

УДК 528.472: 519.878

doi:10.20998/2413-4295.2018.09.14

ФІЗИКО-СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ПОЛЯ КОРАБЛЯ НА БАЗІ ГІДРОДИНАМІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ

І. І. ГЛАДКИХ¹, М. Б. КАПОЧКІНА^{2}*¹МПП «ТСБ», м. Одеса, УКРАЇНА²Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса, УКРАЇНА

*e-mail: tsb1@ukr.net

АНОТАЦІЯ Розглядаються перспективні напрямки розвитку систем автоматизованого проектування кораблів. Показані переваги математичного гідродинамічного моделювання кораблів у порівнянні з фізичним моделюванням гідродинаміки його моделі. Розглянуті методичні проблеми аналізу даних математичного гідродинамічного моделювання кораблів. Представлені методичні рішення та розглянуті конкретні приклади обробки статистичними методами результатів математичного гідродинамічного моделювання кораблів. На базі цифрової моделі корабля досліджено вплив геометрії його корпусу на гідродинамічне поле, розраховане шляхом математичного моделювання глибини розповсюдження аномалій надлишкового тиску в нестискуваній рідині. Розрахунки виконані для швидкості руху корабля 30 вузлів. В результаті розрахунку повного, а також аномального тиску у водному середовищі, що був створений в процесі руху кораблем, була апробована методика фізико-математичного моделювання його гідродинамічного поля. Фізико-статистичне моделювання реалізується за допомогою застосування регресійного аналізу для формалізації емпіричних закономірностей. Отримані результати емпіричних залежностей глибини аномалій надлишкового тиску від швидкості об'єкта. Для району північно-західного шельфу Чорного моря виконано районування акваторії за фактором швидкості руху судна, що забезпечує непомітне переміщення в умовах передбачуваного розгортання донних гідростатичних комплексів моніторингу гідродинамічного поля. За результатами районування акваторії побудована карта. Розрахунки виконані для конкретної моделі корабля і не можуть бути застосовані для суден з відмінною геометрією корпусу. Кожний клас кораблів повинен бути забезпечений окремими розрахунками гідродинамічного поля, що створюється ним в процесі різних режимів руху.

Ключові слова: гідродинамічне поле корабля; поле виняткового динамічного тиску; швидкість судна; геометрія корпусу корабля, рельєф морського дна; регресійний аналіз; гідродинамічне моделювання; гідрографія; навігація.

PHYSICO-STATISTICAL MODELING OF THE HYDRODYNAMIC FIELD OF THE SHIP ON THE BASIS OF HYDRODYNAMIC CALCULATIONS

I. GLADKYKH¹, M. KAPOCHKINA^{2}*¹Private Company "TSB", Odessa, UKRAINE²Research Center of the Armed Forces of Ukraine "State Oceanarium", Odessa, UKRAINE

ABSTRACT The perspective directions of development of systems of automated designing of ships are considered. The advantages of mathematical hydrodynamic modeling of ships in comparison with physical modeling of hydrodynamics of its model are shown. The methodical problems of data analysis of mathematical hydrodynamic modeling of ships are considered. The methodical solutions are presented and concrete examples of statistical methods processing of results of mathematical hydrodynamic modeling of ships are considered. The influence of the geometry of its body on the hydrodynamic field, calculated on the basis of the digital model of the ship, is calculated by mathematical modeling of the depth of propagation of excess pressure anomalies in unchanged fluid. Calculations are made for the speed of ships in 30 knots. As a result of the calculation of the complete, as well as abnormal, exceptional pressure in the aqueous environment created by the moving vehicle, the method of physico-mathematical modeling of its hydrodynamic field was tested. Physical-statistical modeling is implemented by applying regression analysis to formalize empirical regularities. The obtained results of the empirical dependencies of the depth of the anomaly of excess pressure from the object speed. For the area of the northwestern Black Sea shelf, the zoning of the water area was performed on the speed factor of the vessel, which provides a hidden movement in conditions of the planned deployment of bottom hydrostatic monitoring systems for the hydrodynamic field. Based on the results of zoning of the water area, a map was constructed. The calculations are made for a specific ship model and can not be used for vessels with excellent body geometry. Each class of ships must be provided with separate calculations created by it hydrodynamic field.

Keywords: hydrodynamic field ships; field of exceptional dynamic pressure; speed of the vessel; geometry of the ship's hull, relief of the seabed; regression analysis; hydrodynamic simulation; hydrography; navigation.

Вступ

Кораблі під час руху по водній поверхні впливають на водне середовище, змінюючи поле

гідростатичного тиску у водному середовищі. Розрахунки гідродинамічного поля корабля доцільно виконувати з метою унеможливлення його демаскування. Гідродинамічне поле використовується

для пошуку кораблів, наведення на них бойових засобів. Слід враховувати, що генерування гідродинамічного поля пов'язане з рухом корабля.

Загальновідомо, що поле надмірного тиску (рівень гідродинамічного поля рухомого об'єкту) зменшуються при зменшенні швидкості його руху. Зниження швидкості корабля до безпечного рівня є ефективним засобом унеможливлення визначення його положення. Визначення безпечних швидкостей корабля пересування корабля з урахуванням просторових змін глибини моря є необхідною складовою планування бойових дій в районах, де розгорнуті донні мережецентричні системи реєстрації гідродинамічного поля та в районах можливої постановки гідродинамічних мін.

Вважається, що ефективним тактичним прийомом унеможливлення виявлення корабля донними гідростатичними пристроями є вибір безпечної швидкості ходу, тобто такої швидкості, при якій або величина зміни тиску під кораблем не перевищить встановленого порогу пристрою з вимірювання гідростатичного тиску, або час дії області змінного тиску виявиться меншим, ніж встановлено в системі реєстрації аномалій гідростатичного тиску.

Донні системи реєстрації змін гідростатичного тиску здатні реєструвати зміни, які дорівнюють 0,0005% вимірюваної величини. Наприклад донна система реєстрації змін гідростатичного тиску DART, встановлена на глибині 5 тис. м, здатна визначати зміни рівня океану, менш ніж на 3 см [1]. Тобто, в шельфовій зоні системи з такою чутливістю здатні реєструвати не тільки гідродинамічне поле корабля, але й підвищення рівня морської поверхні перед носовою частиною корабля, корабельні хвилі тощо.

Вважається, що ефективних засобів гідродинамічної захисту корабля не існує. Зменшення гідродинамічного поля корабля можливе шляхом вибору оптимального співвідношення водотоннажності корабля та форми його корпусу. В роботі розглянуто питання зменшення гідродинамічного поля лише за рахунок зміни швидкості руху корабля.

Мета роботи

Метою дослідження є навігаційно-гідрографічне забезпечення скритності пересування корабля в умовах розгортання мережецентричних гідростатичних систем пошуку рухомої цілі. Тобто, метою є районування акваторії за фактором безпечної для систем гідродинамічного спостереження швидкості руху корабля.

Досягнення зазначеної мети досягається шляхом вирішення таких завдань:

розрахунку просторового положення ізобар відповідного значення динамічного тиску, що створюється кораблем під час руху за умов змінної швидкості пересування;

забезпечення скритності (від донних систем вимірювання змін гідростатичного тиску) пересування корабля, шляхом визначення зміни швидкості руху його з урахуванням фактичних глибин моря.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Вважається загальноприйнятим, що суднобудування - традиційно консервативна галузь, яка істотно відстає в області математичного гідродинамічного моделювання та автоматизованого проектування від авіаційної та автомобільної галузей. На сучасному науково-технічному рівні, на жаль, головною метою гідродинамічного моделювання у кораблебудуванні зазвичай є порівняння результатів математичного моделювання з результатами фізичного моделювання, яке приймається за еталон. Фактично, результати математичного гідродинамічного моделювання, яке виконане з застосуванням сертифікованого програмного забезпечення, поступається лише фізичному моделюванню фактичного корабля в реальних умовах. Фізичне моделювання на базі моделі корабля, яка виконана з масштабуванням, не є сертифікованим.

На практиці, вирішення проблемних питань проектування корабля досі вирішується шляхом фізичного моделювання у басейнах та аеродинамічних експериментах в аеродинамічних трубах. Загальновідомо, що фізичне аеродинамічне та гідродинамічне моделювання не є сертифікованим. Найбільше спотворення результатів такого моделювання відбувається у випадках, коли шляхом побудови моделі, змінюється просторовий масштаб корабля. За таких умов необхідно змінювати параметри середовища. Відповідно коефіцієнту масштабування моделі корабля необхідно змінювати густину, в'язкість, параметри турбулентності рідини та газу тощо. На підставі зазначеного вважаємо, що тема виконаного наукового дослідження з фізико-статистичного моделювання, виконаного за результатами розрахунків гідродинамічного поля корабля з застосуванням сучасних технологій математичного гідродинамічного моделювання на базі сертифікованих програмних продуктів, є актуальною.

Враховуючи перспективи проектування кораблів, у тому числі безекіпажних, що придатні для застосування в умовах, неприпустимих для звичайних кораблів, тема дослідження вважається перспективною, а задіяння методів фізико-статистичного моделювання для аналізу результатів гідродинамічного моделювання характеризується певною новизною. Математичне та фізико-статистичне моделювання гідродинамічного поля корабля має суттєві техніко-економічні переваги в порівнянні з натурними експериментами, тому тема дослідження має практичне значення.

Гідродинамічне моделювання корабля, як правило, має за мету підвищення тактико-технічних характеристик шляхом оптимізації геометрії корпусу. Загально відомо, що швидкість руху корабля зменшується за рахунок втрати енергії руху на подолання сили тертя, на генерування корабельних хвиль та, в умовах мілини, на подолання сил тертя що виникають за рахунок взаємодії зони надмірного тиску навколо підводної частини корпусу корабля з морським дном. Втрати енергії руху на подолання сили тертя обумовлені:

- особливостями геометрії підводної частини корабля;
- шорсткістю поверхні підводної частини корабля;
- густиною води.

Втрати енергії руху корабля на генерування корабельних хвиль обумовлені:

- особливостями геометрії підводної частини корабля;
- швидкістю руху корабля.

Втрати енергії руху корабля, в умовах мілини, на подолання сил тертя, що виникають за рахунок взаємодії зони надмірного тиску навколо підводної частини корпусу корабля з дном, додатково обумовлені співвідношенням глибини моря до осадки корабля та співвідношенням швидкості руху корабля до глибини моря (в умовах обмеженої глибини).

Слід зазначити, що кінцевими результатами гідродинамічних розрахунків зазвичай вважають: розрахунок опору при буксируванні корабля, розрахунок ліній току вздовж корпусу корабля та розподіл динамічного тиску корабля [2]. На рис. 1 наведено результати розрахунку ліній току.

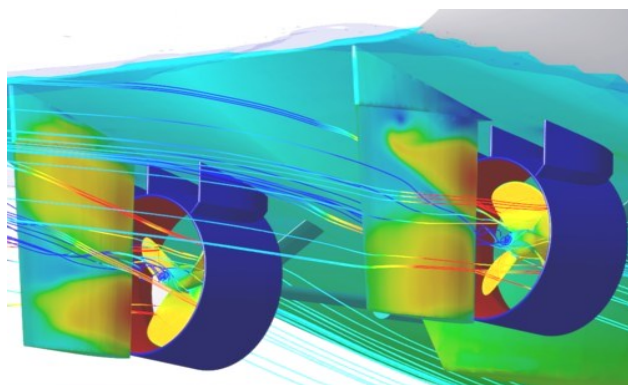


Рис. 1 - Результати розрахунку ліній току [3]

Вплив корабельних хвиль на швидкість руху судна розглядалася у роботі [4].

Гідродинамічні розрахунки динамічного тиску, що створюється судном, наведені в роботі [5]. На рис. 2 показано розподіл ізоповерхні динамічного тиску 2500 Па (темним кольором - негативний тиск, сірим позитивний).

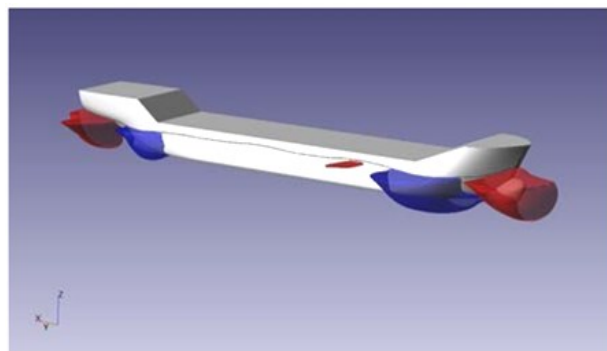


Рис. 2 - Ізобари динамічного тиску 2500 Па (темним кольором показано від'ємний тиск, сірим позитивний) [5]

За результатами розрахунку підтверджується очікувана позитивна аномалія динамічного тиску в носовій частині корабля та визначається кормова позитивна аномалія динамічного тиску.

Форма ізобари динамічного тиску 2500 Па, в умовах мілини, змінюється за рахунок взаємодії зони надмірного динамічного тиску навколо підводної частини корпусу корабля з дном, що підтвержене розрахунками, виконаними для умов «мілкої» води (рис. 2). Згідно результатів розрахунків, виконаних для певної швидкості руху судна, так само генерується носова та кормова зони надмірного динамічного тиску, але розміри аномальних зон збільшуються, а їх форми змінюються.

Отримані результати підтверджують тезу про те, що під час руху корабля під його корпусом відбувається зміна гідростатичного тиску води (в носовій та кормовій частинах утворюються зони підвищеного тиску, в середній частині корпусу область зниженого тиску), а цілі, зазвичай, визначається за від'ємною аномалією динамічного тиску.

На нашу думку це є спрощенням. Гідродинамічне поле корабля, визначене за результатами математичного гідродинамічного моделювання, характеризується кормовою, кормовою та носовою та виключно носовою позитивними аномаліями динамічного тиску. Тобто, визначення цілі можливе не тільки за від'ємною аномалією динамічного тиску, а й більш ефективними рішеннями.

В публікаціях не розглядається можливість залучення даних розрахунків позитивних аномалій динамічного тиску рухомого об'єкту на практично нестискуване водне середовище для оцінки механізму генерування корабельних хвиль. Сила дії корабля на водне середовище, згідно третього закону Ньютона, «сила дії дорівнює силі протидії», в умовах практично нестискуваної води, повинна змінювати форму водної поверхні, тобто генерувати на поверхні розділу вода-повітря поверхневі поперечні хвилі. На нашу думку, форма (кількість та місця формування позитивних аномалій динамічного тиску) та розміри (об'єм) зон

надмірного динамічного тиску свідчать про кількість місць генерування корабельних хвиль та їх висоту (енергію).

Корабельні хвилі розглядають як причину втрат енергії руху корабля. Загальновідомо, що співвідношення гравітаційних та інерційних сил в умовах руху корабля на водній поверхні оцінюється числом Фруда (Fr). Ефективним є рух корабля за $Fr \leq (0,35 - 0,39)$. За таких умов корабель рухається на двох корабельних хвилях - носовій та кормовій. Вважається, що перевищення наведеного порогу числа Фруда для маломірних кораблів відбувається за умов відриву та відставання кормової хвилі. За таких умов корабель рухається на одній (носовій хвилі), тобто безперервно намагається «вийти» на гребінь хвилі, тобто, корабель починає витрачати енергію руху на подолання гравітаційної сили.

З другого боку, корабельні хвилі можуть бути пошуковою ознакою виявлення корабля донними мережецентричними системами вимірювання аномалій статичного тиску.

Окремо може розглядатися демаскуючий ефект корабельних хвиль. На рис. 3 показано, що рухомий об'єкт, що має розміри менші від 30 м, генерує фронт корабельної хвилі довжиною до 2 км, який може бути досліджений при дешифруванні зображення морської поверхні, отриманого шляхом дистанційного зондування акваторій з повітря.

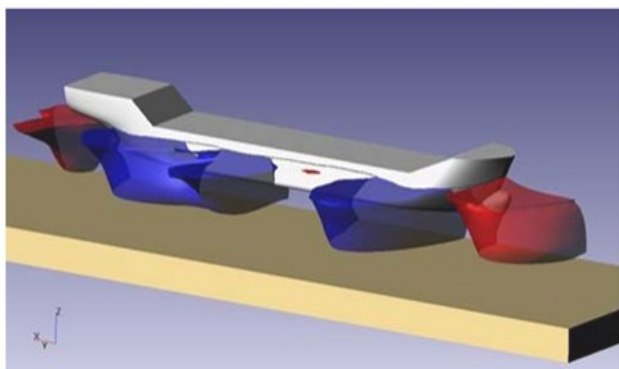


Рис. 3 - Ізобара динамічного тиску 2500 Па (чорним кольором показано негативний тиск, сірим - позитивний) [5]



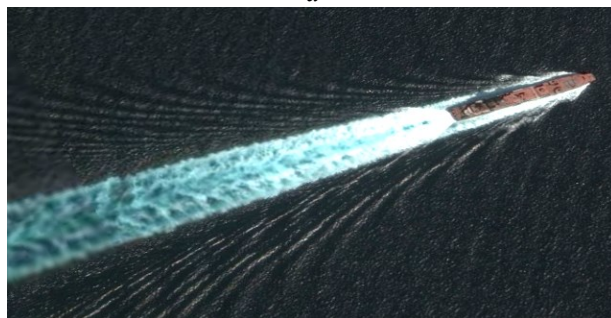
Рис. 4 – Фото корабельних хвиль від рухомих цілей [6]

Слід відмітити, що зазначена пошукова ознака має як переваги так і обмеження. Метод спрощує візуальний аналіз зображення, але при застосуванні математичних методів обробки, втрачає переваги. Крім цього, застосування корабельних хвиль, як пошукової ознаки визначення цілі, обмежене метеорологічними умовами [7] та низкою інших факторів.

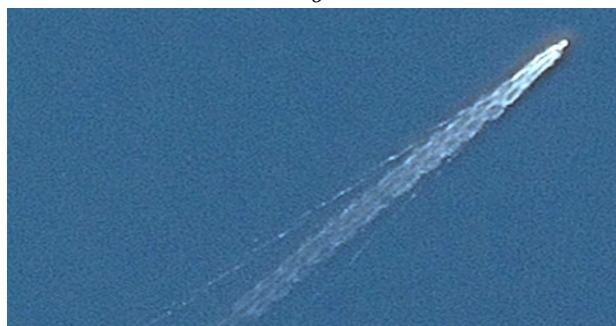
На рис. 5 наведені фото на яких показано рух корабля зі швидкістю, коли корабель практично не втрачає енергію на генерування корабельних хвиль (рис. 5а), коли корабель під час руху з більш високою швидкістю ходу починає втрачати енергію на генерування носової та кормової корабельних хвиль (рис. 5б). При подальшому збільшенні швидкості руху корабель втрачає кормову хвилю і, рухаючись виключно на носовій корабельній хвилі, отримує вертикальну складову руху, тобто починає додатково втрачати енергію руху на подолання сили тяжіння (рис. 5в).



а



б



в

Рис. 5 – Фото руху кораблів з різною швидкістю та з різними показниками чисел Фруда а) практично не генеруючи корабельні хвилі, б) генеруючи носову та кормову корабельні хвилі, в) генеруючи виключно носову корабельну хвилю [6]

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

Гідродинамічне поле корабля формується під впливом дії підводної частини корпусу корабля на нестискувану рідину (морську воду). Значення динамічного тиску, що створюється кораблем у водному середовищі, обумовлено особливостями геометрії підводної частини корабля та швидкістю його руху.

Рухомі об'єкти, такі як надводні кораблі та підводні човни, формують такі пошукові ознаки, як корабельні хвилі, кільватерні струмені, довгохвильові акустичні хвилі, аномалії надмірного тиску у водному середовищі тощо [8, 9, 10, 11, 12].

Поле динамічного тиску корабля на водну товщу є одним з пошукових ознак визначення його положення за створеним гідродинамічним полем. Тому з одного боку важливим є питання визначення залежності геометрії певної ізобари позитивної аномалії динамічного тиску від швидкості руху корабля, а з другого боку, важливим є в умовах фактичної глибини моря, визначити швидкість руху корабля, за якої створена відповідна ізобара динамічного тиску не досягатиме дна.

Невирішеною є методична проблема аналізу результатів математичного гідродинамічного моделювання. Пропонується виконувати аналіз результатів гідродинамічного моделювання методами фізико статистичного моделювання.

Виклад основного матеріалу

Нами проведено гідродинамічне моделювання гідродинамічного поля корабля шляхом розрахунку форми та об'єму ізобар надмірного тиску.

Результати досліджень пройшли апробацію на конференціях: «Спільні дії військових формувань держави: проблеми та перспективи», м. Одеса 10-11 вересня 2015 року; «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», м. Київ 15-18 грудня 2015 р. та на Міжнародному науковому форумі "Морська стратегія держави. Розвиток та реалізація морського потенціалу України", м. Київ 24-25 травня 2016 року в рамках доповідей: "Математическое моделирование гидродинамического и теплового полей корабля на примере корвета. Постановка задачи", "Вимоги та граничні умови цифрового моделювання гідродинаміки підводної техніки" і "Основні напрямки наукових досліджень в інтересах розвитку кораблебудівної галузі України та створення новітніх зразків морського озброєння та військової техніки", відповідно.

На рис. 6 наведено приклади розрахунку певної ізобари надмірного тиску, що створюється кораблем при русі з різною швидкістю.

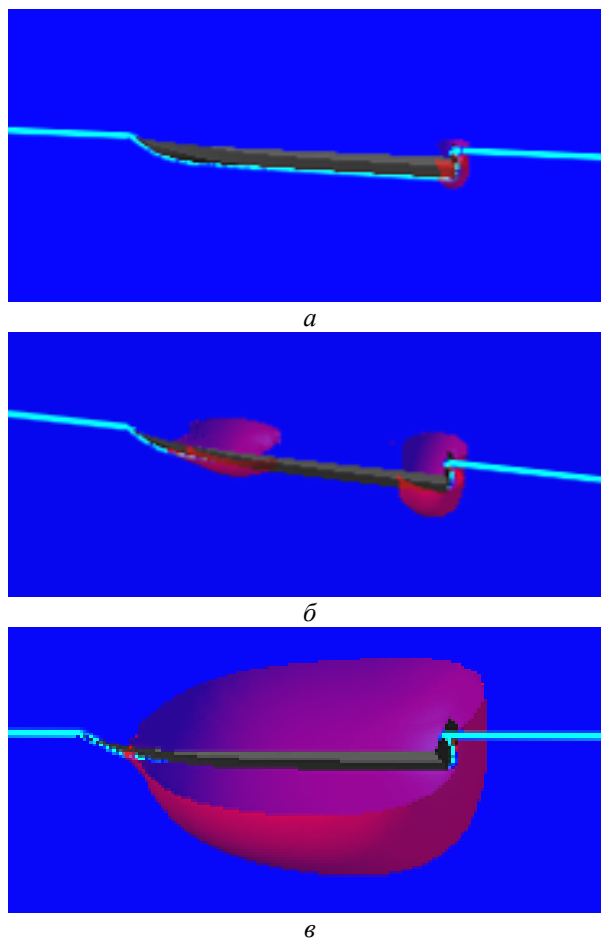


Рис. 6 – результати розрахунку певної ізобари динамічного тиску при швидкості руху корабля, коли згідно значень числа Фруда а) корабельні хвилі практично не генеруються, б) генеруються носова та кормова корабельні хвилі, в) генерується виключно носова корабельна хвиля

Результати розрахунків, приведені на рис. 6 у певній мірі відповідають фактичним умовам генерування корабельних хвиль за різних швидкостей руху, що наведені на рис. 5. Важливо розуміти, що при зростанні швидкості руху корабля теоретично не виключено перехід його руху в режим глісування, при якому корабельні хвилі практично не генеруються. Приклад руху в таких умовах наведено на рис. 7.

В результаті математичного гідродинамічного моделювання гідродинамічного поля корабля за умов швидкості руху 30 вузлів, при якій позитивна аномалія динамічного тиску генерується відповідно рис. 6в, були визначені вертикальні відстані ізобар в діапазоні 6 кПа. Для ізобари будь-якого чисельного значення доцільно, шляхом застосування регресійного аналізу, розрахувати рівняння залежності вертикальної відстані від морської поверхні від швидкості руху корабля. За нашим досвідом, залежність є експоненційною. Результати розрахунку показані на рис. 8.



Рис. 7 – Фото руху корабля в режимі глісування [6]

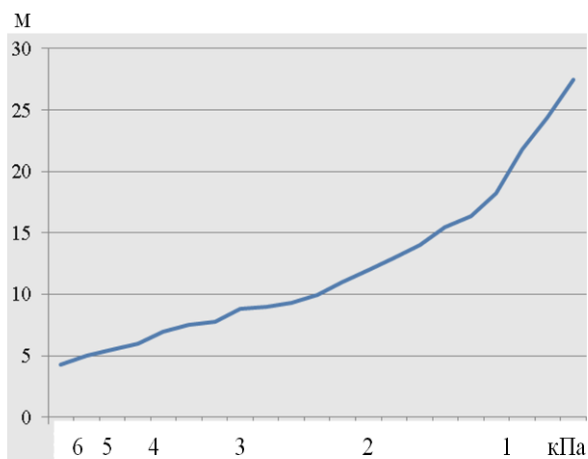


Рис. 8 - Графік вертикальної відстані від морської поверхні до відповідної ізобари динамічного тиску за умов швидкості руху 30 вузлів

За результатами розрахунку встановлено, що унеможливлення виявлення корабля донними гідростатичними пристроями мережецентричної системи досягається змінами режиму швидкості його руху.

Якщо встановлений поріг донної мережецентричної системи з реєстрації гідродинамічного поля корабля (вимірювання гідростатичного тиску) становить 6 кПа, унеможливлення фіксації корабля досягається на глибинах >5 м. Якщо поріг реєстрації гідродинамічного поля 3 кПа, унеможливлення фіксації корабля досягається на глибинах >9 м. Для порогу реєстрації гідродинамічного поля 1 кПа, унеможливлення фіксації корабля досягається на глибинах >20 м. Для зазначеного порогу донної мережецентричної системи з реєстрації гідродинамічного поля корабля (вимірювання гідростатичного тиску), було проведено районування акваторії північно-західної частини Чорного моря. На рис. 9 білим кольором виділено райони, де глибини дозволяють кораблю рухатись зі швидкістю 30 вузлів і не бути зафіксованому за даними вимірювання гідростатичного тиску з пороговим значенням 1 кПа.

зафіксованому мережецентричною системою з реєстрації гідродинамічного поля корабля (вимірювання гідростатичного тиску) з пороговим значенням гідростатичного тиску 1 кПа.

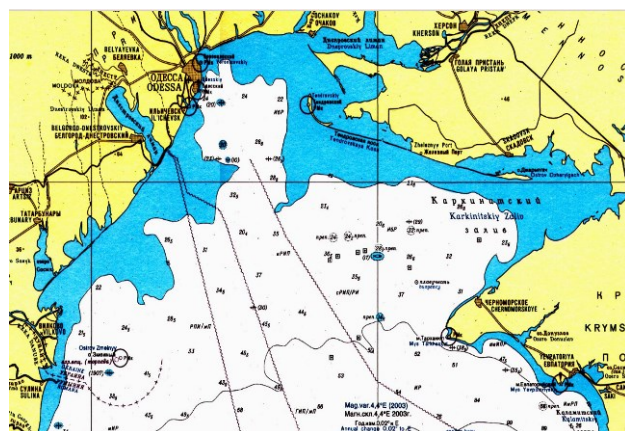


Рис. 9 – Результати районування акваторії північно-західної частини Чорного моря за фактором швидкості руху (білим кольором виділено райони, де глибини дозволяють кораблю рухатись зі швидкістю 30 вузлів і не бути зафіксованому за даними вимірювання гідростатичного тиску з пороговим значенням 1 кПа)

Розроблена методика дозволяє для різних типів кораблів виконувати розрахунки форми та розмірів ізобари динамічного тиску, яка є пороговою для фіксації системами моніторингу гідродинамічного поля. Розрахунки виконуються для різних швидкостей руху корабля. Отримані результати є вхідними даними для районування будь-яких акваторій Світового океану за ознакою вибору швидкості руху корабля (визначеного типу) з метою унеможливлення його фіксації за гідродинамічним полем.

Висновки

В результаті застосування статистичних методів аналізу даних розрахунку гідродинамічного поля корабля, показано можливість формалізації його характеристик у аналітичному вигляді, що в подальшому дозволяє автоматизувати процес районування будь-яких акваторій за ознакою швидкості руху корабля, яка не створює критичних умов перевищення порогу реєстрації гідродинамічного поля та унеможливорює фіксацію поля корабля донними гідростатичними пристроями.

Список літератури

1. Overview of first operational DART® Mooring System [Електронний ресурс]. URL: https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/dart_ms1.html

2. **Михайлова, М. К.** *Расчетный анализ буксировочного сопротивления моторной яхты* [Електронний ресурс] / **М. К. Михайлова, А. Е. Щеляев.** URL: <https://flowvision.ru/images/Yahta.pdf>
3. Суднобудівництво [Електронний ресурс]. URL: <https://flowvision.ru/ru/>
4. **Печенюк, А. В.** Моделирование буксировочных испытаний перспективного контейнеровоза KRISO при помощи комплекса гидродинамического анализа "Flow Vision" / **А. В. Печенюк** // *Труды конференции "Инженерные системы 2005" – серия "Прикладные исследования в механике. Изд. МФТИ. – 2005. – С. 46–54.*
5. **Печенюк, А. В.** Численное моделирование обтекания корпуса судна в условиях мелководья [Електронний ресурс] / **А. В. Печенюк.** URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_d1_dmt.pdf
6. Google планета земля [Електронний ресурс]. URL: <https://www.google.com.ua/intl/ru/earth/>
7. **Soloviev, A.** Sonar Measurements in Ship Wakes Simultaneous With TerraSAR–X / **A. Soloviev, M. Gilman, K. Young, S. Bruschi, S. Lehner** // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2010. – Volume 48. – Issue 2. – P. 841 – 851.
8. **Soloviev, A.** Remote Sensing of Ship Wakes [Електронний ресурс] / **A. Soloviev, M. Gilman, K. Moore, K. Young, H. Graber** // *SEASAR 2008: Advances in SAR Oceanography from ENVISAT and ERS missions. European Space Agency.* – Roma, Italy. – 2008. URL: <http://earth.esa.int/workshops/seasar2008/programme.html>
9. **Gilman, M.** Burge Sonar Measurements in Ship Wakes Simultaneous With TerraSAR–X Overpasses / **M. Gilman, K. Young** // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2010. – Volume 48. – Issue 2.
10. **Grazian, M. D.** Performance Analysis of Ship Wake Detection on Sentinel–1 SAR Images / **M. D. Grazian, M. Grasso, M. D’Errico** // *2Remote Sensing.* – 2017. – 9(11). – 1107. – doi:10.3390/rs9111107.
11. **Paes, R. L.** Ship detection using TerraSAR–X images in the Campos Basin (Brazil). / **R. L. Paes, J. A. Lorenzetti, D. F. M. Gherardi** // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* – 2010. – 7. – P. 545–548.
12. **Ermakov, S.** Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface: observations and physical mechanisms. / **S. Ermakov, I. Kapustin, T. Lazareva** // *Proc. SPIE.* – 2014. – 9240.
2. **Mikhailova, M., Shchelyaev. A. Ye.,** Raschetnyy analiz buksirovochnogo soprotivleniya motornoy yakhty. [Calculation analysis of towing resistance of a motor yacht]. Available at: <https://flowvision.ru/images/Yahta.pdf>
3. Sudnobudivnitsvo [Shipbuilding]. Available at: <https://flowvision.ru/ru/>
4. **Pechenuk, A. V.** Modelirovanie buksirovochnykh ispytaniy perspektivnogo konteynerovoza KRISO pri pomoshchi kompleksa gidrodinamicheskogo analiza "Flow Vision" [Modeling of the towing tests of a prospective container ship KRISO using a complex of hydrodynamic analysis "Flow Vision"]. *Trudy konferentsii "Inzhenernye sistemy 2005" seriya "Prikladnye issledovaniya v mekhanike [Proceedings of the conference "Engineering Systems 2005"], series "Applied Research in Mechanics", ed. MIPT, 2005, 46–54.*
5. **Pechenyuk, A. V.** Chislennoe modelirovanie obtekaniya korpusa sudna v usloviyakh melkovod'ya [Numerical simulation of hull flow in shallow waters]. Available at: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_d1_dmt.pdf.
6. Google eath. Available at: <https://www.google.com.ua/intl/ru/earth/>
7. **Soloviev, A., Gilman, M., Young, K., Bruschi, S., Lehner, S.** Sonar Measurements in Ship Wakes Simultaneous With TerraSAR–X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**, 2, 841 – 851.
8. **Soloviev, A., Gilman, M., Moore, K., Young, K., Graber, H.** Remote Sensing of Ship Wakes. *SEASAR 2008: Advances in SAR Oceanography from ENVISAT and ERS missions. European Space Agency*, Roma, Italy, Available at: <http://earth.esa.int/workshops/seasar2008/programme.html>
9. **Gilman, M., Young, K.** Burge Sonar Measurements in Ship Wakes Simultaneous With TerraSAR–X Overpasses. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**, 2.
10. **Grazian, M. D., Grasso, M., D’Errico, M.** Performance Analysis of Ship Wake Detection on Sentinel–1 SAR Images. *2Remote Sensing*, 2017, **9**(11), 1107, doi:10.3390/rs9111107.
11. **Paes, R. L., Lorenzetti, J. A., Gherardi, D. F. M.** Ship detection using TerraSAR–X images in the Campos Basin (Brazil). *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2010, **7**, 545–548.
12. **Ermakov, S., Kapustin, I., Lazareva, T.** Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface: observations and physical mechanisms, *Proc. SPIE*, 2014, 9240.

Bibliography (transliterated)

1. Overview of first operational DART® Mooring System. Available at: https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/dart_msl.html

Відомості про авторів (About authors)

Гладких Ігор Іванович – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, МПП «ТСБ», м. Одеса, Україна, e-mail: gladkykh958@gmail.com.

Igor Gladkih - doctor of engineering sciences, professor, leader researcher, Private Company (TSB), Odessa, Ukraine, e-mail: gladkykh958@gmail.com.

Капочкіна Маргарита Борисівна - молодший науковий співробітник, Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса, Україна, e-mail: tsb1@ukr.net.

Margaryta Kapochkina - junior scientist, Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium " c. Odessa, Ukraine, e-mail: margo-92@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гладких, І. І. Фізико-статистичне моделювання гідродинамічного поля корабля на базі гідродинамічних розрахунків / **І. І. Гладких, М. Б. Капочкіна** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 98-105. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.14.

Please cite this article as:

Gladkykh, I., Kapochkina, M. Physico-statistical modeling of the hydrodynamic field of the ship on the basis of hydrodynamic calculations. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 9 (1285), 98-105, doi:10.20998/2413-4295.2018.09.14.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гладких, И. И. Физико-статистическое моделирование гидродинамического поля корабля на базе гидродинамических расчетов / **И. И. Гладких, М. Б. Капочкина** / *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 98-105. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.14.

АННОТАЦИЯ Рассмотрены перспективные направления развития систем автоматизированного проектирования кораблей. Показаны преимущества математического гидродинамического моделирования корабля в сравнении с физическим моделированием гидродинамики его модели. Рассмотрены методические проблемы анализа данных математического гидродинамического моделирования корабля. Предложены методические решения и рассмотрены конкретные примеры обработки статистическими методами результатов математического гидродинамического моделирования корабля. На базе цифровой модели корабля исследовано влияние геометрии его корпуса на гидродинамическое поле, рассчитанное путем математического моделирования глубины распространения аномалии избыточного давления в несжимаемой жидкости. Расчеты выполнены для скорости движения корабля в 30 узлов. В результате расчетов полного, и аномалий избыточного давления в водной среде, создаваемых движущимся кораблем, была апробирована методика физико-математического моделирования его гидродинамического поля. Физико-статистическое моделирование реализовано путем применения регрессионного анализа для формализации эмпирических закономерностей. Получены результаты эмпирические зависимости глубины аномалий избыточного давления от скорости объекта. Для района северо-западного шельфа Черного моря выполнено районирование акватории по фактору скорости движения корабля, обеспечивающей скрытное перемещение в условиях предполагаемого развертывания донных гидростатических комплексов мониторинга гидродинамического поля. По результатам районирования построена карта. Расчеты выполнены для конкретной модели корабля и не могут быть применены для кораблей с отличающейся геометрией корпуса. Каждый класс кораблей должен быть обеспечен отдельными расчетами, создаваемого им гидродинамического поля.

Ключевые слова: гидродинамическое поле корабля; поле избыточного динамического давления; скорость судна; геометрия корпуса корабля, рельеф морского дна; регрессионный анализ; гидродинамическое моделирование; гидрография; навигация.

Надійшла (received) 15.03.2018