

МОДЕЛЮВАННЯ КОРАБЕЛЬНИХ ХВИЛЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РІВНЯНЬ МІЛКОЇ ВОДИ ТА РІВНЯНЬ БУСІНЕСКА

Abstract Two numerical models for calculating impacts of passing vessels on berthed vessels and shoreline based on the nonlinear shallow water equations and non-linear dispersive Boussinesq equation are presented. Comparisons with laboratory and field data, as well as some results of model applications on engineering projects are considered. The methods are described how two-dimensional wave propagation codes are coupled with the results of the commercial three-dimensional CFD model SHIPFLOW that was used in the vicinity of a vessel.

Key words: numerical modeling, vessel waves, shallow water equation, Boussinesq equations.

Анотація: Представлена дві числові моделі для обрахунку впливу пропливаючих суден на пришвартовані кораблі та на берегову зону, основана на нелінійних рівняннях мілкої вод та рівняннях типу Бусінеска. Дано порівняння результатів моделі із лабораторними і натурними вимірюваннями, а також результати застосування моделі в деяких інженерних проектах. Представлена методика використання двовимірними моделями розповсюдження хвиль результатів розрахунків трьохвимірної комерційної CFD моделі SHIPFLOW для зони навколо корабля.

Ключові слова: чисельне моделювання, корабельні хвилі, рівняння мілкої води, рівняння Бусінеска.

Аннотация: Представлены две численные модели для расчета воздействия проходящих судов на пришвартованные корабли и береговую зону, основанная на нелинейных уравнениях мелкой и уравнениях типа Буссинека. Дано сравнение результатов модели с лабораторными и натурными измерениями, а также результаты использования модели в некоторых инженерных проектах. Представлена методика использования двумерными моделями распространения волн результатов коммерческой трехмерной CFD модели SHIPFLOW для ближней вокруг корабля.

Ключевые слова: корабельные волны, пришвартованные корабли, прибрежные сооружения, Сен-Венан, Бусинеск.

1 Введення

Хвилі створені проходженням кораблів є значним чинником переформування берегової лінії в припортових зонах та судноплавних каналах, також вони можуть викликати сильні навантаження на пришвартовані кораблі і прибережні споруди. Моделювання таких хвиль є важливим для покращання навігаційної безпеки, мінімізації ризиків для пришвартованих кораблів від пропливаючих суден, зменшення можливих розмив берегів, а також послаблення гідродинамічних впливів на водні екосистеми.

Сучасні тривимірні моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD) дозволяють детально розраховувати гідродинамічні поля поблизу корабля. , найбільш відомим прикладом таких систем є код SHIPFLOW (Flowtech, 1999). Але такими моделями поки неможливо розрахувати і розповсюдження хвиль від корабля у прибережній зоні, акваторії порту. Практичний інструментарій для вирішення таких задач почав розроблятися наприкінці 90-х на основі чисельного розв'язання двовимірних рівнянь мілкої води – проінтернованих по глибині тривимірних рівнянь, в які вводився член тиску від корабля. Такі моделі для хвиль, що генеруються великими кораблями біля берегів, будувалися на основі лінеаризованих рівнянь мілкої води (Fenical et al. 2001, MacDonald, 2003) та нелінійних рівнянь мілкої води – HPMB (Stockstill та Berger, 1999; 2001). Для коротших хвиль, які генеруються малими та середніми судами замість HPMB почали використовуватись рівняння

нелінійно-дісперсійної моделі типу Бусінеск (Железняк, Пелиновский, 1985; Madsen и др., 1992) з включенням тиску від донної форми корабля (Nwogu, 2001; Kofoed-Hansen et al., 1999). Також почали розвиватися підходи з об'єднання двовимірних моделей розповсюдження хвиль з тривимірними CDF моделями гідродинаміки поблизу корабля (Kofoed-Hansen et al., 1999).

Успішність використання таких підходів залежить від використання ефективних чисельних алгоритмів розв'язання задач в цих постановках, яка повинна бути доведена порівнянням з даними вимірів. Важливим є і використання ефективних алгоритмів розрахунку змочування-осушення для обрахування нахату хвиль на беріг, а також для зв'язки із модулями переносу наносів і розмиву берега. Стаття представляє результати дослідження з розробки такого комплексу моделей. Моделюючий комплекс складається з основної програми ShipSim, що обраховує двовимірну гідродинаміку, і додаткового модуля VH-LL, що обраховує навантаження на пришвартовані кораблі та берегові споруди. ShipSim базується на методі скінченних об'ємів для нелінійних рівнянь мілкої води, та є розширенням моделі COASTOX (Кивва, Железняк, 2001), розробленої для моделювання гідродинаміки мілкої води з врахуванням розповсюдження хвиль і нахату на беріг та, викликаной цими процесами переформування дна (Демченко и др., 2006). Для коротших хвиль, які генеруються малими та середніми судами замість рівнянь мілкої води використовуються рівняння нелінійно-дісперсійної моделі типу Бусінеска (Madsen и др., 1992). В статті представлені результати порівняння моделі з натурними вимірюваннями в США (Fenical et al, 2002, 2006), а також з лабораторними даними (Remery, 1974). Також в статті представлений метод зв'язки ShipSim із 3-х вимірною CFD моделлю SHIPFLOW і модифікована ShipSim із використанням рівнянь типу Бусінеска.

2 Визначальні рівняння ShipSim

Потік води описується двовимірними рівняннями мілкої води з додатковим вільним членом, що описує рух корабля. Ці рівняння виведені із загальних тривимірних гідродинамічних рівнянь нерозривності і руху рідини які усереднюються по глибині з використанням кінематичних граничних умов. Для виведення усереднених по глибині рівнянь були зроблені наступні припущення для потоку мілкої води довгих хвиль: вертикальне прискорення часток рідини є малим порівняно із прискоренням гравітації; дотичні напруження викликані вертикальною компонентом швидкості є також малими; і члени, залежні від горизонтальної здвигаючої сили, є малими порівняно із членами, залежними від вертикальної здвигаючої сили. Схема задачі з визначеннями деяких змінних показана на Рис.1.

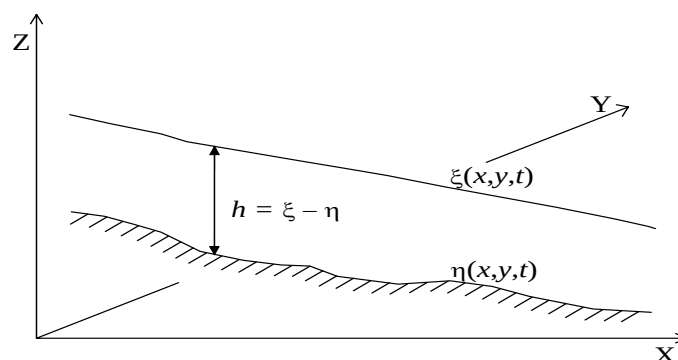


Рисунок 1. Схематичне зображення потоку води, декартові координати.

Визначальні рівняння моделі складаються із рівняння нерозривності і двох рівнянь моментів. Позначивши через q_x і q_y (м²/с) компоненти розходу води через одиничну ширину вздовж горизонтальних напрямків x та y , із збереження маси випливає, що

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

де

t – змінна часу (с);

x та y – декартові координати (м);

$\xi(x, y, t)$ – висота поверхні води (м);

$\eta(x, y, t)$ – висота поверхні дна (м);

h – глибина води (м), рівна $\xi - \eta$;

Результуючими рівняннями збереження моменту в напрямках x та y є:

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial(uq_x)}{\partial x} + \frac{\partial(vq_x)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial q_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial q_x}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho} \tau_x^\eta \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial(uq_y)}{\partial x} + \frac{\partial(vq_y)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial q_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial q_y}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho} \tau_y^\eta \quad (3)$$

де

u, v – x - та y - компоненти усередненої по глибині швидкості потоку (м/с);

ρ – густина води (кг/м³);

g – прискорення гравітації (м/с²);

D_x, D_y – коефіцієнти турбулентної в'язкості в x - та y -напрямах (м²/с);

τ_x^η, τ_y^η – дотичні напруження на дні в x - та y -напрямах (кг/(м·с²)).

Індекси x та y є індексами напрямку. P є тиск, спричинений впливом днища корабля, що рухається. Поле тиску рахується таким же чином, як і в моделі HIVEL2D (Stockstill та Berger, 1999; 2001).

$$P = \rho g d \quad (4)$$

де d є осадкою корабля в точці. Програмно це реалізовано як горб у вигляді перевернутого корпусу корабля, що рухається по маршруту корабля.

В цьому випадку дотичні напруження на дні можна апроксимувати рівнянням Маннінга як

$$\tau_x^\eta = \rho g \frac{n^2}{h^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2} = c_b u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

$$\tau_y^\eta = \rho g \frac{n^2}{h^{1/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} = c_b v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

$$c_b = \rho g \frac{n^2}{h^{1/3}} \quad (7)$$

де n – коефіцієнт шероховатості Маннінга ($\text{с/м}^{1/3}$).

Якщо хвилі не грають великої ролі в змішуванні, то коефіцієнт турбулентної в'язкості D залежить від глибини води, швидкості потоку і нерівності дна (Falconer, 1980), і може бути пораховане за формулою:

$$D_0 = \frac{\theta}{2} [1.156 h c_b \sqrt{u^2 + v^2}] \quad (8)$$

де θ – ваговий коефіцієнт.

2.1 Навантаження на пришвартований корабель

Додатковий модуль, що обраховує навантаження на пришвартовані кораблі та берегові споруди, використовує гідродинамічні дані, отримані після запуску моделі ShipSim. Модуль обраховує навантаження, використовуючи форму корпусу пришвартованого корабля, задану незалежним файлом. Ця форма розбивається на множину маленьких лінійних сегментів, кожен зі своїми розмірами і орієнтацією. Далі використовуються записи гідродинамічних даних в часі для підрахунку статичного тиску на кожен лінійний сегмент корпусу, з силами тиску, що діють перпендикулярно сегментам. Потім ці сили інтегруються для отримання сумарних сил F_x , F_y і сумарного моменту сил, що діють на пришвартований корабель.

3 Числовий метод

Рівняння моделі рішення являють схемою скінчених різниць з корекцією потоків (Boris & Book, 1973). Схема має 1-ий порядок точності по часу і 1-2-ий по простору. Схема використовує розбиття по напрямкам і нерівномірну прямокутну сітку. Числова схема була протестована на групі тестів, що використовувались для перевірки моделі M2D (Militello et al., 2004).

Простір області задачі розбивається на контрольні об'єми, що не перетинаються. Кожний контрольний об'єм огортає один вузол сітки, в якій визначені змінні визначальних рівнянь. Границі контрольних об'ємів знаходяться рівно посередині між суміжними вузлами сітки. Контрольні об'єми визначаються своїми граничними поверхнями (див. Рис. 2). Додатні і від'ємні напрямки вздовж осі X позначаються, відповідно, як *схід* та *захід*. Аналогічно, додатні і від'ємні напрямки вздовж осі Y позначаються, відповідно, як *північ* та *південь*. Ось Z вважається направленою в протилежну від гравітаційного вектора сторону, з додатніми і від'ємними напрямками позначеними, відповідно, як *верх* та *низ*.

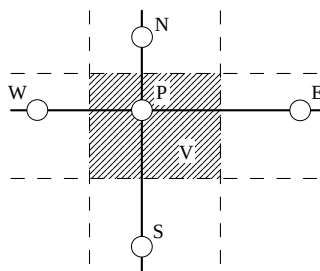


Рисунок 2. Геометричні дані для декартової X-Y координатної системи.

Розрахункова область може бути звужена до області навколо корабля, що рухається (опція змінних границь), що дуже сильно пришвидшує розрахунки. В цьому випадку робиться припущення, що всі змінні на границях такої області рівні змінним в найближчих вузлах сітки, що лежать всередині цієї област.

3.1 Рівняння моментів

Спочатку, за допомогою розбиття по напрямкам, рішення двох рівнянь моментів. Тут буде описаний тільки крок для x-напрямку, так як крок для y-напрямку повністю аналогічний. Після обрахунку на новому кроці по часу компонент розходу води обраховуються компоненти швидкості потоку, які використовуються потім для рішення рівняння нерозривності.

Дискретизована форма рівняння x-моменту для x-кроку записується як:

$$\frac{q_{x_{i,j}}^{k+1} - q_{x_{i,j}}^k}{\Delta t} \Delta x_{i,j} + (F_{x_{i+0.5,j}}^k - F_{x_{i-0.5,j}}^k) + gh_{i,j}^k ((h_{i+0.5,j}^k + \eta_{i+0.5,j}^k) - (h_{i-0.5,j}^k + \eta_{i-0.5,j}^k)) = \left(D_{x_{i+0.5,j}}^k \frac{q_{x_{i+1,j}}^k - q_{x_{i,j}}^k}{x_{i+1,j} - x_{i,j}} - D_{x_{i-0.5,j}}^k \frac{q_{x_{i,j}}^k - q_{x_{i-1,j}}^k}{x_{i,j} - x_{i-1,j}} \right) \quad (9)$$

Дискретизована форма рівняння y-моменту для x-кроку записується як:

$$\frac{q_{y_{i,j}}^{k+1} - q_{y_{i,j}}^k}{\Delta t} \Delta x_{i,j} + (G_{x_{i+0.5,j}}^k - G_{x_{i-0.5,j}}^k) = \left(D_{x_{i+0.5,j}}^k \frac{q_{y_{i+1,j}}^k - q_{y_{i,j}}^k}{x_{i+1,j} - x_{i,j}} - D_{x_{i-0.5,j}}^k \frac{q_{y_{i,j}}^k - q_{y_{i-1,j}}^k}{x_{i,j} - x_{i-1,j}} \right) \quad (10)$$

де

k – номер кроку по часу;

i, j – індекси вузла;

Δt – крок по часу;

$\Delta x_{i,j}$ – довжина клітини в x-напрямку.

Потоки обраховуються алгоритмом корекції потоків на основі простої схеми направлених потоків 1-го порядку та центральної схеми 2-го порядку (Boris & Book, 1973).

$$F_{x_{i+0.5,j}}^k = F_{low x_{i+0.5,j}}^k + C_{x_{i+0.5,j}}^k \left(F_{high x_{i+0.5,j}}^k - F_{low x_{i+0.5,j}}^k \right)$$

$$F_{low x_{i+0.5,j}}^k = \begin{cases} u_{i+0.5,j} q_{x_{i,j}} & \text{if } u_{i+0.5,j} > 0 \\ u_{i+0.5,j} q_{x_{i+1,j}} & \text{if } u_{i+0.5,j} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$u_{i+0.5,j} = 0.5(u_{i,j} + u_{i+1,j})$$

$$F_{high x_{i+0.5,j}}^k = 0.5(u_{i,j} q_{x_{i,j}} + u_{i+1,j} q_{x_{i+1,j}})$$

Після застосування потоків низького порядку, різниця між потоками високого і низького порядків коректується на основі проміжних результатів $\tilde{q}_x, \tilde{q}_y$.

$$C_{x_{i+0.5,j}}^k = \frac{ss \cdot \max \left[0, \min \left(\left| AF_{x_{i+0.5,j}}^k \right|, ss \cdot \left(\tilde{q}_{x_{i+2,j}} - \tilde{q}_{x_{i+1,j}} \right) \Delta x_{i+1,j} / \Delta t, ss \cdot \left(\tilde{q}_{x_{i,j}} - \tilde{q}_{x_{i-1,j}} \right) \Delta x_{i,j} / \Delta t \right) \right]}{AF_{x_{i+0.5,j}}^k}$$

$$AF_{x_{i+0.5,j}}^k = F_{high_{x_{i+0.5,j}}}^k - F_{low_{x_{i+0.5,j}}}^k$$

$$ss = \text{sgn} \left(AF_{x_{i+0.5,j}}^k \right)$$

$G_{x_{i+0.5,j}}^k$ потоки обраховуються аналогічно, тобто замість q_x підставляється q_y . Після обрахування адвективних членів, обраховуються потенціальний і дифузивний члени, де

$$D_{x_{i+0.5,j}}^k = 0.5 \left(D_{x_{i,j}}^k + D_{x_{i+1,j}}^k \right)$$

$$h_{i+0.5,j}^k = 0.5 \left(h_{i,j}^k + h_{i+1,j}^k \right)$$

$$\eta_{i+0.5,j}^k = 0.5 \left(\eta_{i,j}^k + \eta_{i+1,j}^k \right)$$

Далі обраховуються вільні члени. Для сил тертя на дні використовується напів-явна схема:

$$\frac{q_{x_{i,j}}^{k+1} - q_{x_{i,j}}^k}{\Delta t} = -g(C_b)_{i,j}^k \frac{q_{x_{i,j}}^{k+1}}{(h_{i,j}^k)^2} \sqrt{(q_{x_{i,j}}^k)^2 + (q_{y_{i,j}}^k)^2}$$

$$\frac{q_{y_{i,j}}^{k+1} - q_{y_{i,j}}^k}{\Delta t} = -g(C_b)_{i,j}^k \frac{q_{y_{i,j}}^{k+1}}{(h_{i,j}^k)^2} \sqrt{(q_{x_{i,j}}^k)^2 + (q_{y_{i,j}}^k)^2}$$

3.2 Рівняння нерозривності

Як і для рівнянь моментів використовується алгоритм розбиття по напрямкам з корекцією потоків. X-крок записується так:

$$\frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k}{\Delta t} \Delta x_{i,j} + \left(H_{x_{i+0.5,j}}^k - H_{x_{i-0.5,j}}^k \right) = 0$$

Де потоки $H_{x_{i+0.5,j}}^k$ обраховуються аналогічно потокам для адвективних членів рівнянь моментів.

3.3 Число Куранта

Напротязі всього розрахунку крок по часу змінюється щоб задовольняти умову Куранта. Так як визначальні рівняння є нелінійними число Куранта повинно включати в себе всі можливі швидкості розповсюдження збурень води. Найбільшими такими швидкостями є швидкості припливних хвиль, що рівні $u = \sqrt{gh}$. Для стабільності схеми, що використовується моделлю, число Куранта зазвичай встановлюється меншим або рівним ніж 0.5.

3.4 Фільтрація

Корабель, що рухається, створює високо-частотні хвилі, які є нецікавими при вивченні довгих хвиль. Сам алгоритм також привносить такого роду нефізичні збурення. Тому до рівня води на протязі всього обрахунку застосовується фільтр. На Рис. 3 показаний ваговий шаблон цього фільтру.

1	2	1
2	5	2
1	2	1

Рисунок 3. Шаблон коефіцієнтів фільтра.

Фільтр згладжує рівень води таким чином, що короткі хвилі відфільтровуються, тоді як досить довгі хвилі ($L > 10\Delta x$) залишаються майже незмінними (коефіцієнт зменшення > 0.9). На Рис. 4 зображений коефіцієнт зменшення фільтра за один крок фільтрації. Ясно видно, що фільтр діє майже однаково для різних напрямків хвиль, і що для довгих хвиль, створених кораблем, коефіцієнт зменшення є близьким до одиниці.

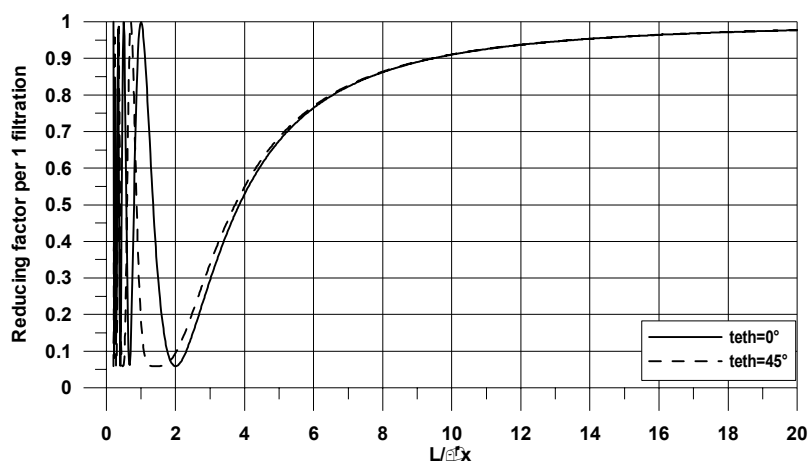


Рисунок 4. Коефіцієнт зменшення фільтра для хвиль, що розповсюджуються вздовж осі (суцільна лінія) і під кутом 45° до осі (переривчаста лінія), $\Delta x = \Delta y$.

На Рис. 5 та 6 зображені приклади результатів з фільтром та без нього для простого тесту з рівним дном на глибині 15 м та танкером з осадкою 13м, що рухається з постійною швидкістю 10м/с.

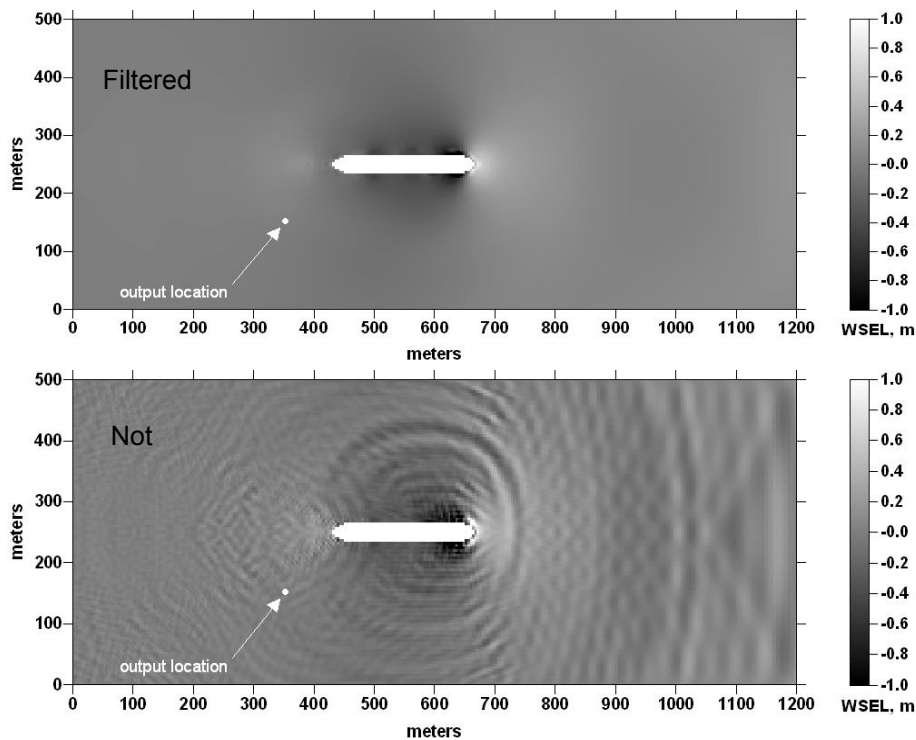


Рисунок 5. Поля рівня води.

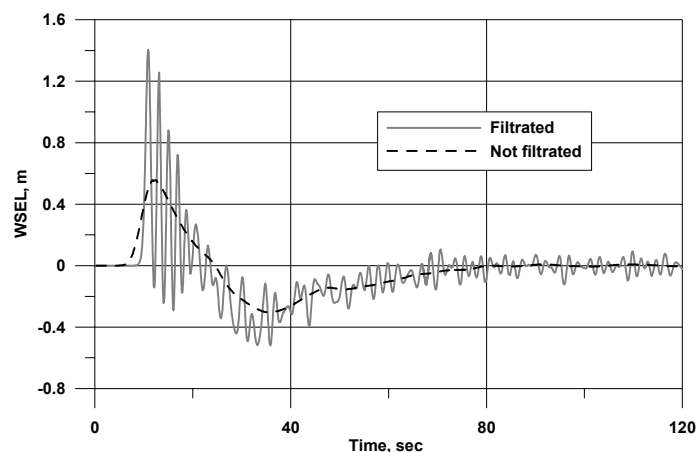


Рисунок 6. Рівень води в точці.

3.5 Маршрут корабля

Маршрут корабля представляється як набір невеликих лінійних сегментів. Швидкість корабля може змінюватись на протязі руху. Так як більшість кораблів, що нас цікавлять (танкери, сухогрузи), мають досить круті борта, то досить великий крок по часу, що допускається моделлю, може викликати нефізичні різкі зміни тиску в деяких вузлах під час різких поворотів. Щоб уникнути цього, можуть бути застосовані автоматичні обмеження на кут повороту і просування корабля вздовж маршруту на протязі одного кроку по часу. Останній тоді обмежується так, щоб уникнути перевищення максимальних встановлених для них величин.

3.6 Задання форми корпусу корабля

Корпус корабля задається на незалежній від розрахункової сітці, яка майже не впливає на швидкість розрахунку. Це дозволяє нам задавати корпуса з дуже високою деталізацією, що

покращує якість розрахунків. Сітки для корпусів є 2-вимірними, тому такі 3D особливості як бульба на носі корабля не можуть бути враховані моделлю. Форми корпусів, що були успішно протестовані, включають в себе танкери, сухогрузи, баржи та буксири.

4 Підсумок можливостей моделі

Розроблена модель дає такі важливі можливості при проведенні розрахунків:

- Детальне задання донного рельєфу (вхідні прямокутні сітки)
- Змінна шерохватість дна
- Розрахунки рівня води і швидкості потоку викликані припливами, вітрами і хвилями
- Задання форми корпусу корабля (незалежна прямокутна сітка)
- Довільний маршрут корабля і змінна швидкість, прискорення
- Змочування та осушення при накаті хвиль на береги

Границі розрахункової області, що можуть рухатись – дозволяє ефективний розрахунок ефектів поблизу корабля на як завгодно великих областях

Можливість обрахування переносу наносів, ерозії та відкладення св'язних та несв'язних наносів довільного розміру по всій області

Різні формати виводу результатів, що робить модель сумісною з декількома графічними оболочками.

Модель ShipSim і модуль, що обраховує навантаження на пришвартовані кораблі, були перевірені на результатах лабораторних тестів та декількох натурних вимірювань, також використовуються в реальних проектах в США.

5 Перевірка моделі на лабораторних даних

Оцінка нагрузок на пришвартовані кораблі і берегові споруди вимагає перевірки роботи зв'язки моделі ShipSim з модулем VH-LL для більшої впевненості при використанні системи в реальних інженерних проектах. В якості лабораторних даних були використані дані Remery (1974). Ці дані вважаються стандартом у даній сфері і отримані у басейні масштабі 60:1 з максимальним розміром моделей кораблів у 5 метрів по довжині і максимальними змодельованими загрузками у 40 Н.

Порівняння проводилося для 11-х випадків, щоб покрити всі дані, опубліковані Remery. В них використовувались 3 різних корабля, що проходять, і один єдиний пришвартований корабель. Кораблі проходили на різних дистанціях але завжди із однією швидкістю. Різні швидкості проходження були протестовані також, і був зроблений висновок про залежність між ними і нагрузками. Область моделювання для ShipSim становила 3.6×1.8 км з розміром клітини 2×2 метри (1800×1200 вузлів). Час розрахунку для кожного 1000-секундного запуску складав приблизно 6 годин на типовому ПК.

На Рис.7 зображені флуктуації рівня води навколо кораблів для тесту Remery #1, а також точки, в яких знімалися гідродинамічні дані моделі ShipSim, що використовувались потім модулем VH-LL. На Рис.8 зображені повздовжні, поперечні нарузки і момент нагрузок з плином часу на 160-тонний пришвартований корабель під час проходження 100-тонного танкера зі швидкістю 7 вузлів на відстані 30 метрів від нього.

Результати системи ShipSim/VH-LL дуже схожі з результатами Remery, включаючи величину сил та моментів і синхронізацію в часі. Треба зауважити, що результати Remery є усередненими результатами по декільком запусках. Дуже гарне порівняння вказує на те, що підхід, використаний для розрахунку гідродинаміки, припущення і вхідні дані є точними і відповідними модельованому гідродинамічному процесу. Воно також вказує на те, що метод розрахунку навантажень, що використовується у модулі VH-LL, є достатньо точним для такого роду задач.

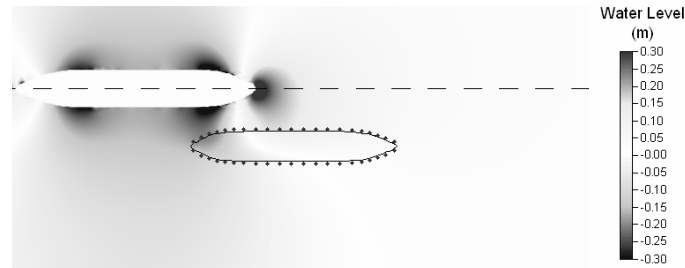


Рисунок 7. Флуктуації рівня води навколо пришвартованого танкера і танкера, що проходить, в тесті Remery #1, а також точки, в яких знімаються дані гідродинаміки.

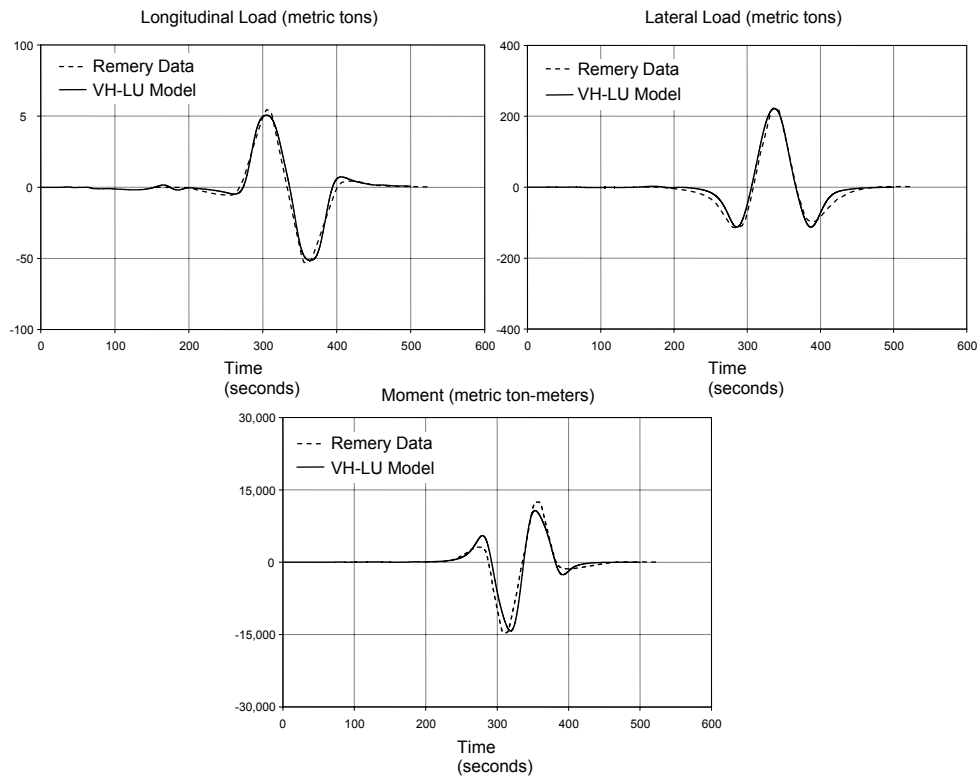


Рисунок 8. Порівняння вимірних і змодельованих повздовжніх (зліва) і поперечних (справа) нагрузок і моменту нарузок (знизу) на пришвартований корабель в тесті Remery #1.

На Рис.9 зображене порівняння між максимальними вимірними і змодельованими поперечними і повздовжніми нарузками і моментами для всіх 11-х випадків. Порівняння показує чудове співпадіння, особливо для випадків високих нарузок. Результати вказують також на деяку тенденцію по переоцінці, найбільш ймовірно через різницю у формах кораблів і їхніх положеннях в резервуарі для лабораторної і числової моделей. Також ймовірно що різниця між вимірними і змодельованими моментами сил викликана неточностями під час визначення центра мас пришвартованих кораблів.

Результати Remery для різних швидкостей проходження вказували також на те, що максимальні навантаження були пропорційними їх квадрату. Тому були підраховані максимальні поперечні навантаження під час моделювання випадків проходження 30-тонного корабля на відстані 30 метрів від пришвартованого зі швидкостями 5, 7, 9, 11 і 13 вузлів. Для них методом найменших квадратів була знайдена найближча квадратична крива з результируючим r^2 рівним 0.997. Це означає, що система ShipSim/VH-LL строго притримується закону співвідношення швидкості і навантаження, що був зауважений Remery.

Порівняння вказують також на те, що для дуже великих відстаней між кораблями, система ShipSim/VH-LL переоцінює максимальні навантаження. Найбільш ймовірно це викликано різницею у параметрах тестів між лабораторною і числовою моделлю, особливо у даних щодо розміщення кораблів всередині області, які є недоступними. До того ж застосована тут методологія із використанням зв'язки ShipSim/VH-LL може переоцінювати навантаження в цих випадках з низькою навантаженою (через велику розділяючу відстань), так як можуть стати важливими 3-вимірні ефекти і неточності в положенні кораблів. Загалом ми робимо висновок, що створена моделююча система показує дуже точне співпадіння між виміряними і змодельованими навантаженнями на пришвартовані кораблі для тих тестів Remery, що є важливими для інженерії портів (випадки високих навантажень).

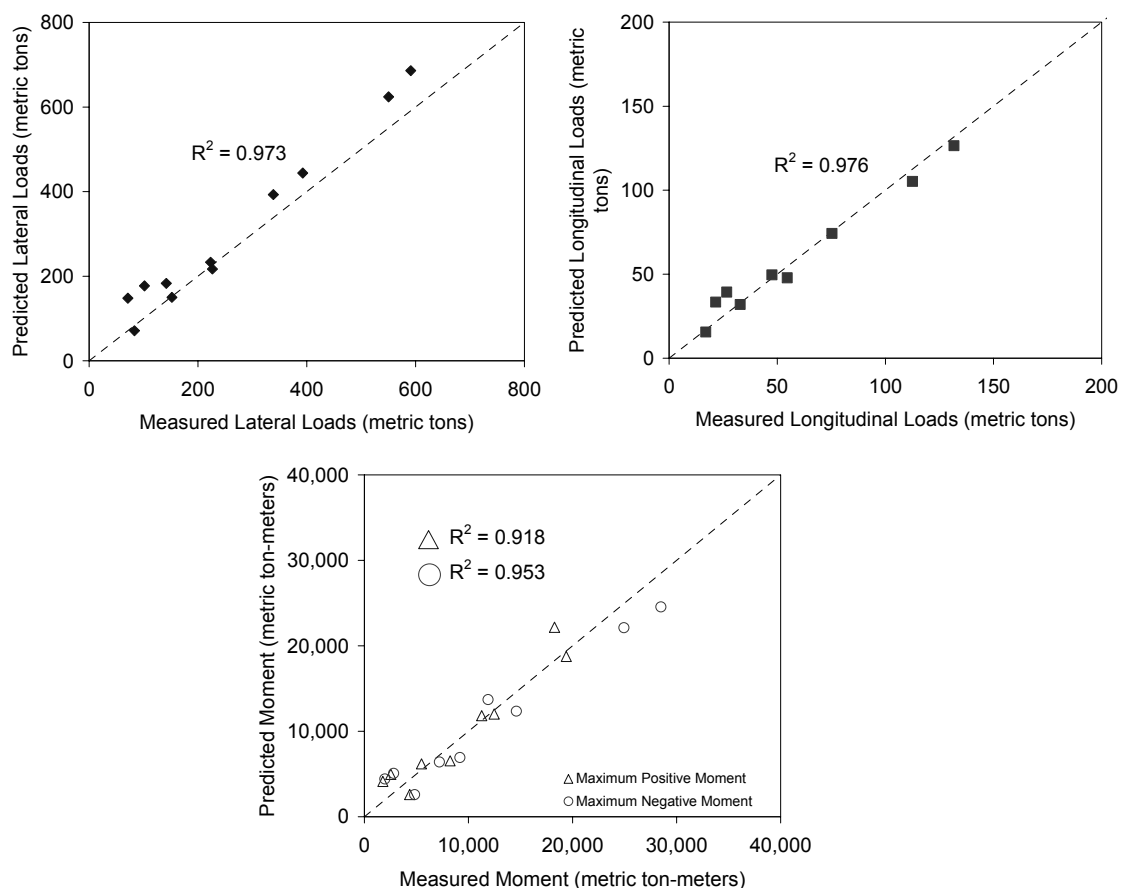


Рисунок 9. Перевірка системи ShipSim/VH-LL на максимальні навантаження (зверху) і момент навантажень (знизу) для всіх випадків.

6 Перевірка моделі на натурних даних

Модель ShipSim була протестована з використанням натурних вимірювань, отриманих з проектів в порту Окленда, США і в дельті річки Міссісіпі, США. У травні 1999 року у внутрішньому судоходному каналі порту Окленда були зібрані дані по ненаправленому тиску води (Shepsis *et al*/ 2001). Ці дані разом із цифровими даними по положенню кораблів були використані для перевірки моделі ShipSim під час проходження 10-ти контейнеровозів. На Рис.10 зображені область моделі та рівні води з плином часу, виміряні і змодельовані для 4-х різних кораблів, що проходять повз вимірювальний пристрій із різними швидкостями і на різних відстанях. Загалом модель досить точно відтворює виміряні флуктуації рівня води в каналі. Деякі відмінності присутні через неточність даних радара по положенню кораблів, через неточність швидкостей, що були знайдені з даних по положенню, через відсутність точних даних по загрузженості кораблів, та через брак точних даних по корпусам кораблів (використовувалась форма корпусу стандартного контейнеровозу).

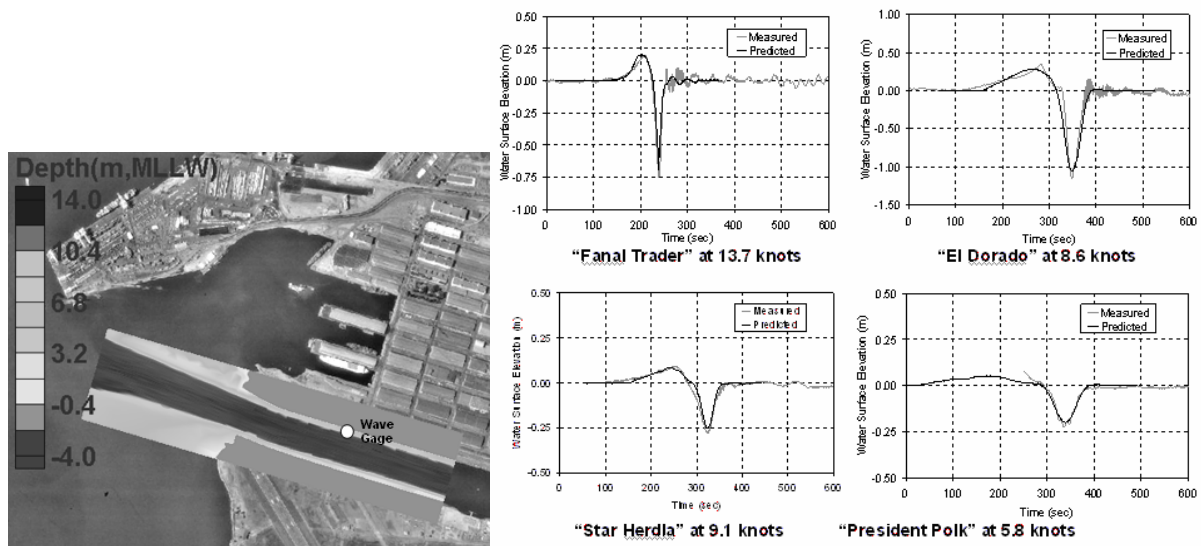


Рисунок 10. Область моделі ShipSim і порівняння з рівнями води, зібраними в порту Окленда у травні 1999, чорні лінії – модель, сірі – натурні дані.

Інженерний корпус Нового Орлеану зібрав дані по рівню води в двох точках і швидкість потоку води в одній точці в дельті річки Міссісіпі в червні 2002-го року. Ці дані були використані для того, щоб перевірити модель ShipSim під час проходження річки на швидкості 9.9 вузлів кораблем "TMM Tabasco" 6-го червня 2002-го року. Це були єдині дані для яких була відома швидкість корабля. На Рис.11 зображені область моделювання та приклади результатів розрахунку.

На Рис.12 зображене порівняння результатів моделі ShipSim (сіре) і виміряних даних(чорне) для корабля "TMM Tabasco". Знову ж таки модель точно відтворює флуктуації рівня і швидкості води, створені проходженням корабля. Невеликі відмінності, що присутні, також пояснюються відсутністю даних по положенню корабля (вважається в центрі каналу) і відсутністю справжньої форми корпусу (використовувалась форма стандартного грузовозу).

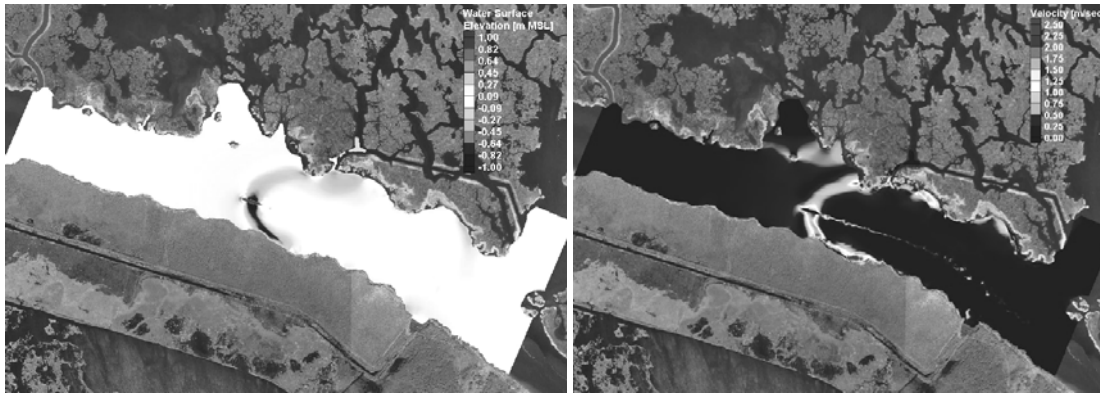


Рисунок 11. Область моделювання і приклад розрахунку рівня води (зліва) та швидкості води (справа) під час проходження дельти річки Міссісіпі кораблем “TMM Tabasco” на швидкості 9.9 вузлів 6-го червня 2002-го року.

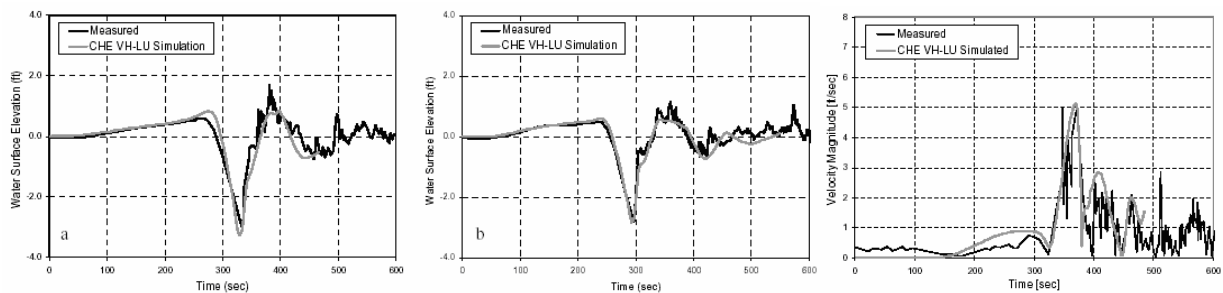


Рисунок 12. Порівняння вимірних та змодельованих рівнів води (зліва та центр) і швидкості води (справа) під час проходження дельти річки Міссісіпі кораблем “TMM Tabasco” на швидкості 9.9 вузлів 6-го червня 2002-го року.

7 ShipSim + CFD + Boussinesq

При моделюванні високошвидкісних кораблів невеликих розмірів, що мають довгий хвильовий слід з нечітко вираженим основним спадом води і багатьма високочастотними компонентами, вже недостатньо точним є метод впровадження поля тиску корабля у вигляді вільного члену у правій частині визначальних рівнянь. До того ж невеликі розміри такого корабля вимагають згущення сітки в районі його маршруту, що далеко не завжди може бути виконано. Одним із методів подолання таких проблем є окремий розрахунок деталізованої гідродинаміки навколо корабля з подальшим використанням її в більш масштабному моделюванні.

Тому нами була створена модель ShipSimCFD, яка має таку можливість. У зв'язці з нею ми використовуємо 3-х вимірну CFD модель SHIPFLOW, за допомогою якої спочатку розраховуємо багато сценаріїв з плоским дном з різними глибинами і швидкостями корабля. Далі отримані горизонтальні швидкості потоку усереднюються по глибині із використанням лінійної хвильової моделі і, разом із даними по рівню води, зберігаються в окремих файлах. Тепер при запуску модель ShipSimCFD дивиться яка глибина і швидкість корабля в даний розрахунковий момент часу і вибирає відповідні гідродинамічні дані. 2D поля при цьому інтерполуються з 2D полів тих сценаріїв, які мають у розпорядженні. Ці дані напряму вводяться в область розрахунку, а права частина у визначальних рівняннях при цьому не використовується.

Цей метод має декілька переваг над методом вільного члену у визначальних рівняннях: 1) по перше, 3D моделі CFD дають дуже точні результати і є на сьогоднішній день найточнішими моделями для опису гідродинаміки кораблів 2) по друге, ми можемо вводити в модель ShipSim+CFD+BTE поле гідродинаміки, що є набагато більшим за розміри самого корабля – таким чином ми можемо мати досить грубу сітку і не ущільнювати її навколо нього 3) 3D сценарії, одного разу пораховані для якогось корабля можуть використовуватись для інших задач з тим самим кораблем.

До недоліків такого підходу слід віднести велику ресурсоемність 3-вимірних CFD моделей – розрахунок одного сценарію моделлю SHIPFLOW може займати декілька днів на типовому ПК. І таких сценаріїв може бути потрібно досить багато, щоб досить густо покрити діапазон глибин і швидкостей, з якими проходить корабель в конкретній задачі. Саме тому на даний момент часу не вигідно використовувати тільки 3D CFD моделі (без зв'язки із 2D моделями) для опису гідродинаміки по всій області, а не тільки навколо корабля.

Також хвилі від високошвидкісних кораблів мають велику дисперсивність, тому HPMB, у як вона відсутня, не здатні точно їх відтворювати. По цій причині модель ShipSimCFD була переписана нами під використання рівнянь типу Бусінеска. Використовувались рівняння Мадсена і Соренсена (Madsen & Sorensen, 1992), модифіковані для різких змін дна.

$$\begin{aligned}
 h_t + p_x + q_y &= 0 \\
 p_t + (up)_x + (vp)_y + gh\xi_x &= bgH^2 \cdot \left[(H\xi_x)_x + (H\xi_y)_y \right]_x + \\
 + H^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{2} + b \right) \cdot (p_x + q_y)_x - \frac{1}{6} H \cdot \left(\left(\frac{p}{H} \right)_x + \left(\frac{q}{H} \right)_y \right)_x \right] & \quad (16) \\
 q_t + (uq)_x + (vq)_y + gh\xi_y &= bgH^2 \cdot \left[(H\xi_x)_x + (H\xi_y)_y \right]_y + \\
 + H^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{2} + b \right) \cdot (p_x + q_y)_y - \frac{1}{6} H \cdot \left(\left(\frac{p}{H} \right)_x + \left(\frac{q}{H} \right)_y \right)_y \right] &
 \end{aligned}$$

де

p і q – компоненти розходу води через одиничну ширину вздовж горизонтальних напрямків x та y (m^2/c);

H – глибина спокійної води (м);

b – коефіцієнт, що впливає на дисперсивність ($=1/15, 1/17.5$);

нижні індекси t, x, y – відповідні похідні;

всі інші позначення аналогічні параграфу (3).

Рівняння (16) переписуються у вигляді

$$h_t = E \quad (17a)$$

$$BX_t = F + (F_1)_t \quad (17b)$$

$$BY_t = G + (G_1)_t \quad (17в)$$

де

$$E = -p_x - q_y \quad (18a)$$

$$BX = p - H^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{2} + b \right) \cdot p_{xx} - \frac{1}{6} H \cdot \left(\frac{p}{H} \right)_{xx} \right] \quad (18б)$$

$$BY = q - H^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{2} + b \right) \cdot q_{yy} - \frac{1}{6} H \cdot \left(\frac{q}{H} \right)_{yy} \right] \quad (18в)$$

$$F = -(up)_x - (vp)_y - gh\xi_x + bgH^2 \cdot \left[(H\xi_x)_x + (H\xi_y)_y \right], \quad F_1 = H^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{2} + b \right) \cdot q_{yx} - \frac{1}{6} H \cdot \left(\frac{q}{H} \right)_{yx} \right] \quad (18г)$$

$$G = -(uq)_x - (vq)_y - gh\xi_y + bgH^2 \cdot \left[(H\xi_x)_x + (H\xi_y)_y \right], \quad G_1 = H^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{2} + b \right) \cdot p_{xy} - \frac{1}{6} H \cdot \left(\frac{p}{H} \right)_{xy} \right] \quad (18д)$$

В якості числової схеми використовувалась неявна схема Adam-Bashfort-Moulton (Wei et al. 1995) типу предиктор-коректор, що має 3-4 порядок точності в часі. Для рівнянь вигляду (17) вона записується наступним чином:

Предиктор 3-го порядку в часі

$$\begin{aligned} h_{i,j}^{n+1} &= h_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{12} [23E_{i,j}^n - 16E_{i,j}^{n-1} + 5E_{i,j}^{n-2}] \\ BX_{i,j}^{n+1} &= BX_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{12} [23F_{i,j}^n - 16F_{i,j}^{n-1} + 5F_{i,j}^{n-2}] + 2(F_1)_{i,j}^n - 3(F_1)_{i,j}^{n-1} + (F_1)_{i,j}^{n-2} \\ BY_{i,j}^{n+1} &= BY_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{12} [23G_{i,j}^n - 16G_{i,j}^{n-1} + 5G_{i,j}^{n-2}] + 2(G_1)_{i,j}^n - 3(G_1)_{i,j}^{n-1} + (G_1)_{i,j}^{n-2} \end{aligned} \quad (19)$$

Коректор 4-го порядку в часі

$$\begin{aligned} h_{i,j}^{n+1} &= h_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{24} [9E_{i,j}^{n+1} + 19E_{i,j}^n - 5E_{i,j}^{n-1} + E_{i,j}^{n-2}] \\ BX_{i,j}^{n+1} &= BX_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{24} [9F_{i,j}^{n+1} + 19F_{i,j}^n - 5F_{i,j}^{n-1} + F_{i,j}^{n-2}] + (F_1)_{i,j}^{n+1} - (F_1)_{i,j}^n \\ BY_{i,j}^{n+1} &= BY_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{24} [9G_{i,j}^{n+1} + 19G_{i,j}^n - 5G_{i,j}^{n-1} + G_{i,j}^{n-2}] + (G_1)_{i,j}^{n+1} - (G_1)_{i,j}^n \end{aligned} \quad (20)$$

Отже процедура рішення алгоритму складається із таких кроків: 1) спочатку, за допомогою явних рівнянь (19), розраховуємо проміжні значення $h^{n+1}, BX^{n+1}, BY^{n+1}$ 2) із них через рівняння (18б), (18в) визначаємо проміжні значення p^{n+1}, q^{n+1} – для цього треба вирішити 2 системи лінійних рівнянь із тридіагональними матрицями 3) тепер, за допомогою явних рівнянь (20), рахуємо остаточні значення $h^{n+1}, BX^{n+1}, BY^{n+1}$ 4) із них знову через рівняння (18б), (18в) визначаємо значення p^{n+1}, q^{n+1} і перевіряємо отримані результати на збіжність по максимальній відносній похибці. Якщо похибка більша за потрібне число, то повторюємо кроки 3), 4) доки вона не стане меншою.

Дана числова модель була перевірена на тесті Беркгофа – трансформація хвиль над мілиною (Berkhoff et al., 1982). Порівняння результатів розрахунків (сіре) з даними вимірювань (кружки) та результатами лінійної моделі Беркгофа (пунктир) на Рис.13. демонструють ефективність розробленої числової моделі.

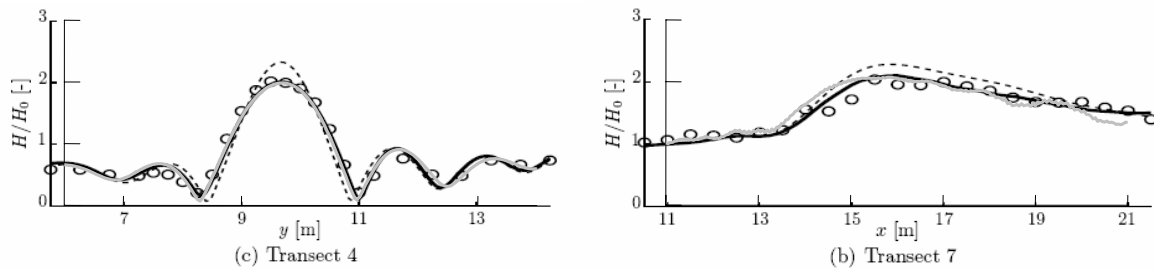


Рисунок 13 Виміряні (кружки) та пораховані (сіре) перетини висот хвиль 4 та 7 в тесті Беркгофа із мілиною на похилому дні.

. Результати моделювання хвиль від катамарана із використанням рівнянь типу Бусінеска та зв'язки із SHIPFLOW показані на Рис.14. А на Рис.15 зображений приклад результату розрахунків моделлю ShipSimCFD у проєкті в районі Redwood city, CA, USA.

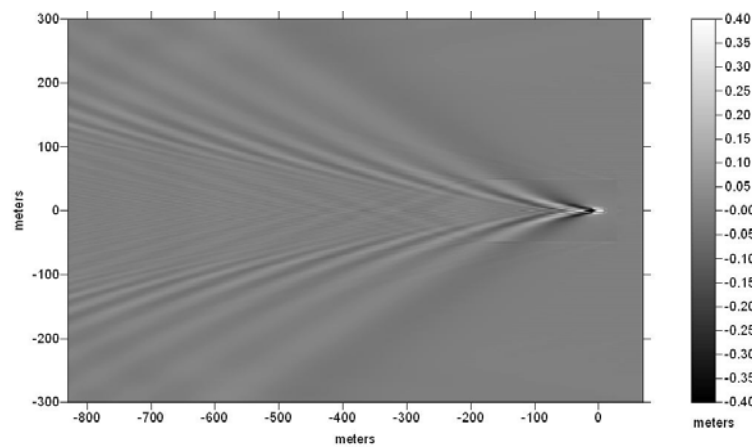


Рисунок 14 Результати моделювання ShipSimCFD для катамарана HBEII, що проходить над рівним дном на глибині 12м зі швидкістю 35 вузлів, рівень води.

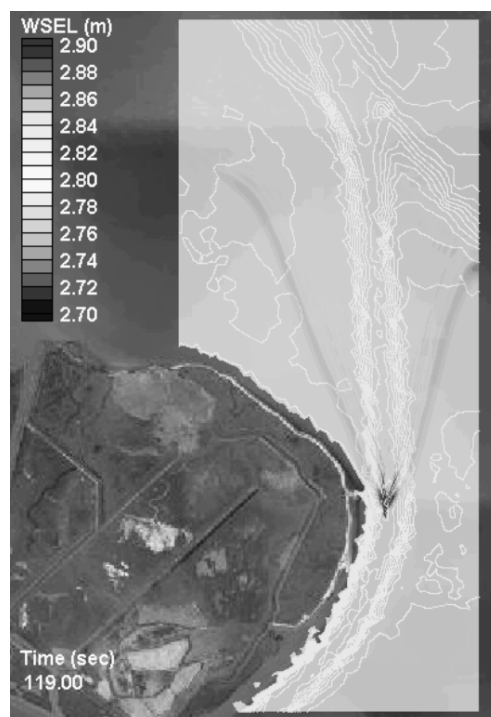


Рисунок 15 Приклад результату розрахунків моделлю ShipSimCFD, Redwood city, CA, USA.

8 Висновки

Була розроблена моделююча система ShipSim/VH-LL для оцінок впливу проходження кораблів з низькою осадкою на берегову лінію, водні екосистеми, пришвартовані кораблі та берегові споруди. Числова модель демонструє точне відтворення гідродинамічних процесів для кораблів з низькою осадкою, і розраховує їх з високою швидкістю, що робить її зручною для інженерного застосування в широкому спектрі навігаційних проектів.

Був розроблений вдосконалений варіант моделі під назвою ShipSimCFD із використанням рівнянь Бусінеска та зв'язки із 3-вимірною CFD моделлю SHIPFLOW для моделювання високошвидкісних кораблів. Використана в ній числова модель точно відтворює дисперсійну поведінку хвильових процесів. Подальша розробка системи буде включати в себе вдосконалення моделі ShipSimCFD, моделювання розмивів дна від проходження кораблів а також додаткове порівняння з натурними і лабораторними вимірюваннями.

Дослідження підтримано грантом CRDF UKG2-5 82-KV-05.

Список посилань

1. Кивва С.Л., Железняк М.И. Численное моделирование двумерного открытого потока с подвижными границами: расчеты стока на водосборе и наката волн цунами на берег. //Вычислительные технологии, 2001, т.6, ч.2, с.343-350.
2. Демченко Р.И., Железняк М.И., Кивва С.Л., Коломиец П.В. Численная модель волн, течений и переформирования берегов прибрежной зоны моря – В сб. трудов конф. «Моделирование -2006» Институт проблем моделирования в энергетике НАН Украины, Киев, 2006, с.197-203.
3. Железняк М.И., Пелиновский Е. Н. Физико - математические модели наката цунами на берег. – В кн. "Накат цунами на берег". Горький, Институт прикладной физики АН СССР, 1985, стр.8-33
4. Berkhoff J. C. W., Booij N., Radder A. C. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves. Coastal Engineering. – 1982. – №20. – P. 255-279.
5. Boris J.P., Book D.L. Flux corrected transport, 1 SHASTA, a fluid transport algorithm that works. J. Comp. Phys. – 1973. – №11. – P. 38-69.
6. Falconer R.A. Modelling of planform influence on circulation in harbors. Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, ASCE Press, New York, 1980. – P. 2,726-2,744.
7. Fenical S., Kolomiets P., Kivva S., Zheleznyak M. Numerical Modeling of Passing Vessel Impacts on Berthed Vessels and Shoreline. Proc. Of International Conference on Coastal Engineering. – 2006. – ? . – P ?-?.
8. Fenical S., MacDonald N., Yang F. Vessel Hydrodynamic Investigations. – Proc. "Prevention First 2002" Onshore & Offshore Pollution Prevention Symposium Technology Exhibition, California State Lands Commission, 2002, pp. 1-11.
9. Flowtech International AB. SHIPFLOW Manual. Geteborg, 1999.
10. Kofoed-Hansen H., Jensen T., Kirkegaard J., Fuchs J. Prediction of wake wash from high-speed craft in coastal areas. Proc. Conf. Hydrodynamics of High Speed Craft. – 1999. – P. 24-25.
11. MacDonald N. Numerical Modeling of Coupled Drawdown and Wake. Canadian Coastal Conference. – 2003.
12. Madsen P.A., Sorensen O.R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry. Coastal Engineering. – 1992. – №18. – P. 183-204.
13. Militello A., Reed C., Zundel A., Kraus N. Two-Dimensional Depth-Averaged Circulation Model M2D: Version 2.0, Report 1, Technical Documentation and User's Guide. ERDC/CHL TR-04-02. – 2005.

14. Nwogu O. Bouss2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors, ERDC/CHL TR-01-25. –2001.
15. Remery G.F.M. Moving Forces Induced by Passing Ships. Offshore Technology Conference, Paper Number OTC 2066. – 1974.
16. Shepsis V., Fenical S., Hawkins-Bowman B., Dohm E., Yang F. Deep-Draft Vessels in Narrow Waterway – Port of Oakland 50-foot Deepening Project. Ports. – 2001.
17. Stockstill R.L., Berger R.C. A two-dimensional flow model for vessel-generated currents. Prepared for U.S. Army Engineer District, Rock Island, U.S. Army Engineer District, St. Louis, U.S. Army Engineer District, St. Paul, ENV report 10. – 1999. – 167 p.
18. Stockstill R.L., Berger R.C. Simulating barge drawdown and currents in channel and backwater areas. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg. – 2001. – **127**, №5. – P. 290-298.
19. Wei G., Kirby J.T., Grilli S.T., Subramanya R. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves. Journal of Fluid Mechanics. – 1995. – **294**. – P. 71-92.