

*Левченко О.В., Маранов О.В.*

## ПОТОЧНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МАНЕВРНОСТІ СУДЕН ТА ЇХНЬОЇ ГІДРОДИНАМІКИ В ОБМЕЖЕНИХ ВОДАХ

*Метою дослідження є оцінка сучасного стану питання прогнозування маневреності суден і їхньої гідродинаміки в обмежених водах. Для досягнення мети дослідження вивчено історію розвитку цієї галузі знань та вказані основні досягнуті на цьому шляху результати. На основі проведеного аналізу встановлений реальний стан прогнозування маневреності суден в обмежених водах і проблемні питання їхньої гідродинаміки на мілководних ділянках. Питання прогнозування руху суден є пріоритетним у зв'язку зі збільшенням розмірів суден і вимогами щодо підвищення їхньої енергоефективності. Для цього необхідно мати сучасні надійні обчислювальні методи через можливість проведення постійних морських випробувань і модельних експериментів. Розглянуто та проаналізовано історію розвитку питання прогнозування маневреності суден і їхньої гідродинаміки в обмежених водах. Наведені відомі результати різних підходів щодо математичного моделювання гідродинамічних сил у рівняннях руху маневрених суден. Показано основні проблеми ускладнення математичних моделей маневрування. Виділено місце багатовимірних поліномів, що впливають з розкладів в ряд Тейлора, виражають гідродинамічні сили в термінах специфічних для судна гідродинамічних коефіцієнтів інерції та демпфування різного порядку. Показано шляхи, на основі яких дослідники на базі фізичних уявлень, математичних властивостей і досліджень чутливості створили структуру моделі для довільних маневрів керма з трьома ступенями свободи в заданій робочій точці. Ретельно розглянуто внесок дослідників у врахування ефекту мілководдя у загальну процедуру моделювання руху судна. Показано, що на відміну від морських випробувань, маневрові випробування в стиснутих умовах пропонують аналіз гідродинамічних сил на судах в ідеалізованих умовах течії з точки зору жорсткої кінематики тіла, керуючих впливів і глибини води. Дослідження підтверджує, що моделювання складних течій навколо суден, які виникають при маневруванні на мілководді, все ще є складним завданням з точки зору моделювання та залучення обчислювальних ресурсів.*

**Ключові слова:** безпека судноводіння, безпека судноплавства, стиснені води, прийняття рішень, морська справа, метод оцінки, управління судном, безпека, прийняття рішень, екіпаж судна, безпека на морі, навігація, навігаційна безпека.

**Постановка проблеми.** Фахівці в галузі суднової гідродинаміки вже протягом доволі тривалого часу вивчають дані питання прогнозування маневреності суден. Причому дослідження поділяють на два достатньо виокремлені напрямки – прогнозування маневреності суден у відкритому морі й у обмеженому просторі. У відкритому морі, яке являє собою стохастичне середовище, проходить основна частина морських подорожей. Тому дослідники вивчають вплив всього середовища і окремих випадкових факторів на прогнозування характеристик рушіїв і хвильових рухів судна. Але, крім протяжних відкритих морських ділянок, судно рухається також у прибережних районах і на підходах до портів. Ці ділянки характеризуються обмеженістю ефектами гідродинамічної взаємодії суден, що ускладнює їхнє маневрування і рух важчий, а також значно збільшує небезпеку у порівнянні з відкритим морем.

Різкий сплеск інтересу до загальних питань прогнозування маневрування та його органічної складової – маневрування в обмежених водах – викликано такими причинами:

1) суттєве відставання темпів розвитку інфраструктури водних шляхів від швидкості зростання розміром суден. У цьому зв'язку, адміністрації водних шляхів дуже зацікавлені в прогнозуванні руху суден з точки зору входу в порти і системи каналів

2) широке застосування тренажерів для управління суднами для навчання морського персоналу і для аналізу судноплавства. Для перевірки результатів моделювання необхідна дуже висока точність моделювання руху суден;

3) перехід до «зеленого» судноплавства вимагають ретельної оцінки щодо мінімальної потреби в енергії задля забезпечення безпечної та економічної експлуатації судна в несприятливих умовах. Наслідком цього є загальне зменшення енергетичних установок, що безпосередньо відобразиться на обрисі перспективних суден, їхній ефективності і безпечності в експлуатації, особливо з урахуванням впливу хвиль і мілководдя на маневреність суден;

4) методи потенційної течії все ще залишаються ефективним інструментом для гідродинамічного аналізу. Але вибухоподібний розвиток обчислювальних ресурсів і чисельних методів створили конкурентну альтернативу експериментам – аналіз на основі моделювання. З давніх часів основу моделі маневрування суден на мілководді складала експериментальна гідродинаміка. Методи, повністю засновані на моделюванні, майже не застосовувалися через їхню недостатню надійність і продуктивність. Висока складність моделювання турбулентності, ефектів вільної поверхні та руху жорстких тіл, особливо з присіданням судна, стали своєрідним викликом для стрімкого розвитку обчислювально гідродинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics). Цей підхід вже найближчим часом дозволить вирішити багато проблем в судновій гідродинаміці, включаючи маневрування, за рахунок розв'язання усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS – the Reynolds-averaged Navier-Stokes). Бажано дослідити продуктивність, перспективи та обмеження таких чисельних методів, як CFD, для врахування в'язких ефектів і подальшої оцінки надійності, особливо для мілководдя.

**Метою дослідження** є оцінка сучасного стану питання прогнозування маневреності суден і їхньої гідродинаміки в обмежених водах.

### **Виклад основного матеріалу.**

#### **1.1 Сучасний стан питання прогнозування маневреності суден**

З самого початку сучасної історії, коли людина винайшла та стала використовувати надводні судна, їх роль суден торгівлі, транспорті, відпочинку і війні постійно зростала. Разом з тим постійно зростав інтерес до оцінки та покращення експлуатаційних характеристик суден, зокрема маневреності. Вивчення маневреності суден почалося з початку зародження флоту, оскільки судноводії та проектувальники цікавилися характеристиками реакції на вимушені зміни напрямку руху судна. Фундаментальне визначенням маневрування наведено у «Принципах морської архітектури» (PNA – the Principles of Naval Architecture) [1].

Системний підхід щодо огляду наукових досліджень, присвячених проблемі аналізу маневреності суден у середині ХХ сторіччя, був значно доповнений новітньою історією відповідних досліджень у роботі [2] значно. Причому значна увага була приділена практичним аспектам маневреності суден.

Загалом, з кінця 40-их – початку 50-их рр. ХХ сторіччя почалася системна робота в напрямку формування математичних основ та моделей для прогнозування маневрування суден. Серйозна робота була проведена щодо виведення лінійної системи рівнянь руху судна при маневруванні в горизонтальній площині. Трохи пізніше була обговорена модель динаміки ризику, яка була широко застосована до проблем управління курсом. Продовження досліджень дозволили підійти до нелінійних розширень цих рівнянь [3].

Важливий внесок у математичне моделювання маневрування належить Абковіцу [4], який сформулював рівняння маневрування з шістьма ступенями свободи (CC, DoF – degree-of-freedom), використавши модифіковані розклади в ряд Тейлора функціоналів гідродинамічних сил. До склад таких моделей входять множина коефіцієнтів, що описують гідродинамічні властивості, і багатовимірні алгебраїчні поліноми для врахування залежностей сил від рухів жорсткого тіла і змінних поверхні керування. Ідеї, викладені у [4], знайшли матеріальне втілення при впровадженні механічних осциляторів на експериментальних установках на модельному басейні Девіда Тейлора.

Розроблені на цієї базі механізми плоского руху (МПР, РММ – Planar Motion Mechanisms (PMM)) дозволяли здійснювати задані та примусові рухи моделей суден у буксирних баках. Їх можна було використовувати для вивчення рухів, важливих для маневрування, наприклад, коливань чистої хитавиці

або чистого ризику. Методика визначення коефіцієнтів корисної дії при маневруванні суден широко використовувалася під час оцінювання таких випробувань.

У Гамбурзі, Німеччина, в рамках об'єднаного дослідницького центру для суднобудування (Sonderforschungsbereich Schiffbau 98 (SFB 98)) вперше з'явилася установка для випробувань моделей суден на плоский рух. Цим пристроєм був комп'ютеризований візок з планарним рухом (CPMC – Computerized Planar Motion Carriage), за допомогою якого здійснювався рух з великою амплітудою з високою точністю визначення та вимірювання траєкторії. Основний внесок у математичне моделювання процесів маневрування в рамках SFB 98 висвітлено у роботі [5]. Автор детально обговорив роботи CPMC для випробувань маневрування в закритому і відкритому режимах і синхронізації результатів для системної ідентифікації моделей маневрування.

Моделювання сил гідродинамічного демпфування за допомогою модульних функцій другого порядку на основі концепції гідродинамічного опору і моделі, що спираються на декомпозиційні формулювання силових ефектів і застосування експериментів, теорії та емпіричних даних для визначення нових коефіцієнтів маневрування, запропоновані JMMG (японська група з моделювання маневрування, JMMG – the Japanese Maneuvering Modeling Group) розглянуті у дослідженні [6].

Використання теорії тонкого тіла в контексті маневрування судна також зайняло важливе місце у дослідженнях. Важливий теоретичний внесок у розгляд залежного від часу моделювання руху судна з урахуванням ефекту пам'яті рідини зроблено у [7].

За відсутності обчислювальних методів і експериментів повномасштабні маневрені ходові випробування були основним методом вибору для аналізу ефективності маневрування. Вони мають практичне значення для критеріїв маневрування Міжнародної морської організації (ІМО – the International Maritime Organisation), MSC 137(76) (2002). Розвиток обчислювальних методів і збільшення обчислювальних потужностей уможливили чисельні дослідження судових потоків навколо суден, що маневрують, за допомогою CFD. Спочатку було отримано цінну інформацію про сталий дрейф і ризику, а також сили на кермі. Але незабаром такі методи повторили випробування на натурних моделях, і за допомогою CFD стало можливим отримати коефіцієнти маневрування [8].

Застосування математичних моделей обчислювальної гідрогазодинаміки для прогнозування маневрування на глибокій воді було перевірено і підтверджено в майстерні SIMMAN. Первинні дослідження були обмежені потоками з двома тілами. Більш складні випадки, пов'язані з моделюванням вільної поверхні і руху судна, розглядалися попередньо тільки в умовах глибокої води. Нещодавно було виконано пряме CFD моделювання маневрів керма, яке показує додану геометрію корпусу і повторно розв'язує перехідні задачі руху судна, використовуючи доступні чисельні методи для розгляду рухів гребного гвинта і керма. Дуже висока трудомісткість цих симуляцій поки що не може бути використана для параметричних досліджень, про що свідчать роботи [9]. Комітет з маневрування Міжнародної конференції з буксирування танків (ІТТС – International Towing Tank Conference) проводить регулярний огляд пов'язаної з цим дослідницької діяльності.

### **1.2 Сучасний стан гідродинаміки суден в обмежених водах**

Питання руху судна на мілководді, у порівнянні з роботами щодо маневрування на глибокій воді, почали розглядатися відносно рано. Прогнозування впливу мілководдя на рух судна вперед, у т. ч. зміну опору судна і врахування присідання, досліджено у [10].

Усебічним дослідженням гідродинамічних проблем суден, що виникають в обмежених водах, фахівці вважають узагальнюючу працю [11]. У роботі основна увага приділялася прогнозуванню викликаних суднами хвиль на мілководді, формулюванню хвиль на малій воді, формулюванню сил на корпусі судна за наявності вертикальних і бічних обмежень, а також їх наслідків для вертикальних і бічних обмежень та наслідків для руху судна.

Багато зусиль було приділено вивченню хвиль на з використанням усереднених по глибині рівнянь течії типу Буссинеска. Помітний внесок у вивчення мілководних хвиль, спричинених суднами, також належать праці [12].

Краще розуміння теорії тонкого тіла для формулювання руху судна на великій глибині і розширення математичної бази до скінченної глибини води розглянуто у статті [13]. Це стало основою для вивчення сил, що діють на судна в каналах, використовуючи теорію тонкого тіла.

У роботі [14] представлені дослідження щодо маневрування суден на мілководді і порівняння з експериментальними дослідженнями.

Ефекти взаємодії з берегами і суднами розглядаються в роботі [15]. Автори розробили формули сили качки і моменту ристання для двох тіл, що рухаються паралельними траєкторіями, для мілководдя і глибокої води.

Дослідження обгінних маневрів за допомогою панельних методів були розширені в роботі [16].

Стійкість прямолінійного руху та проблеми управління в обмежених водах на основі гідродинамічного аналізу за допомогою панельного методу Ренкіна обговорювалися в роботі [17].

У роботі [18] обговорюються наслідки скінченної глибини води для математичних моделей маневрування. У роботі [19] розвинута лінійна і нелінійна теорія підйому, застосована до течій навколо суден на мілководді. Надалі ці теоретичні результати дозволили провести систематичні експериментальні дослідження впливу глибини води і наслідків для різних математичних моделей маневрування.

Експериментальні дослідження взаємодії судна з берегом та впливу берега виконані у [20]. Спроби валідації моделювання маневрування судна в умовах низької води за допомогою експериментів з вільним ходом описані у [21].

Прогнозування крену має першорядне значення в управлінні зазором під кілем (UKC – under-keel clearance) суден і привертає велику увагу дослідників гідродинаміки. Розв'язання цілого ряду проблем просідання судна наведено у [22]. У роботі [23] узагальнено теоретичні та емпіричні методи прогнозування просідання судна.

Раннє застосування CFD до підйомних течій на мілководді обмежувалося моделюванням нев'язких або подвійних тіл, нехтуючи як збуреннями вільної поверхні, так і просіданням. Важливий внесок щодо надійності CFD для застосування щодо прогнозування просідання та опору надано у [24].

Порівняльні дослідження різних чисельних методів можна знайти в роботі [25]. Огляд діяльності в цій галузі можна знайти в регулярних звітах Комітету з маневрування МТТК і матеріалах Міжнародної конференції з маневрування суден на мілководді та в континентальних водах (MASHCON – Manoeuvring in Shallow and Confined Waters). Застосування CFD до обтікання суден на мілководді нещодавно розглядалося на MASHCON [26].

**Висновки.** Представлено результати вивчення стану досліджень щодо прогнозування маневрування суден на мілководних ділянках. Зростаюча потреба в прогнозуванні руху суден у зв'язку зі збільшенням розмірів суден і вимогами до енергоефективності вимагає оцінки надійності обчислювальних методів, оскільки морські випробування і модельні експерименти не завжди можливі, наприклад, на ранніх стадіях проектування суден.

Розглянуто та проаналізовано історію розвитку питання і наведені отримані результати різних підходів до математичного моделювання гідродинамічних сил у рівняннях руху маневрених суден. Показано, яким чином ускладнювалися математичні моделі маневрування, представлені системою зв'язаних нелінійних диференціальних рівнянь в рамках ньютонівської механіки.

Показано місце багатовимірних поліномів, що впливають з розкладів в ряд Тейлора, виражають гідродинамічні сили в термінах специфічних для судна гідродинамічних коефіцієнтів інерції та демпфування різного порядку.

Показано шлях, на основі якого на базі фізичних уявлень, математичних властивостей і досліджень чутливості створено структуру моделі для довільних маневрів керма з трьома ступенями свободи в заданій робочій точці.

Ретельно розглянуто внесок дослідників у врахування ефекту мілководдя у загальну процедуру моделювання руху судна.

Показано, що на відміну від морських випробувань, маневрові випробування в стиснутих умовах пропонують аналіз гідродинамічних сил на суднах в ідеалізованих умовах течії з точки зору жорсткої кінематики тіла, керуючих впливів і глибини води.

Показано місце CFD у проведенні маневрових випробувань судна в умовах обмежених вод. Було виявлено перелік робіт, в яких за допомогою імітаційного моделювання було отримано набір маневрових

коефіцієнтів для довільних маневрів керма за короткий час з використанням помірних обчислювальних ресурсів.

Дослідження підтверджує, що моделювання складних течій навколо суден, які виникають при маневруванні на мілководді, все ще є складним завданням з точки зору моделювання та залучення обчислювальних ресурсів. Це є головною перешкодою для остаточного перетворення CFD з інструменту для академічних досліджень на інструмент для промислового використання.

Майбутні дослідження в галузі CFD будуть спрямовані на розробку гібридних моделей течії, які прагнуть забезпечити дрібномасштабну роздільну здатність течії в ближній зоні і спрощені форми рівнянь Нав'є-Стокса у відповідних областях області розв'язку.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Mandel, P., 1965, *Ship maneuvering and control*, In J.P. Comstock (Ed.), Principles of Naval Architecture, pp. 463-606, SNAME.
2. Sutulo, S., Guedes Soares, C., 2011, *Mathematical models for simulation of manoeuvring performance of ships*, Marine Technology and Engineering, Taylor and Francis Group.
3. Wagner-Smith, L., 1971, *Steering and Manoeuvring of Ships Full Scale and Model Tests*, European Shipbuilding, 20(1).
4. Abkowitz, M.A., 1964, *Lectures on Ship Hydrodynamics- Steering and Maneuverability*, Hydro- og Aeodynamisk Laboratorium, Lyngby, Report No. Hy-5.
5. Oltmann, P., 1978, *Bestimmung der Manövriereigenschaften aus den Bahnkurven freimanövrierender Schiffsmodele*, Institut für Schiffbau, Hamburg, Bericht Nr. 364 (in German).
6. Yasukawa, H., Yoshimura, Y., 2014, *Roll-Coupling Effect on Ship Maneuverability*, Ship Technology Research: Schiffstechnik, 61(1):16-32.
7. Cummins, W.E., 1962, *The Impulse Response Function And Ship Motions*, David Taylor Model Basin, Hydrodynamics Laboratory Research and Development Report 1661.
8. Cura-Hochbaum, A., 2006, *Virtual PMM Tests for Manoeuvring Prediction*, Proc. of the 26th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics.
9. Mofidi, A., Carrica, P., 2014, *Simulation of zigzag maneuvers for a containership with direct moving rudder and propeller*, Computers & Fluids, 96:191-203.
10. Kreitner, J., 1934, *Ueber den Schiffswiderstand auf beschraenktem Wasser*, Werft, Reederei, Hafen, 15 (in German).
11. Tuck, E.O., 1978, *Hydrodynamic Problems of Ships in Restricted Waters*, Ann. Rev. Fluid Mechanics, 10:33-46.
12. Alam M.R., Mei, C.C., 2008, *Transcritical ship waves in a randomly uneven channel*, Journal of Fluid Mechanics, 616:397-417.
13. Tuck, E.O., Taylor, P.J., 1970, *Shallow Water Problems in Ship Hydrodynamics*, Proc. of 8th Symposium on Naval Hydrodynamics.
14. Zhao, Y.X., 1986, *Hydrodynamische Kräfte an manövrierenden Schiffen auf flachem Wasser*, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Bericht Nr. 466 (in German).
15. Tuck, E.O., Newman, J.N., 1978, *Hydrodynamic Interactions Between Ships*, Proc. of the 12th Symposium on Naval Hydrodynamics.
16. Von Graefe, A., 2014, *Rankine-source method for ship-ship interaction and shallow water flows*, PhD-Thesis, University of Duisburg-Essen.
17. Thomas, B. S., Sclavounos, P. D., 2006. *Optimal Control Theory Applied to Ship Maneuvering in Restricted Waters, Readings in Marine Hydrodynamics*, Volume to be Published in Honor of Professor J. Nicholas Newman.
18. Norrbin, N.H., 1971, *Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model for Ship Manoeuvring in Deep and Confined Waters*, Statens Skeppsprovninganstalt, Gothenburg, Publ. No. 68.
19. Inoue, S., Murayama, K., 1969, *Calculation of Turning Ship Derivatives in Shallow Water*. Trans. of the West-Japan Society of N.A.

20. Vantorre, M., Verzhbitskaya, E., Laforce, E., 2002, *Model Test Based Formulations of Ship-Ship Interaction*, Schiffstechnik, 49:124-141.
21. Eloot, K., Delefortrie, G., Vantorre, M., Quadvlieg, F., 2015, *Validation of Ship Manoeuvring in Shallow Water Through Free-Running Tests*, Proceedings of the 34th ASME International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2015-41912.
22. Gourlay, T.P., 2011, *A brief history of mathematical ship-squat prediction, focussing on the contributions of E.O. Tuck*, Journal of Engineering Mathematics, 70(1-3):5-16.
23. Millward, A., 1992, *A comparison of the theoretical and empirical prediction of squat in shallow water*, International Shipbuilding Progress, 417:69-78.
24. Deng, G.B., Guilmineau, E., Leroyer, A., Queutey, P., Visonneau, M. and Wackers, J., 2014, *Simulation of container ship in shallow water at model scale and full scale*, Proc. of the 3rd National CFD Workshop for Ship and Offshore Engineering.
25. Mucha, P., Deng, G., Gourlay, T., el Moctar, O., 2016, *Validation Studies on Numerical Prediction of Ship Squat and Resistance in Shallow Water*, Proc. of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction.
26. Uliczka, K., Böttner, C.U., Kastens, M., Eloot, K., Delefortrie, G., Vantorre, M., Candries, M., Lataire, E., 2016, *Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction*, Hamburg.

**Levchenko O.V., Maranov O.V.**

#### **THE CURRENT STATE OF RESEARCH ON PREDICTING THE MANOEUVRABILITY OF SHIPS AND THEIR HYDRODYNAMICS IN CONFINED WATERS.**

*The purpose of the study is to assess the current state of the art of predicting ship manoeuvrability and hydrodynamics in confined waters. To achieve the research objective, the author examines the history of development of this field of knowledge and indicates the main results achieved along the way. Based on the analysis, the real state of ship manoeuvrability prediction in confined waters and problematic issues of their hydrodynamics in shallow water areas are established. The issue of predicting vessel movement is a priority due to the increase in the size of ships and the requirements to improve their energy efficiency. For this purpose, it is necessary to have modern reliable computational methods due to the possibility of conducting continuous sea trials and model experiments. The history of the development of the issue of predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters is considered and analysed. The known results of various approaches to mathematical modelling of hydrodynamic forces in the equations of motion of manoeuvrable ships are presented. The main problems of complication of mathematical models of manoeuvring are shown. The place of multidimensional polynomials, which follow from the Taylor series expansions, expressing hydrodynamic forces in terms of ship-specific hydrodynamic coefficients of inertia and damping of different orders, is highlighted. The ways in which researchers have used physical concepts, mathematical properties and sensitivity studies to create a model structure for arbitrary rudder manoeuvres with three degrees of freedom at a given operating point are shown. The contribution of researchers to the consideration of the effect of shallow water in the general procedure for modelling ship motion is thoroughly considered. It is shown that, unlike sea trials, compressed manoeuvre tests offer an analysis of hydrodynamic forces on ships under idealised flow conditions in terms of rigid body kinematics, controlling influences and water depth. The study confirms that modelling the complex flows around ships that occur during manoeuvring in shallow water is still a challenging task in terms of modelling and computational resources.*

**Keywords:** navigation safety, shipping safety, compressed waters, decision-making, maritime affairs, assessment method, ship management, safety, decision-making, ship's crew, safety at sea, navigation, navigational safety.