

Маслов І.З., Фуклев О.І.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ГІДРОДИНАМІКИ СУДНА НА ХВИЛЮВАННІ

У роботі розглянуто науково-практичне завдання, рішення якого представляє собою значний практичний інтерес. Існуючі методики обґрунтування параметрів хитавиці вимагають залучення результатів дорогих модельних експериментів, зокрема, для врахування в'язкісного демпфірування. Можливості існуючої комп'ютерної техніки, комп'ютерних технологій та відповідного програмного забезпечення дозволяють на початкових етапах проектування морських технічних об'єктів досить точно прогнозувати параметри їх хитавиці на хвилюванні з урахуванням сил в'язкісної природи. Це дозволяє значно знизити вартість проектних робіт у частині визначення гідродинамічних характеристик морських об'єктів. На підставі виконаних досліджень отримані такі результати: виконаний аналіз існуючих підходів щодо розв'язання задач гідродинаміки та динаміки (хитавиці) морських суден й інших технічних споруд на хвилюванні, розроблено математичну модель комплексної задачі гідродинаміки та динаміки морського об'єкта для в'язкої рідини, розроблено методику проведення чисельного експерименту розрахунку хитавиці на регулярному хвилюванні, розроблено програмне забезпечення для підготовки вихідних даних та обробки результатів чисельного експерименту розроблені практичні рекомендації для чисельного моделювання хитавиці морського об'єкта на регулярному хвилюванні і визначення динамічних параметрів хитавиці, проведено чисельне моделювання динаміки руху морського судна на хвилюванні.

Ключові слова: *математичні моделі, гідродинаміка, в'язкість, хвилювання, хитавиця, судно, морські об'єкти.*

Метою дослідження є формування методики спільного розв'язання задач гідродинаміки та динаміки морських об'єктів для проектування оптимальних корпусів суден.

Виклад основного матеріалу. Для розробки практичних проектних рекомендацій щодо удосконалення конструкцій, підвищення живучості суден необхідно моделювати динамічну поведінку морських об'єктів. Тобто необхідно отримувати оцінки амплітудно-частотних та фазово-частотних характеристик (при розв'язанні задач у частотній області), отримувати характеристики динамічних процесів (при розв'язанні задач у часовій області). Існуючі методики розв'язання таких задач відносно морських об'єктів на даний час засновані на теорії ідеальної рідини, що значно звужує область можливих практичних досліджень.

Урахування в'язкісних характеристик рідини особливо важливе при розв'язанні завдань, в яких необхідно враховувати складності фізичного процесу хвилеутворення, плівкові ефекти, кавітацію, відносно малу товщину прикордонного шару. Такі ефекти виявляються при великих швидкостях руху суден. Задачі динамічного поведіння об'єктів на крутому хвилюванні також вимагають урахування в'язкості.

Розвиток запропонованої методики розв'язання задач гідродинаміки та динаміки морських об'єктів у рамках єдиного підходу дозволить спростити обґрунтування форми морських технічних споруд та засобів, розв'язання спеціальних нестандартних задач за рахунок часткової або повної відмови від дорогих модельних експериментів. До таких відносяться задачі, які вимагають урахування нелінійних ефектів при моделюванні хитавиці судна: вплив гідродинамічних ефектів коливного рідкого вантажу на динаміку судна; оголення корпусу судна, що приводить до слемінгу, що обумовлюють додаткові

динамічні навантаження на конструкції корпусу в носовому районі – слопінг; взаємний вплив хитавиці двох судів, наприклад при обґрунтуванні можливості передачі вантажу у морі; вплив обмеженої ширини та глибини акваторії на динаміку судна.

Основними джерелами, які використовуються у ході дослідження, є роботи Ткаченка І.В., Нікущенко Д.В., Таранова А.Є., Ferziger J.H., Peric M., Paterson E., Wilson R., Coleman H., Simonsen C. [1-16]

Для чисельного моделювання потоків із гравітаційними хвилями звичайно використовуються два різні методи. Один з них заснований на гіпотезі безвихрового (потенційного) плину. Для моделювання потоку використовується спектральна теорія або застосовуються граничні інтегральні рівняння. Другий метод заснований на рівняннях Нав'є-Стокса або Ейлера, які розв'язуються без явних спрощень. Потенційним потоком можна точно описати нестационарні гравітаційні хвилі кінцевих амплітуд, які можуть моделюватися з усіма нелінійними ефектами й без будь-якого істотного хвильового загасання. Проте взаємодію хвиль із плином, зокрема, з полями кутових швидкостей, таким методом описати складно через властиві спрощення. Вплив в'язкості або турбулентності на рух хвилі також не може бути врахований. При розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса такі обмеження, пов'язані з відсутністю кутових швидкостей, в'язкості й турбулентності, не накладаються.

У той же час розв'язання нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса для опису вільної поверхні звичайно приводять до порівняно більших числових помилок, які не дозволяють проводити точні довгочасні реалізації гравітаційних хвиль. Ці помилки проявляються головним чином у деяких з таких випадків. По-перше, дуже складно точно описати геометрію вільної поверхні та її еволюцію в часі, якщо тільки область рідини не дискретизована досить точно у межах її границь, наприклад, використовуючи метод спостереження за вільною поверхнею. У цьому випадку граничні умови повинні бути сформульовані у рухомій системі координат, що приводить до значного збільшення розрахункового часу. Такий підхід був введений у роботі Чана і часто називають методом рухомої сітки (Arbitrary Lagrangian-Eulerian – ALE). По-друге, для умов нестискаемого потоку граничні умови звичайно модифікують для забезпечення коректного зв'язку між полем швидкості і полем тиску. Це робиться або шляхом введення у граничні умови параметрів, що моделюються штучну стискальність, або з використанням методів, заснованих на SIMPLE/PISO алгоритмах, методах маркерів і гнізд (MAC) чи дробового кроку.

Реалізація граничних умов щодо тиску для твердих стінок у цих методах відносно проста. Однак, на вільній поверхні це не так, оскільки потрібне точне визначення абсолютного значення тиску для правильного опису переносу між потенційною й кінетичною енергією у хвильовому русі.

Для вирішень даних використовується модифікована версія методу Vof. Він зводиться до введення штучного члена для піджимання інтерфейсу поблизу вільної поверхні, а для виключення чисельних помилок, які накопичуються згодом при моделюванні гравітаційних хвиль, вводяться зони релаксації.

Зони релаксації реалізовані для того, щоб уникнути відбиття хвиль від вихідних границь та уникнути відбиття хвиль всередині обчислювальної області. Такі відбиті хвилі є чисельними помилками, які згубно впливають на границю, в якій генерується хвиля (можуть привести до чисельної нестійкості) та на вірогідність успішності чисельного експерименту в цілому. У цьому підході після кожного кроку часу при чисельному моделюванні частина обчислювального рішення поля модифікується відповідно до бажаного аналітичного рішення, яке представляє собою хвильову теорію.

Для верифікації результатів розрахунків судна на тихій воді використовувалися результати робіт, в яких досліджувалася серія корпусів тіла Виглей (Wigley). У дослідженні

було досліджено тіло з коефіцієнтом повноти мідель шпангоута 0,909 та відношенням довжини й ширини 10.

Результати розрахунків зіставлялися з експериментальними даними. Головні розміри для тіла Виглей наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики тіла Виглей

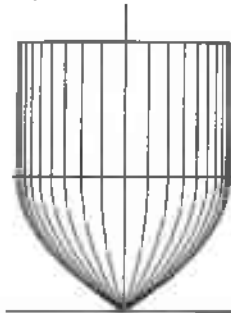
Довжина, L (м)	3
Ширина, B (м)	0,3
Осад, d (м)	0,1875
Висота борту, H (м)	0,375
L/B (-)	10
β	0,6667
Водотоннажність V, (м ³)	0,078

У загальному випадку тіло Виглей представляє собою корпус із прямолінійним форштевнем та ахтерштевнем, ординати шпангоутів якого описуються рівнянням:

$$\eta = (1 - \zeta^2)(1 - \xi^2)(1 + a_2\xi^2 + a_4\xi^4) + a\zeta^2(1 - \zeta^8)(1 - \xi^2)^4, \quad (1)$$

де ξ – поздовжня координата, $-0.5 \leq \xi \leq +0.5$,
 η – поперечна координата, $-0.5 \leq \eta \leq +0.5$,
 ζ – вертикальна координата, $0 \leq \zeta \leq +1$.

Досліджуване тіло Виглей має такі характеристики: $a_2=0,2$, $a_4=0,0$, $a=0,0$. Множення ξ, η та ζ на $L/2, B/2$ й d дає розмірний вид тіла Виглей, де L – довжина судна, B – ширина судна, а d – осадка судна. Теоретичне креслення тіла Виглей показано на рис. 1.



Рисунк 1 – Теоретичне креслення корпусу тіла Виглей

Розрахункові сітки. Для генерації розрахункової сітки використовувалася утиліта `createmesh`, що дозволяє в автоматичному режимі будувати структуровану сітку зі згущенням до досліджуваного об'єкта й утиліта `snappyhexmesh` з пакета Openfoam, що дозволяє вирізати й апроксимувати досліджуваний об'єкт із існуючої сітки.

При побудові розрахункової сітки слід врахувати, що y^+ не повинен бути менше 30.

$$y^+ \equiv \frac{U_{fric} \cdot ds}{\nu}; \quad (2)$$

$$U_{fric} = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}}; \quad (3)$$

$$\tau_{wall} = \frac{C_f \rho U_\infty^2}{2}; \quad (4)$$

$$C_f = \frac{0,026}{Re^{1/7}}; \quad (5)$$

$$Re = \frac{U_\infty L}{\nu}, \quad (6)$$

де y^+ – безрозмірна відстань першого гнізда від стінки тіла;

ds – характерний розмір першого гнізда у стінки тіла;

U_{fric} – швидкість тертя в пристіночній області;

τ_{wall} – тензор дотичних напружень;

C_f – опір тертя пластини;

Re – число Рейнольдса.

Структурована розрахункова сітка для тіла Виглей складається з 3 мільйонів гнізд, а її вигляд представлений на рис. 2.

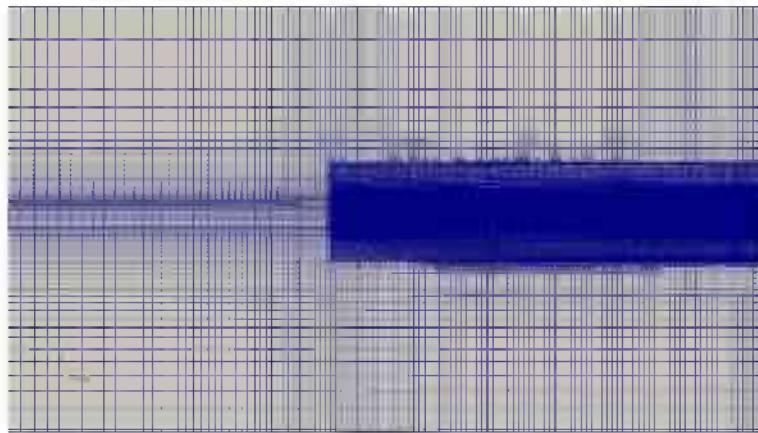


Рисунок 2 – Фрагмент розрахункової сітки для тіла Виглей

Моделювання руху тіла Виглей на тихій воді. Розрахунки руху судна на тихій воді були виконані з метою верифікації методики визначення інтегральних характеристик та оцінювання параметрів корабельних хвиль.

Умови чисельного експерименту були прийняті такі:

– число Фруда $Fr = u_0 \sqrt{gL}$, де u_0 – швидкість набігаючого потоку варіювалося від 0,2 до 0,4;

– щільність повітря покладалася рівною $\rho_{\text{повітря}} = 1,233 \text{ кг/м}^3$, кінематична в'язкість - $\nu_{\text{повітря}} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$;

– щільність та кінематична в'язкість води – $\rho_{\text{води}} = 988,8 \text{ кг/м}^3$ та $\nu_{\text{води}} = 1.11 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ відповідно.

Для урахування впливу турбулентної інтенсивності Tu на величину інтегральних характеристик зроблена серія розрахунків, результати яких наведено в табл. 2 і у графічному виді на рисунках 3-4.

$$Tu = \frac{u'}{U}, \quad (7)$$

де $u' = \sqrt{u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2} = \sqrt{\frac{2}{3}k}$ – середньоквадратичне значення турбулентних пульсацій швидкості; $U = \sqrt{U_x + U_y + U_z}$ – середня швидкість.

Сила опору F дорівнює $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$, де F_x – поздовжня сила, що діє уздовж осі OX ; F_y – поперечна сила, що діє уздовж осі OY ; F_z – вертикальна сила, що діє уздовж осі OZ , що й визначаються за формулами:

$$F_x = F_{p_x} + F_{v_x} = - \oint p \cos(p, x) + \tau_0 \cos(\tau_0, x) dS; \quad (8)$$

$$F_y = F_{p_y} + F_{v_y} = - \oint p \cos(p, y) + \tau_0 \cos(\tau_0, y) dS; \quad (9)$$

$$F_z = F_{p_z} + F_{v_z} = - \oint p \cos(p, z) + \tau_0 \cos(\tau_0, z) dS. \quad (10)$$

Тут p та τ_0 напруги поверхневих сил, що виникають при обтіканні тіла, F_p – складова сила за тиском, F_v – в'язкісна складова сили.

У роботі показано, що турбулентні інтенсивності у діапазоні 1-5 % дають найменше відхилення $Error_0$, від експериментальних даних, яке становить від 3,4 % до 11,8 % для різних чисел Фруда, що узгоджується з експериментальними отриманими результатами. В'язкісна складова опору v_0 , при цьому становить від 47,0 % до 79,3 %.

Таблиця 2 – Сила опору тіла Виглей залежно від числа Фруда й турбулентної інтенсивності

Fr	0.2	0.3	0.4
Експеримент [3], Н	3.42	9.97	19.86
$Tu, \%$	0.1		
$F_x = F_{px} + F_{vx}, \text{ Н}$	1.67	6.13	15.88
$F_{px}, \text{ Н}$	0.76	4.61	9.19
$F_{vx}, \text{ Н}$	0.90	1.51	6.69
$Error\%$	51.2	38.6	20.0
v°_0	54.2	24.7	42.1
$Tu, \%$	0.5		
$F_x = F_{px} + F_{vx}, \text{ Н}$	1.67	9.52	17.73
$F_{px}, \text{ Н}$	0.76	4.48	9.30
$F_{vx}, \text{ Н}$	0.91	5.04	8.43
$Error\%$	51.2	4.5	10.7
v°_0	54.3	52.9	47.6
$Tu, \%$	1.0		
$F_x = F_{px} + F_{vx}, \text{ Н}$	3.19	9.63	17.64
$F_{px}, \text{ Н}$	0.66	4.48	9.28
$F_{vx}, \text{ Н}$	2.53	5.15	8.37
$Error\%$	6.7	3.4	11.2
v°_0	79.3	53.5	47.4
$Tu, \%$	5.0		
$F_x = F_{px} + F_{vx}, \text{ Н}$	3.20	9.61	17.52
$F_{px}, \text{ Н}$	0.66	4.48	9.28
$F_{vx}, \text{ Н}$	2.54	5.13	8.24
$Error\%$	6.4	3.6	11.8
v°_0	79.3	53.4	47.0

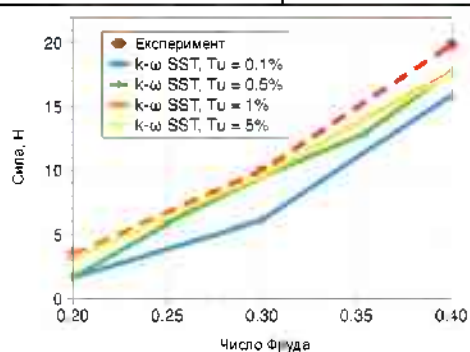


Рисунок 3 – Сила опору тіла Виглей залежно від числа Фруда та турбулентної інтенсивності

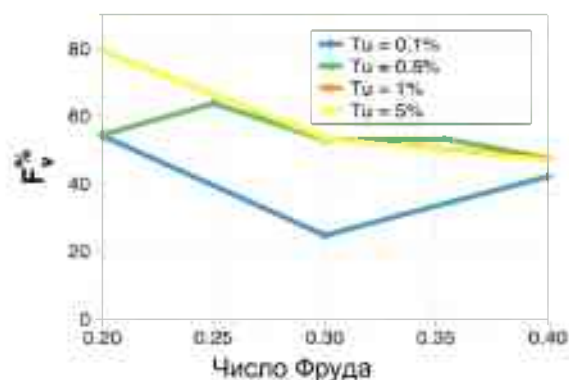


Рисунок 4 – В'язкісна складова опору у відсотках від повного опору тіла Виглей

Розподіл динамічного тиску й положення вільної поверхні по корпусу тіла Виглей для різних чисел Фруда представлені на рис. 5 (а-в).

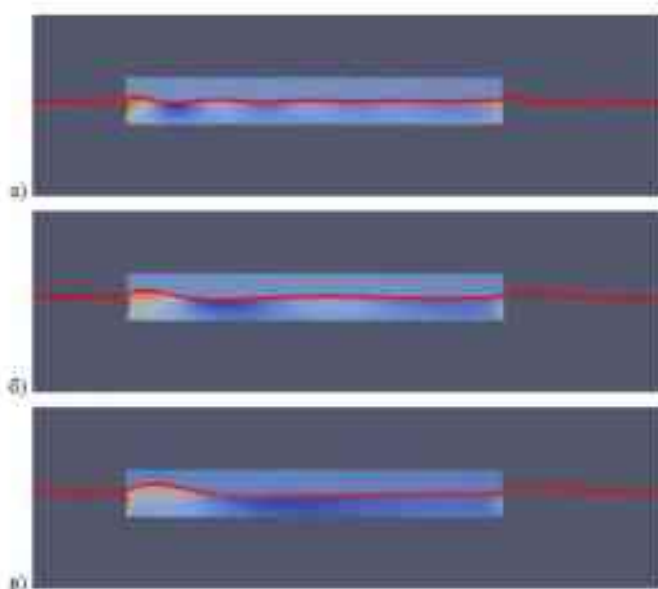


Рисунок 5 – Розподіл тиску та положення вільної поверхні на корпусі тіла Виглей при різних числах Фруда: а) 0.2, б) 0.3, в) 0.4.

При русі судна по вільній поверхні рідини виникають хвилі, які викликають хвильовий опір. Це обумовлено дією сили ваги і сил поверхневого натягу на границі розділу середовищ. Вільна поверхня не перешкоджає виникненню вертикальних перемішень рідини, тому у районі носа й корми, де відповідно до рівняння Бернуллі при обтіканні тіла тиск підвищений, рівень рідини підвищується, а в середній частині, де у потоці виникає розрядження, – знижується.

Частки рідини, розташовані близько до поверхні й виведені зі стану рівноваги, під дією сил ваги та поверхневого натягу починають робити коливання, фаза яких внаслідок сил інерції відстає від основних збурень. Ці коливання, джерелами яких є носовий та кормовий край судна, викликають вторинні викривлення вільної поверхні та додаткові

швидкості у потоці. Отже, картина хвильоутворення виникає у результаті складного процесу накладення цих видів деформацій вільної поверхні.

У носовому краї судна у місці контакту корпусу з вільною поверхнею утворюється бугор, зона підвищених тисків на корпусі.

Вниз за течією тиск падає. У районі міделевого перетину спостерігається його незначне підвищення. У кормовому краї тиск вищий, ніж у районі міделевого перетину, але нижчий ніж у носі.

Зміна поля швидкостей, викликана хвильоутворенням, призводить до появи хвильових тисків, у результат дії яких створює силу хвильового опору, а також інші складові сил та моментів хвильової природи.

Картина хвильоутворення залежить від швидкості руху судна. Зі збільшенням швидкості у кормовій частині виникають значні розрідження, які поряд з підвищенням тиску в носі викликають хвильовий опір.

Характерна картина хвильоутворення показана на рис. 6.

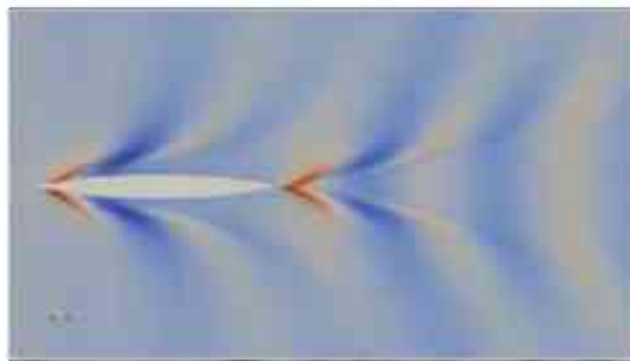


Рисунок 6 – Система хвиль біля тіла Виглей при $Fr=0.3$. Вид зверху.

Чітко спостерігається носова та кормова система хвиль. Кут нахилу гребенів хвиль до діаметральної площини становить близько 20 градусів, що добре узгоджується з теоретичним значенням (кут Кельвіна).

Для проведення моделювання хитавиці морських об'єктів на хвилюванні потрібно визначити показники чисельного басейну. Внаслідок того, що задача розв'язується у в'язкісній постановці, необхідно отримати достатній сітковий розподіл за всією висотою гравітаційної хвилі. Інакше, може відбутися в'язкісна дисипація хвилі із сильною зміною енергетичних і геометричних параметрів.

Умови чисельного експерименту. Для завдання хвильової поверхні використовувалася хвиля Стокса першого роду описується такими рівняннями:

$$\zeta = \zeta_a \cdot \cos(kx - \omega t + kU_0 t); \quad (11)$$

$$u_x = \zeta_a \cdot \omega \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cdot \cos(kx - \omega t + kU_0 t); \quad (12)$$

$$u_y = \zeta_a \cdot \omega \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cdot \sin(kx - \omega t + kU_0 t), \quad (13)$$

де ζ – положення вільної поверхні, u_x, u_y – проєкції швидкостей, ζ_a – амплітуда хвилі, ω – кутова частота хвилі, k – хвильове число, ε – фаза хвилі, h – глибина басейну, z – координата по глибині, U_0 – швидкість течії. Хвильові постійні визначаються через співвідношення:

$$k\lambda = 2\pi; \quad (14)$$

$$\omega T = 2\pi; \quad (15)$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}; \quad (16)$$

$$H = 2 \cdot \zeta_a; \quad (17)$$

$$\omega^2 = kg \cdot \tanh kh, \quad (18)$$

де λ – довжина хвилі, T – період хвилі, c – фазова швидкість хвилі, H – висота хвилі, g – гравітаційна постійна.

Задача моделювання хвилі Стокса розв'язується у двовимірній постановці. На рис. 7 схематично представлені зони релаксації у чисельному басейні. В експерименті проводиться аналіз їх впливу на стійкість хвилі. Між зонами розташовується 20 реперних точок, в яких у кожний момент часу моделювання фіксується положення вільної поверхні для порівняння з вихідною хвилею.

На рис. 8 наведена розрахункова сітка. Зроблений аналіз сіткової збіжності, в якому варіювалася кількість ґнізд на довжину й висоту хвилі.



Рисунок 7 – Розташування зон релаксації в чисельному басейні

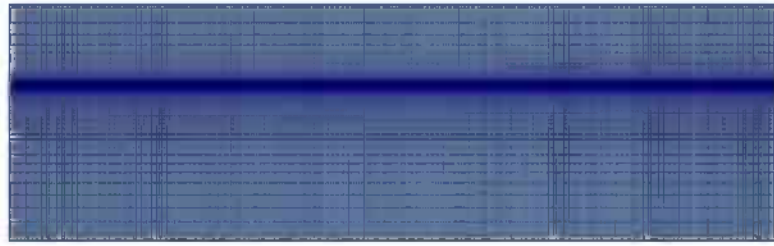


Рисунок 8 – Зразковий варіант розрахункової сітки

Результати розрахунків. У серії чисельних експериментів було розглянуто дві хвилі, одна мала крутість $H/\lambda=0,012$, а інша – у 10 разів меншу $H/\lambda=0,0012$, тобто при тій самій висоті мала довжину у 10 раз більшу.

Для проведення чисельного експерименту потрібно визначити розміри чисельного басейну, зону досліджуваного об'єкта з відповідним згущенням розрахункової сітки для точного визначення гідродинамічних сил, а також зону, в якій повинна добре моделюватися хвильова поверхня.

Для спрощення створення розрахункової сітки та збільшення швидкості підготовки завдання для чисельного моделювання мовою програмування Python написана утиліта `createmesh`, в основі якої лежать алгебраїчні рівняння. Програма підготує файл, структура якого використовується утилітою `blockmesh`, яка входить в `Openfoam`.

Вона дозволяє будувати структуровані сітки, що складаються з гексаедрів. Основний принцип роботи утиліти `blockmesh` – розподіл розрахункової області на один або більш тривимірних гексаедральних блоків. Ребрами цих блоків можуть бути відрізки прямих, дуги або сплайни. Розрахункова сітка виходить розбивкою кожного блоку на певне число гнізд у кожному напрямку. Кожний блок геометрії визначається 8 координатами, по одній на кожний кут гексаедра. Кожний блок має локальну систему координат, яка повинна бути визначена за правилом правої руки. Вихідні параметри утиліти `createmesh` для створення розрахункової області наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Вихідні параметри утиліти `createmesh` для створення розрахункової сітки чисельного басейну

Змінна	Розшифрування	Опис
L	Length	Довжина досліджуваного об'єкта, м
B	Breadth	Ширина досліджуваного об'єкта, м
H	Height	Висота досліджуваного об'єкта, м
λL	λ/L	Відносна довжина хвилі λ/L , -
wH	wave Height	Висота зони хвилі, м
$wHnC$	wave Height number of Cells	Кількість гнізд на висоту хвилі, -
$wLnC$	wave Length number of Cells	Кількість гнізд на довжину хвилі, -
$sCtC$	side Cell to Cell	Коефіцієнт згущення сітки, -
iR	input Ratio	Відносна довжина вхідної області, -
hR	hull Ratio	Відносна довжина області досліджуваного об'єкта, -
oR	output Ratio	Відносна довжина вихідної області, -
sR	side Ratio	Відносна довжина бічної області, -
bR	bottom Ratio	Відносна глибина області води, -
tR	top Ratio	Відносна висота області повітря, -

Для обробки значного обсягу експериментальних даних потрібно спеціалізоване програмне забезпечення. При проведенні чисельного моделювання у кожний момент

розрахункового часу відбувається запис вихідних даних у спеціальний файл реєстрації – лог файл.

Чисельне моделювання нестационарних процесів повинно задовольняти критерію Куранта-Фридрихса-Леві (критерій КФЛ) – швидкість поширень збурювань у різницевому завданні не повинна бути меншою, ніж у диференційній формі. Якщо ця умова не виконана, то результат різницевої схеми може не відповідати рішенню диференціальних рівнянь.

Інакше кажучи, за один крок за часом частка не повинна проходити більш одного гнізда.

В одномірному випадку умова має вигляд:

$$C_0 = \frac{|U| \cdot \Delta t}{\Delta x} < C, \tag{19}$$

де U – швидкість переносу, Δt – часовий крок, Δx – просторовий крок, C – константа.

Якщо $C_0 > 1$, то стійкість та збіжність рішення різницевої задачі до рішення диференціальної задачі відсутні. На практиці для стійкості процесу значення константи C приймається 0,5. Зменшення числа C_0 приводить до зменшення часового кроку, що, у свою чергу, збільшує час обчислень, а також обсяг отриманих вихідних даних.

Для визначення інтегральних характеристик у кожний момент часу відбувається реєстрація складових сил та моментів за тиском (20) та в'язкості (21), що діють із боку рідини на тверде тіло:

$$F_{pi} = - \oint p \cos(p, i) dS; \tag{20}$$

$$F_{vi} = - \oint \tau_0 \cos(\tau_0, i) dS, \tag{21}$$

де p і τ_0 – напруги поверхневих сил, що виникають при обтіканні тіла, $i=x,y,z$ – відповідні проекції.

Для визначення переміщення твердого тіла у просторі під дією збурюючих сил у кожний момент часу відбувається реєстрація положення центру мас, а також його лінійних та кутових швидкостей.

Для обробки чисельного експерименту розроблений програмний комплекс, структура якого зображена на рис. 9.



Рисунок 9 – Блок-схема структури програмного комплексу readlog

Розроблена програма розділена на 5 підпрограм:

Визначення часових характеристик, в якій відображається поточний час моделювання. Повний час розділяється на час, витрачений на ітераційні процеси

визначення поля тиску та швидкості, на визначення скалярів моделей турбулентності і фракції рідини, а також для динамічної системи, на зміну розрахункової сітки під нове положення досліджуваного об'єкта.

Визначення сил та моментів. Унаслідок того, що гідродинамічні характеристики у нестационарному процесі реєструються з непостійним часовим кроком, який варіюється залежно від критерію КФЛ, підпрограма для осереднення процесу виконує чисельне інтегрування за правилом трапеції.

Визначення переміщень твердого тіла. Як було сказано вище, у лог-файл Openfoam при переміщенні досліджуваного об'єкта реєструється положення його центру мас та лінійні й кутові швидкості. Для визначення амплітуд вертикальних й кутових переміщень підпрограма робить інтегрування лінійних та кутових швидкостей, а потім за допомогою спеціальної функції знаходить піки зареєстрованого сигналу й виконує їх осереднення.

Визначення зони чисельного басейну. Для визначення зони чисельного басейну необхідно провести аналітичне дослідження динаміки морського об'єкта на регулярному хвилюванні. Тим самим визначити основні параметри хвилювання, при якому можливий резонанс, такі як довжина хвилі, частота та її період. Таке аналітичне рішення є неточним, але достатнім для визначення області, в якій необхідно зосередити найбільшу кількість прогонів чисельного експерименту.

Визначивши довжину хвилі, можна визначити область, в якій буде виконуватися чисельне моделювання. Для формування стійкої хвилі потрібно, щоб перед досліджуванним тілом можна було розташувати три довжини хвилі. Причому дві довжини хвилі повинні бути розташовані в зоні релаксації – зоні «розгону» та «формуванні» чисельної хвилі. Ще одна довжина хвилі перед досліджуванним тілом необхідна для того, щоб відбиті хвилі від тіла дисипірували й не деформували вже згенеровану хвилю.

Для відпрацювання чисельного кордону – зворотної зони релаксації, необхідне розміщення більш чотирьох довжин хвиль за досліджуванним тілом. Одна довжина хвилі поблизу тіла для якісної картини обтікання і, як наслідок, фізично вірної взаємодії об'єкта та обтічного середовища. І три довжини хвилі на зону чисельного кордону для того, щоб використовувана функція могла без чисельних помилок «дисипірувати» наявні коливання вільної поверхні.

При побудові розрахункової сітки, слід врахувати такі моменти:

1. Безрозмірна відстань першого гнізда від стінки тіла y^+ не повинна бути більше 30, або менше 1. $y^+ < 1$ на сьогоднішній день є неймовірно складною умовою тому, що результуюча розрахункова сітка буде мати дуже велику кількість гнізд (більш 20 мільйонів), що приведе до зростання часу самих розрахунків.

2. Для інженерних розрахунків слід прийняти 120 гнізд мінімальним значенням для довжини хвилі, а 20 гнізд для висоти хвилі.

Визначення початкових параметрів моделі турбулентності. Проведене дослідження впливу моделі турбулентності на збіжність і вірогідність рішення. Так, при RANS постановці задачі й високих числах Рейнольдса потрібно використання моделей турбулентностей. На сьогоднішній день $k-\omega$ SST модель турбулентності, запропонована Ментером, добре зарекомендувала себе у завданнях корабельної гідродинаміки. При цьому питання визначення початкових параметрів турбулентної кінетичної енергії k та її дисипації ω залишається відкритим. Однією зі сполучних ланок між ними є турбулентна інтенсивність.

Ступінь турбулентності або турбулентна інтенсивність – це захід інтенсивності турбулентних пульсацій. За допомогою її може бути визначене значення турбулентної кінетичної енергії за наближеною формулою. При постановці граничних умов для чисельного моделювання задач гідромеханіки часто необхідно оцінити інтенсивність

турбулентності на вхідних границях. Її визначення ґрунтується на попередніх дослідженнях проведення моделювання й експериментів.

Висновки. Проведено дослідження впливу чисельного кордону на генеруємі хвилі. При наявності зони розгону хвилі швидкість збіжності рішення значно збільшується. Розміри такої зони повинні бути не менш двох довжин хвиль, оскільки інакше результуюча зона може мати змінений профіль і, отже, відмінні від вихідних хвильові параметри. Таким чином, використання чисельного кордону є обов'язковою умовою. При його відсутності відбувається чисельне відбиття хвилі від вихідної границі. Формується система хвиль різної амплітуди й частоти, що не може задовольняти умові поставленого завдання про регулярне хвилювання.

Література

1. Ткаченко И.В. Моделирование взаимодействия тел и гидрофизических полей морской среды методом крупных вихрей: дис. на соискание уч. ст. д-ра. тех. наук. - СПб., СПбГМТУ, 2005. - 316 с.
2. Никущенко Д.В., Зубова А.А. Моделирование гидродинамического взаимодействия при проходе стоящего судна в условиях встречного течения и с учётом волнообразования // Морские интеллектуальные технологии. 2015. Т. 2. № 3. С. 68-74.
3. Зверков В.Н., Никущенко Д.В. Численное моделирование качки движущегося судна на встречном регулярном волнении. // Морские интеллектуальные технологии. 2014. № 26. С. 116-121.
4. Овчинников К.Д., Ткаченко И.В., Тряскин Н.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении // Морские интеллектуальные технологии. 2015. Т. 1. № 2 (28). С. 14-18.
5. Ткаченко И.В., Тряскин Н.В. Численное моделирование качки судна на регулярном волнении // Морские интеллектуальные технологии. 2013. № 3 (21). С. 24-28.
6. Bagaev D.V., Lobachev M.P., Ovchinnikov N.A., Taranov A.E. Prediction of the scale effect for the hull-propeller interaction factors // Computational Methods in Marine Engineering V - Proceedings of the 5th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2013 2013. С. 699-710.
7. Таранов А.Е. Моделирование заливаемости и брызгообразования в носовой оконечности турельного судна // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. № 78 (362). С. 75-78.
8. Ferziger, J.H., Peric, M., 2002. Computational Methods for Fluid Dynamics, (Third Edit.) Springer, Berlin, Germany.
9. Boger, David & W Noack, Ralph & Paterson, Eric. (2010). Dynamic Overset Grid Implementation in OpenFOAM. 5th OpenFOAM Workshop, At Chalmers, Gothenburg, Sweden, 2010.
10. Goong Chen, Qingang Xiong, Phillip J. Morris, Eric G. Paterson, Alexey Sergeev, Yi-Ching Wang (2015): OpenFOAM for computational fluid dynamics. Notices Amer. Math. Soc. 61, 354.
11. Nobuaki Sakamoto, Wilson R.V., Stern F., Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations for High-Speed Wigley Hull in Deep and Shallow Water // Journal of Ship Research, Vol.51, No 3, 2007, pp. 187-203.

12. Stern, F., Wilson, R.V., Coleman, H.W., Paterson, E.G., 2001. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations-Part I: methodology and procedures. *J. Fluids Eng.* 123 (4), 793–802.
13. Wilson, R., Paterson, E., Stern, F. 1998. Unsteady RANS CFD method for naval combatants in waves. In: *Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, U.S.*, pp. 532–549.
14. Simonsen C.D., Stern, F. 2010. CFD simulation of KCS sailing in regular head waves. In: *Proceedings from Gothenburg 2010 - A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Gothenburg.*
15. Simonsen, C.D., Otzen, J.F., Joncquez, S., Stern, F., 2013. EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves. *J. Mar. Sci. Technol.* 18 (4), 435–459.
16. Otzen, J.F., Simonsen, C.D. 2010. Uncertainty Assessment for KCS Resistance and Propulsion Tests in Waves. FORCE Technology Report no. ONRIII187 01, Lyngby.

Maslov I.Z.

RESEARCH OF THE MODEL AND CALCULATION METHODS OF VESSEL HYDRODYNAMICS ON WAVES

The work deals with a scientific and practical task, the solution of which is of significant practical interest. The existing methods of justifying the sway parameters require the involvement of the results of expensive model experiments, in particular, to take into account viscous damping. The capabilities of existing computer equipment, computer technologies and appropriate software allow, at the initial stages of designing marine technical objects, to fairly accurately predict the parameters of their wobble due to turbulence, taking into account the forces of viscous nature. This makes it possible to significantly reduce the cost of design work in terms of determining the hydrodynamic characteristics of marine objects. On the basis of the conducted research, the following results were obtained: an analysis of existing approaches to solving the problems of hydrodynamics and dynamics (rocking) of sea vessels and other technical structures on waves was carried out, a mathematical model of the complex problem of hydrodynamics and dynamics of a marine object for a viscous liquid was developed, a methodology for conducting a numerical experiment for calculating rocking motion on a regular wave was developed, software was developed for preparing output data and processing the results of a numerical experiment, practical recommendations were developed for numerically modeling the rocking of a marine object on regular waves and determining the dynamic parameters of the rocking motion, a numerical simulation of the dynamics of the movement of a sea vessel was carried out on excitement

Key words: *mathematical models, hydrodynamics, viscosity, waves, rocking, ship, marine objects.*