гнучким шноркелем яка складається з бую позитивної плавучості та гнучкого подвійного шлангу типу «труба в трубі», по трубах якого здійснюється відвід вихлопних газів дизеля і забір свіжого повітря (див. рисунок 14). Довжина гнучкої частини значно більша за довжину щогли звичайного шноркеля і дозволяє занурюватися на безпечну глибину. Окрім того, труби гнучкого шноркелю системи «Moon-Korol» ховаються в корпусі, а буй в огороженні рубки, що не створює додаткового опору при русі в підводному положенні.

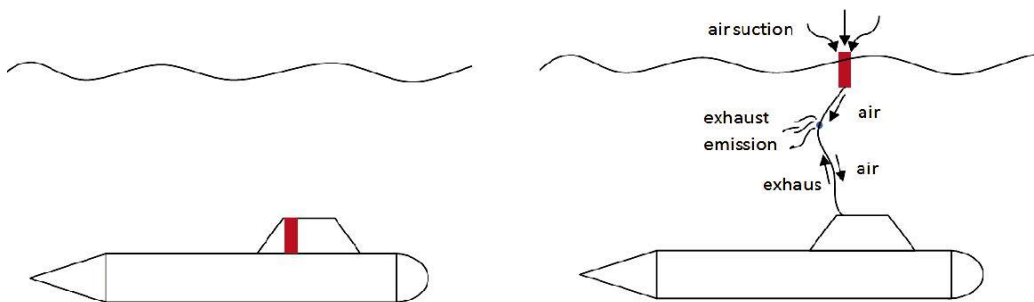


Рисунок 14 – Схема системи «Moon-Korol»

В шостому розділі виконується оцінка морехідних якостей підводних човнів з метою визначення безпечної глибини занурення при 4-5 бальному поверхневому хвилюванні. Спочатку для оцінки морехідних якостей підводних човнів формуються характерні критерії і визначаються їхні значення. Це – кути крену, диференту, вертикальне та бокове прискорення, частоти виникнення слемінгу та ультразвукового куполу, приглушеність ультразвукового гідроакустичного пристрою, ймовірність оголення гребних гвинтів, акумуляторна економічність і затоплення щогли шноркелю. Числові значення цих критеріїв визначені для двох умов, а саме для розташування підводного човна на поверхні і на глибині шноркелю.

Далі визначалася глибина повного занурення, тобто глибина починаючи з якої відсутній вплив поверхневого хвилювання на параметри руху. Спочатку розглянемо залежність хвильового опору від глибини занурення при відсутності поверхневого хвилювання. Дослідження виконувалося в CFD пакеті *FlowVision* для двох моделей *A* ($L=5\text{м}$, $L/D=8$) і *B* ($L=4\text{м}$, $L/D=20$) при однаковій швидкості в 5м/с. Результати дослідження представлені на рисунку 15, з якого видно, що

хвильовий опір зникає при відносному зануренні $H^* = h / D = 4,5$ і ця глибина при відсутності хвилювання і є «глибиною повного занурення». «Граничною глибиною» будемо називати глибину до якої відбувається різке зменшення хвильового опору і яка дорівнює для обох моделей $h = 0,12L$ (на рисунку 15 – h – глибина занурення в метрах). У таблиці 3 наведено порівняння радіусів дії підводного човна в залежності від глибини занурення. Дослідження впливу регулярного поверхневого хвилювання на амплітуду кільової хитавиці при різних зануреннях моделі підводного човна (*Persia 110*) виконано в *CFD* пакеті *Flow3D*. Розрахунковий бокс має розміри $12,0 \times 2,6 \times 4,0$ метри. По вільній поверхні розповсюджується регулярна прогресивна хвиля довжиною $\lambda = 1,56$ м, висотою $0,18$ м зі швидкістю $C = 1,56$ м/с. Результати розрахунку наведені на рисунку 16, що містить залежність середньо квадратичної амплітуди кільової хитавиці від глибини занурення в долях від λ .

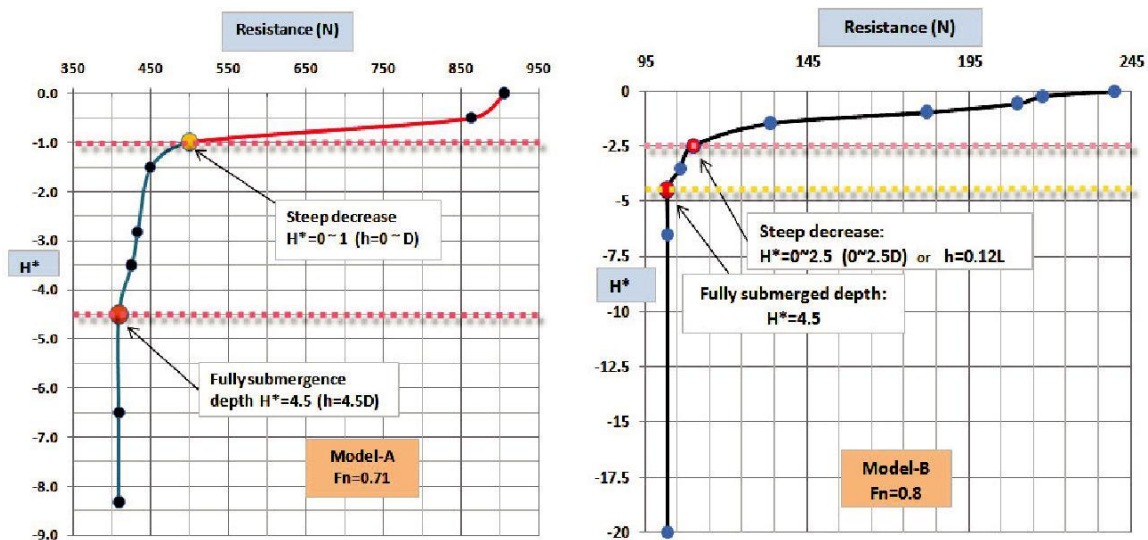


Рисунок 15 – Гранична глибина і глибина повного занурення для моделей А і В

Таблиця 3 - Вплив глибини занурення на радіус дії підводного човна

Depth	Depth (m)	V (m/s)	t(hr)	R(N)	R.R (km)	Increase (%)
0.5D	0.3	5	5	864	45	-
6.5D	3.9	5	5	410	94.8	110

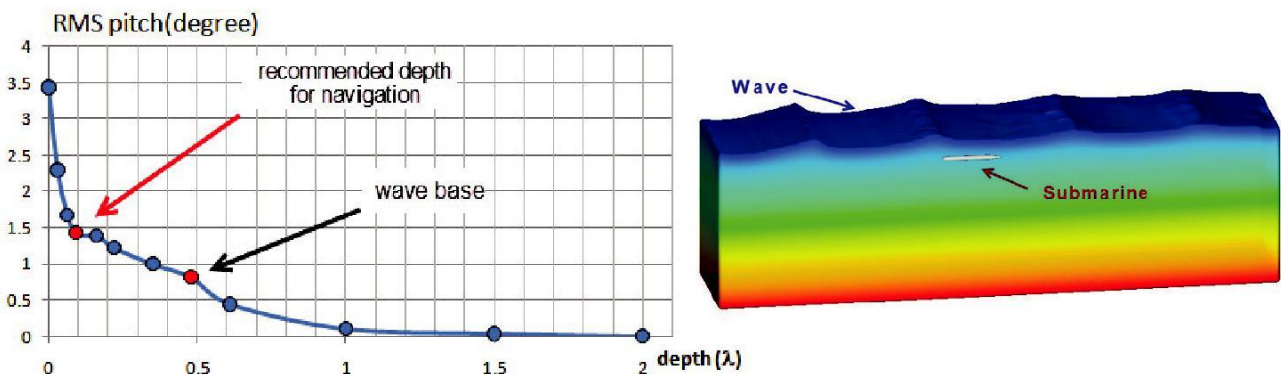


Рисунок 16 – Залежність середньо квадратичної амплітуди кільової хитавиці від глибини занурення в долях від λ

Згідно результатам цього дослідження, занурення $h=0,1\lambda$ є достатньо для безпечної експлуатації, а відома рекомендація глибини занурення $h=\lambda/2$ є завищеною.

Більш ретельний аналіз базової і безпечної глибин занурення в умовах нерегулярного хвилювання зі спектром *JONSWAP* в залежності від швидкості поздовжнього руху і курсового кута виконано в модулі *Seakeeping* середовища *Maxsurf* за допомогою панельного методу дослідження. Досліджувалася хитавиця підводного човна, розміри і конфігурація якого наведені на рисунку 17.

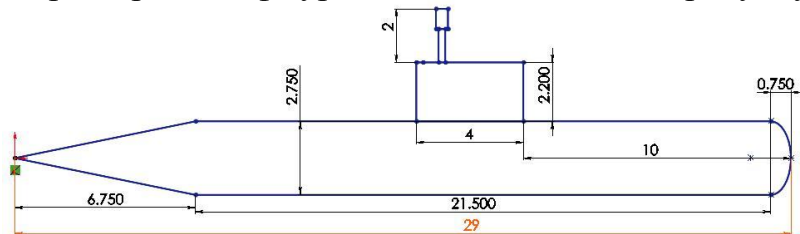


Рисунок 17 – Схема підводного човна для дослідження в *Seakeeping*

Результати розрахунків для курсового кута 180° і швидкості в 9 вузлів для амплітуд кильової і вертикальної хитавиці при довжині хвилі 100 м. і висоті – 2м. приведені на рисунку 18 з якого видно, що безпечною є глибина $0,1\lambda$.

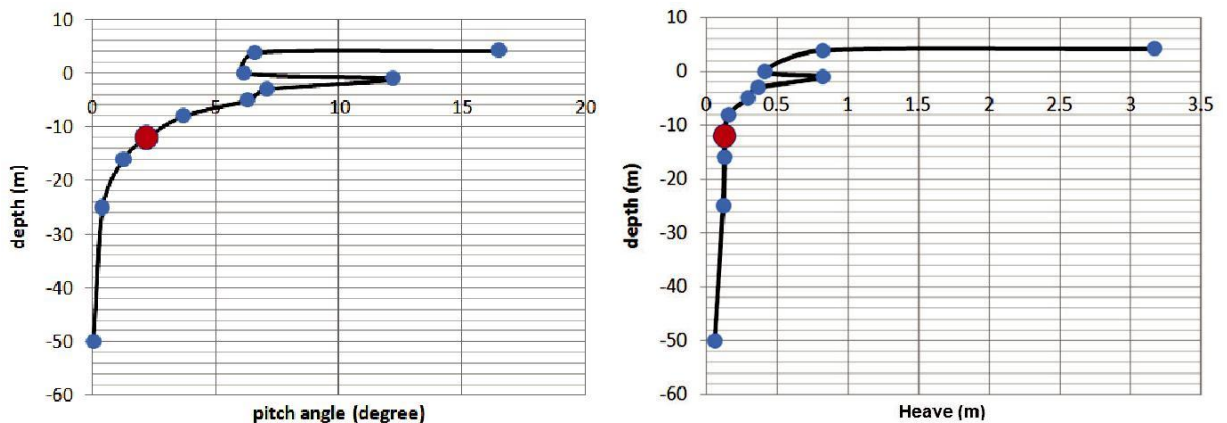


Рисунок 18 – Залежність амплітуд кильової і вертикальної хитавиці від глибини занурення

Для інших курсових кутів і швидкостей руху результати розрахунків оформлені у вигляді полярних діаграм, запропонованих компанією *Comstock*, які разом з індексом працездатності О.І. дуже яскраво ілюструють безпечні параметри руху на заданій глибині занурення (див. рисунок 19).

Також в цьому розділі методом *CFD* моделювання ретельно досліджено підсмоктуючу дію хвилювання і вплив твердих стінок на опір і параметри руху.

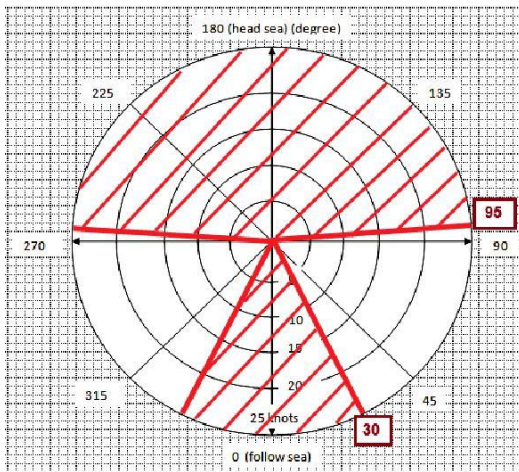
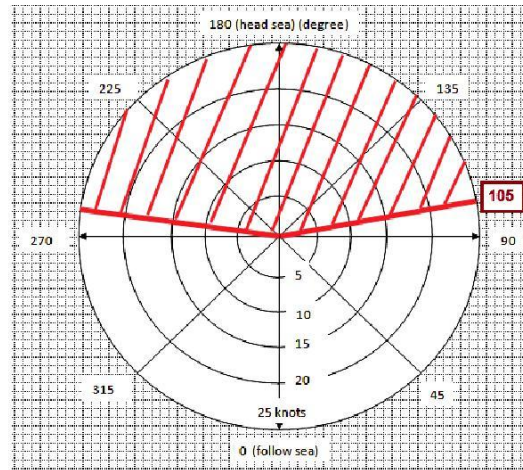
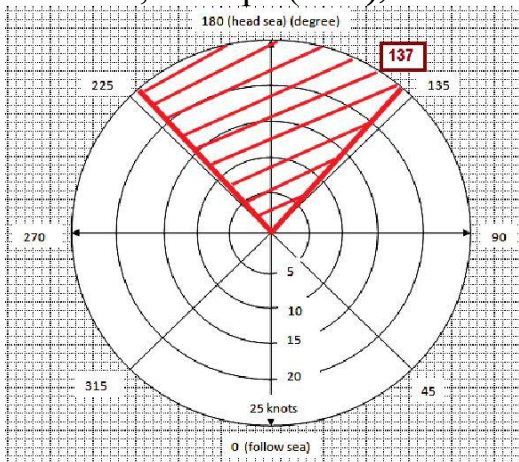
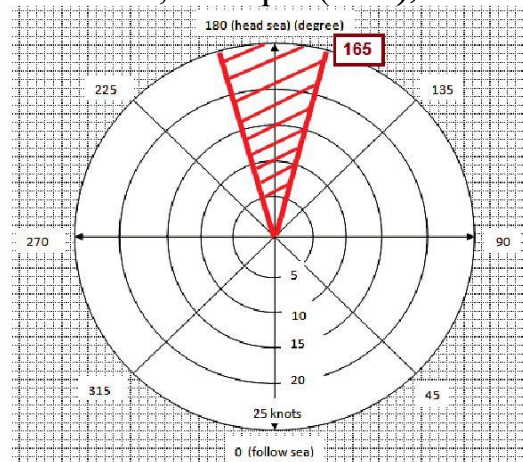
Глибина, 3 метра ($\lambda/33$), O.I= 36 %Глибина, 5 метрів ($\lambda/20$), O.I= 58 %Глибина 8 метрів ($\lambda/12.5$), O.I= 76 %Глибина 12 метрів ($\lambda/8.3$), O.I=92%

Рисунок 19 – Зона і параметри безпечного руху

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У результаті проведеного аналізу ефективності використання малих та середніх підводних човнів встановлено, що їх радіус дії суттєво залежить від опору руху та інтенсивності поверхневого хвилювання. Збільшення радіусу дії є однією з важливих задач проектування підводних човнів, а дослідження засобів її рішення – актуальним. Основними засобами вирішення цієї задачі обрано зменшення опору та забезпечення потрібної морехідності під час роботи шноркелю.

За допомогою експериментальних та чисельних методів у результаті дисертаційного дослідження отримано наступні нові теоретичні та практичні результати: доведена можливість здійснення експериментального визначення опору малих і середніх підводних човнів в науково-дослідних басейнах, виконано комплексне дослідження впливу параметрів форми корпусу підводних човнів на опір руху та визначена мінімальна безпечна глибина занурення в умовах хвилювання, що забезпечує ефективну роботу шноркелю.

Основні результати дисертаційної роботи:

1. На основі спільного аналізу даних виконаних фізичних і чисельних (методами CFD) експериментів знайдена зона автомодельності по числу Рейнольдса коефіцієнтів в'язкісного ($Re=10^6$) та повного опору ($Re=5 \cdot 10^6$) при буксируванні моделей підводних човнів у дослідницькому басейні при повному зануренні моделі, що дозволяє по-перше обґрунтувати можливість проведення таких буксирувальних досліджень і по-друге – здійснювати перерахунок результатів цих модельних досліджень на натуру за звичайною схемою.

2. Розроблена серія корпусів підводних човнів, для якої шляхом параметричного аналізу за допомогою методів обчислювальної гідромеханіки знайдена оптимальна форма корпусу, що забезпечує мінімальне значення коефіцієнту загального опору і максимальне – *Semnan* коефіцієнту, а саме співвідношення довжини до діаметру корпусу $L/D = 7...10$, коефіцієнти апроксимації форми носової $n_f = 1,35$ і кормової $n_a = 4,00$ частин.

3. Виконана шляхом CFD моделювання і панельного методу якісна і кількісна оцінка морехідності підводних човнів, критерії якої повинні забезпечити безпечне функціонування в умовах хвилювання під час вентиляції відсіків і зарядки акумуляторної батареї. Визначено, що для безпечної експлуатації підводного човна в умовах хвилювання, занурення $h=0,1\lambda$ є достатнім, а відома рекомендація глибини занурення $h=\lambda/2$ є дуже завищеною. Запропоновані колові діаграми разом з індексом працездатності є дуже зручним засобом для визначення цієї глибини занурення як під час проектування, та і під час експлуатації.

4. За допомогою методів обчислювальної гідродинаміки удосконалена методика визначення мінімальної глибини занурення для малих та середніх підводних човнів на якій практично відсутній хвильовий опір. Рух саме на цій глибині є енергетично виправданим і сприяє збільшенню радіусу дії підводного човна. Окрім того при русі на вільній поверхні за допомогою вказаних методів досліджувалася ступінь заливаємості і зростання опору судна на цьому режимі. Таким чином доведено, що рух по поверхні не є енергетично виправданим.

5. За допомогою сумісного використання методів фізичного і чисельного експериментів визначено вплив корпусу підводного човна на опір стійок модельного динамометра, що дозволило суттєво підвищити точність моделювання опору в дослідних басейнах і більш обґрунтовано здійснювати верифікацію застосованих програмних комплексів *FlowVision* і *Flow3D*.

6. Практичне значення отриманих результатів полягає в:

- доказаній можливості здійснення буксирувальних випробувань підводних човнів на великих зануреннях в дослідному басейні, що суттєво розширює можливості наукових досліджень і підвищує якість проектування;
- виконано верифікацію засобів CFD-моделювання підтвердила їхню високу надійність, економічність і інформативність, що має велике значення для використання цих засобів в практиці наукових досліджень і проектування;

- впроваджено *CFD* технологію в процес проектування підводних човнів дозволяє за короткий час виконати значно більший обсяг наукових досліджень його морехідних якостей, знайти параметри форми корпусу, що мінімізують опір, та забезпечити безпечне функціонування на малих глибинах занурення в умовах хвилювання;

- зменшення опору в зануреному стані, можливість здійснювати вентиляцію відсіків та зарядку акумуляторної батареї при хвилюванні 4-5 балів за рахунок занурення на визначену безпечну глибину безумовно є засобами, що забезпечують суттєве збільшення радіусу дії підводних човнів (за результатами порівняльного аналізу на 9,1% в повністю зануреному стані і в 8,61 разів в умовах хвилювання).

7. Результати дослідження впроваджено:

- в навчальний процес Національного Університету Кораблебудування імені адмірала Макарова під час лекцій, практичних і лабораторних занять по дисциплінах з теорії корабля та проектування суден;
- у діяльність науково-дослідного басейну Національного Університету Кораблебудування імені адмірала Макарова при експериментальному дослідженні опору об'єктів океанотехніки;
- у Siemens corporation, Denmark - схвалені і будуть використовуватися в процесі конструювання, проектування і модернізації підводних човнів;
- у Noran Energy England - схвалені і будуть використовуватися в процесі проектування і експлуатації ROV, AUV.

8. Перспективи подальших досліджень:

- розробка конструктивних елементів, механізмів та принципів розташування системи «Moon-Korol», вибір відповідних матеріалів та визначення характеристик міцності і гнучкості гнучкої щогли шноркелю;
- дослідження динаміки сумісного руху елементів системи підводний човен-гнучкий шноркель в умовах поверхневого хвилювання заданої інтенсивності.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

основні наукові професійні видання

1. Moonesun M. Evaluation of submarine model test in towing tank and comparison with CFD and experimental formulas for fully submerged resistance / M. Moonesun, M. Javadi, P. Charmdooz, U. Korol // Indian Journal of Geo-Marine Science. – 2013. – Vol. 42. – P. 1049-1056-
<http://www.niscair.res.in/sciencecommunication/researchjournals/rejour/ijms/ijms0.asp>
2. Moonesun M. Practical scaling method for underwater hydrodynamic model test of submarine / M. Moonesun, Y. Korol, D. Tahvildarzade, M. Javadi // Journal of the Korean Society of Marine Engineering. – 2014. – Vol. 38, No.10. – P. 1217-1224 -
<https://acom.s.kisti.re.kr/journal.do?method=journalintro&journalSeq=J000052>
3. Moonesun M. Technical Notes on the Near Surface Experiments of Submerged Submarine / Moonesun M., Ghasemzadeh F., Korol Y., Nikrasov V., Yastreba A.,

Ursolov A., Mahdian A. // International Journal of Maritime Technology (IJMT). – 2016. – Vol. 5. – P. 41-54 - http://ijmt.ir/browse.php?a_code=A-10-450-2&sid=1&slc_lang=en

4. Moonesun M. Computational Fluid Dynamics Analysis on the Added Resistance of Submarine due to Deck Wetness at Surface Condition / M. Moonesun, M.

Javadi, S. H. Mousavizadegan, H. Dalayeli, Y. Korol, A. Gharachahi // Journal of Engineering for the Maritime Environment. – February 2016. – P. 1-9 - <http://journals.sagepub.com/home/pim>

5. Moonesun M. Optimization on Submarine Stern Design / M. Moonesun, Y. Korol, H. Dalayeli, D. Tahvildarzade, M. Javadi, M. Jelokhaniyan, A. Mahdian // Journal of Engineering for the Maritime Environment. – February 2016. – P. 1-11 - <http://journals.sagepub.com/home/pim>

6. Moonesun Mohammad. Optimum L/D for Submarine Shape / Mohammad Moonesun, Asghar Mahdian, Yuri Mikhailovich Korol, Mehdi Dadkhah, Mehrshad Moshref Javadi, Anna Brazhko // Indian Journal of Geo-Marine Sciences. – January 2016. – Vol. 45(1). –P. 38-43 - <http://www.niscair.res.in/sciencecommunication/researchjournals/rejour/ijms/ijms0.asp>

7. Moonesun Mohammad. Concepts in Submarine Shape Design / Mohammad Moonesun, Asghar Mahdian, Yuri Mikhailovich Korol, Mehdi Dadkhah, Mehrshad Moshref Javadi // Indian Journal of Geo-Marine Sciences. – January 2016. – Vol. 45(1). –pp. 100-104 - <http://www.niscair.res.in/sciencecommunication/researchjournals/rejour/ijms/ijms0.asp>

8. Moonesun Mohammad. Wave making system in submarines at surface condition / Mohammad Moonesun, Yuri Mikhailovich Korol, Hosein Dalayeli, Mehran Javadi, Seyyed Hosein Moosavizadegan, Anna Brazhko // Indian Journal of Geo-Marine Sciences. – January 2016. – Vol. 45(1). –P. 44-53 - <http://www.niscair.res.in/sciencecommunication/researchjournals/rejour/ijms/ijms0.asp>

16. Moonesun M. Evaluation of Naval Submarine Seakeeping Criteria / M. Moonesun, Y. M. Korol, S. Ardeshiri, A. Mahdian, A. Gharechahi, D. Tahvildarzade, A. Ursalov // Journal of Scientific and Engineering Research. –2015. – Vol.2. – P. 45-54 - <http://jsaer.com/archive/volume-2-issue-4-2015>.

10. Moonesun M. Introduction of Iranian Hydrodynamic Series of Submarines (IHSS) / M. Moonesun // Journal of Taiwan society of naval architecture and marine engineering. – 2014. – P.563-578- <https://elibrary.ru/item.asp?id=27940270>- https://www.researchgate.net/publication/265336645_Introduction_of_Iranian_hydrodynamic_series_of_submarines_IHSS

публікації в яких додатково викладено зміст дисертації

11. Moonesun M. A New Plan for Marine Green Energy System; Gravity Buoyancy System in Deep Waters / M. Moonesun, B. Asadi // European Journal of Scientific Research. – 2013. – Vol. 115, No 4 December. – P. 646-651. – URL: http://www.europeanjournalofscientificresearch.com/issues/EJSR_115_4.html

12. Javadi.M. Experimental investigation of the effect of bow profiles on resistance of an underwater vehicle in free surface motion / M. Javadi, M. D. Manshadi, S. Kheradmand, M. Moonesun // *Journal of Marine Science and Application*. – 2015. – No.14. – P.102-112 - <https://www.springer.com/engineering/civil+engineering/journal/11804>
13. Moonesun M. Power Series Optimization for Submarine Bare Hull Form / M. Moonesun, Y. M. Korol, H. Dalayeli, D. Tahvildarzade, M. Javadi, M. Jelokhanian // *Turkish Journal of Engineering, Science and Technology (TUJEST)*. – 2015. – Vol.3, No.1. – P. 11-19 - <http://www.tujest.com/>
14. Moonesun M. CFD Analysis on the Bare Hull Form of Submarines for Minimizing the Resistance / M. Moonesun, Y. M. Korol, H. Dalayeli // *International Journal of Maritime Technology (IJMT)*. – 2015. – Vol. 2. – P. 1-16 - http://ijmt.ir/browse.php?a_code=A-10-450-1&sid=1&slc_lang=en
15. Moonesun M. Wave profile and deck wetness of submarine at surface condition / M. Moonesun, H. Dalayeli, M. Javadi, U. Korol, V. A. Nikrasov, A. Ursalov, A. Brajhko, A. Gharachahi // *International Journal of Recent Advances in Multidisciplinary Research*. – 2015. – Vol. 02, Issue 12. – P. 1083-1091 - <http://www.ijramr.com/issue/wave-profile-and-deck-wetness-submarine-surface-condition>
16. Moonesun M. Out of Axis Movement of an AUV inside a Water Pipeline / M. Moonesun, A. Mahdian, Y. M. Korol, A. Brazhko // *The Journal of Engineering Research (TJER)*. – 2017. – Vol. 14, No. 1. – P. 10-22. <http://www.tjer.net/site/online1/author/submit.php>
17. Moonesun M. CFD analysis of the bow shapes of submarines / M. Moonesun, Y. Korol, V. A. Nikrasov, A. Ursalov, A. Brajhko // *Journal of Scientific and Engineering Research*. – 2016. – P. 1-16 - <http://jsaer.com/archive/volume-3-issue-1-2016>.
18. Moonesun M. CFD analysis on the equations of submarine stern shape / M. Moonesun, U. Korol, A. Brazhko // *Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol.34, No.1, pp.21-32, 2015 - <https://elibrary.ru/item.asp?id=27940270>
19. Moonesun M. The Assessment of Stability and Hydrostatic Curves for Submarines at Surface and Submerged Conditions / M. Moonesun, B. Asadi, A. Abedi// *European Journal of Scientific Research*. – 2013. – Vol. 115, No 4 December. – P.652-661. – URL: http://www.europeanjournalofscientificresearch.com/issues/EJSR_115_4.html.
20. Moonesun M. Minimum Immersion Depth for Eliminating Free Surface Effect on Submerged Submarine Resistance / M. Moonesun ,Y. M. Korol, H. Dalayeli, D. Tahvildarzade, M. Javadi , M. Jelokhanian // *Turkish Journal of Engineering, Science and Technology (TUJEST)*. – 2015. – Vol. 3. – No.1. – P. 36-46. <http://www.tujest.com/index.php/2015volume3/2015volume3issue-1>

21. Moonesun M. Bottom effect on the submarine moving close to the sea bottom / M. Moonesun, Y. Korol, V. Nikrasov, A. Brazhko, A. Ursolov // Journal of Scientific and Engineering Research. – 2016. – P.106-113 - <http://jsaer.com/archive/volume-3-issue-1-2016>
22. Moonesun Mohammad. Added resistance of an AUV moving inside a water pipeline due to wall proximity / Mohammad Moonesun, Yuri Korol, Hosein Dalayeli, Asghar Mahdian, Anna Brazhko // International Journal of Maritime Technology. – Summer 2015. – Vol. 4. – P. 1-9. - http://ijmt.ir/browse.php?a_code=A-10-450-2&sid=1&slc_lang=en
23. Moonesun M. Naval Submarine Body Form Design and Hydrodynamics / Moonesun, Y. M. Korol // Germany: LAMBERT Academic Publishing, 2017. <https://www.lap-publishing.com/catalog/details//store/gb/book/978-620-2-00425-1/naval-submarine-body-form-design-and-hydrodynamics>
- публікації які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**
24. Moonesun M. General Arrangement and Architectural Aspects in Midget Submarine / M. Moonesun, P. Charmdooz // USYS (4th-Underwater System Technology) conference. – Malaysia, 2012. – ISBN: 978-983-43178-6-7- <https://www.sut.org/event/4th-international-conference-on-underwater-system-technology-theory-and-applications-usys-12/>
25. Moonesun M. A review study on the bare hull form equations of submarine / M. Moonesun, Y. M. Korol // MIC2014 (16th Marine Industries Conference). – Iran, 2014- https://www.civilica.com/Paper-NSMI16-NSMI16_090=A-review-study-on-the-bare-hull-form-equations-of-submarine.html
26. Moonesun M. Resistance in submarine shape design / M. Moonesun, Y. M. Korol // NOUS Conference. – Nikolaev, 2014. – P. 399-403 - <http://www.nuos.edu.ua/>

АНОТАЦІЯ

Мунесан М. І . Засоби підвищення морехідних та експлуатаційних якостей підводних човнів – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.08.03 «Конструювання та будування суден» – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв 2018р.

В дисертаційному дослідженні представлені засоби підвищення морехідних та експлуатаційних якостей малих та середніх підводних човнів за рахунок зменшення опору руху та забезпечення ефективної роботи шноркелю в умовах хвилювання, що сприяє збільшенню їх радіусу дії. Дисертація складається зі вступу, шостих розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, представлено наукову новизну і практичну цінність результатів роботи.

У *першому розділі* на основі огляду літературних джерел виконано аналіз стану і виявлені основні проблеми підвищення морехідних та експлуатаційних якостей малих та середніх підводних човнів.

Першою проблемою визначено зменшення опору руху підводних човнів в повністю зануреному стані. Підкреслюється, що експериментальні дослідження моделей підводних човнів не мають підґрунтя для перерахунку на натурні об'єкти із за фізичної неможливості забезпечення рівності чисел Рейнольдса.

Друга проблема пов'язана з забезпеченням ефективної роботи шноркелю в умовах поверхневого хвилювання інтенсивністю 4-5 балів. Виконаний аналіз циклограми роботи підводних човнів довів, що радіус їх дії може бути збільшено не тільки за рахунок зменшення опору руху, но і за рахунок визначення безпечних умов використання шноркелю під час 4-5 бального хвилювання.

Другий розділ дисертації містить формулювання задач розрахунку хитавиці підводного човна та характеристику методів, за допомогою яких він може бути здійснений. По-перше - це методи класичної спектральної теорії, в рамках якої сформовані теоретичні основи перетворення спектра хвилювання у спектр хитавиці. По-друге - це методи обчислюваної гідродинаміки (CFD), а саме програмні комплекси *Flow-3D* та *FlowVision*. По-третє - це панельний метод, що реалізований у програмному комплексі *Maxsurf* для визначення гідродинамічних сил. Зроблено порівняльний аналіз описаних методів та наведено обмеження кожного з них стосовно задач, що вирішуються у дисертації.

У *третьому розділі* проведено порівняльний аналіз результатів визначення опору моделей підводних човнів експериментальним та чисельним методами при повному зануренні, зануренні на глибину шноркелю, та в поверхневому стані. Досліджувалися залежності коефіцієнтів повного та в'язкісного опору від критерія Рейнольдса в умовах повністю зануреного стану. Ці залежності були отримані методами CFD як для моделей, так і для натурних підводних човнів. Порівняльний аналіз цих результатів *вперше* дозволив знайти зону авtomодельності по числу Рейнольдса коефіцієнтів в'язкісного ($Re = 10^6$) та повного опору ($Re = 5 \cdot 10^6$), що дозволяє по-перше обґрунтувати можливість проведення таких буксирувальних досліджень і по-друге – здійснювати перерахунок результатів цих модельних досліджень на натуру за звичайною схемою. Таким чином суттєво поширюється можливість наукових досліджень і підвищується якість проектування об'єктів підводної техніки.

Четвертий розділ роботи присвячено оптимізації форми голого корпусу з метою мінімізації його опору. Була створена нова серія з 11 корпусів підводних човнів. Для цієї серії *вперше* шляхом параметричного аналізу за допомогою методів обчислювальної гідромеханіки знайдена оптимальна форма корпусу, що забезпечує мінімальне значення коефіцієнту загального опору і максимальне – *Setnap* коефіцієнту.

У *п'ятому розділі* виконана оцінка ефективності різних стабілізаційних систем, що використовуються на підводних човнах. В результаті аналізу існуючих засобів заспокоювання хитавиці зроблено висновок, що єдиним

шляхом підвищення морехідності підводних човнів є збільшення глибини занурення. Для можливості роботи на цій глибині *вперше* запропоновано шноркель нового типу системи «Moon-Korol».

У *шостому* розділі виконана оцінка морехідних якостей підводних човнів з метою визначення безпечної глибини занурення при 4-5 бальному поверхневому хвилюванні. Визначено, що для безпечної експлуатації підводного човна в умовах хвилювання, занурення $h=0,1\lambda$ є достатній, а відома рекомендація глибини занурення $h=\lambda/2$ є завищеною.

Практичне значення отриманих результатів полягає в

- доказаній можливості здійснення буксирувальних випробувань підводних човнів на великих зануреннях в дослідному басейні, що суттєво розширює можливості наукових досліджень і підвищує якість проектування;
- виконана верифікація засобів *CFD*-моделювання підтвердила їхню високу надійність, економічність і інформативність, що має велике значення для використання цих засобів в практиці наукових досліджень і проектування;
- впровадження *CFD* технологій в процес проектування підводних човнів дозволяє за короткий час виконати значно більший обсяг наукових досліджень його морехідних якостей, знайти параметри форми корпусу, що мінімізують опір, та забезпечити безпечне функціонування на малих глибинах занурення в умовах хвилювання;
- зменшення опору в зануреному стані, можливість здійснювати вентиляцію відсіків та зарядку акумуляторної батареї при хвилюванні 4-5 балів за рахунок занурення на визначену безпечну глибину безумовно є засобами, що забезпечують суттєве збільшення радіусу дії підводних човнів (за результатами порівняльного аналізу на 9,1% в повністю зануреному стані і в 8,61 разів в умовах хвилювання).

Ключові слова: підводний човен, радіус дії, мінімізація опору, експериментальне і чисельне моделювання, гнучкий шноркель, безпечна глибина занурення.

АННОТАЦИЯ

Мунесан Мохаммад Ібрагім. Способы повышения мореходных и эксплуатационных качеств подводных лодок – рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 - конструирование и постройка судов - Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев 2018.

Целью диссертационной работы является разработка способов увеличения радиуса действия малых и средних подводных лодок путем уменьшения их сопротивления, и обеспечения эффективной работы шноркеля в условиях волнения. На основе обзора литературных источников выполнен анализ состояния и определены основные проблемы повышения мореходных и эксплуатационных качеств малых и средних подводных лодок. Обоснована возможность и усовершенствована технология экспериментального исследования сопротивления полностью погруженных подводных лодок. С помощью методов и средств вычислительной гидродинамики определена

совокупность параметров формы корпуса, обеспечивающих минимальное сопротивление движению. При помощи панельного метода определена безопасная глубина погружения и предложен новый шноркель системы «Moon-Korol», который обеспечивает надежное функционирование при 4-5 бальном волнении.

Ключевые слова: подводная лодка, радиус действия, минимизация сопротивления, экспериментальное и численное моделирование, гибкий шноркель, безопасная глубина погружения.

ABSTRACT

Moonesun M.I. Studied on the improving the seaworthiness and operational qualities of submarines - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (Doctor of Philosophy) in specialist 05.08.03 "Design and construction of ships" - Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv 2018.

The aim of the thesis is to develop ways to increase the range of small and medium-sized submarines by reducing their resistance, and ensuring the effective operation of the snorkel in conditions of excitement. On the basis of a review of the literature, an analysis of the state is carried out and the main problems of increasing the nautical and operational qualities of small and medium-sized submarines are identified. The possibility is grounded and the technology of experimental research of the resistance of fully submerged submarines is improved. With the help of methods and means of computational hydrodynamics, a set of body shape parameters has been determined that provide minimal resistance to movement. Using the panel method, a safe immersion depth was determined and a new Moon-Korol snorkel was proposed, which ensures reliable operation at 4–5 ball waves.

Keywords: submarine, radius of action, minimization of resistance, experimental and numerical simulation, flexible snorkel, safe depth of immersion.