

УДК 532

ГІДРОДИНАМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ СУДЕН З БЕРЕГОВИМИ СПОРУДАМИ НА МІЛКІЙ ВОДІ

С. В. МАСЮК

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Отримано 09.12.2007

В роботі на основі чисельного методу граничних елементів виконані розрахунки сил та моментів гідродинамічної взаємодії судна з береговими спорудами, які моделюються прямокутними виступами різної довжини, на мілкій воді. Берег моделюється вертикальною стінкою. Вплив дна та берега ураховано за допомогою спеціальної функції Гріна. Розглянуто чотири різні форми судна: судно у формі еліпсоїда, судно з вертикальними бортами, судно симетричної та несиметричної форми з циліндричною вставкою.

В работе на основании численного метода граничных элементов проводятся расчеты сил и моментов гидродинамического взаимодействия судна с береговыми сооружениями, которые моделируются прямоугольными выступами разной длины, на мелкой воде. Берег моделируется вертикальной стенкой. Влияние дна и берега учтено посредством специальной функции Грина. Рассматриваются четыре различные формы судна: судно эллиптической формы, судно с вертикальными бортами, судно симметрической и несимметрической формы с цилиндрической вставкой.

The hydrodynamic forces and moments acting on the ship, which move near the waterside structure in shallow water, are calculated on the basis of numerical method of boundary elements. Bank is designed by vertical wall. Influencing of bottom and bank is taken into account by means the special Grin function. Four different forms of ship are considered: ship of elliptic form, ship with vertical sides and ship of symmetric and unsymmetric form with the cylindrical insertion.

ВСТУП

Відомо, що при рухові суден в умовах обмеженого фарватеру сили гідродинамічної взаємодії значно зростають порівняно з тими, що діють у безмежній рідині. Зокрема, істотно зростають сили притягання між об'єктами взаємодії, наприклад, між двома судами або між судном та береговою лінією, що може призвести до зіткнення суден і аварій. Дія збурень, викликаних судном, може стати причиною порушення роботи гідротехнічних споруд, ерозії берегів, тощо. З іншого боку геометричні неоднорідності фарватеру (зміни глибини та ширини, гідротехнічні споруди, пришвартовані судна і таке інше) впливають на рухоме судно і цей вплив при певних обставинах, наприклад на мілкій воді, може бути досить значний.

За останні десятиріччя інтенсивність судноплавства значно зросла. Спостерігається збільшення кількості, розмірів і типів суден, що використовуються для пасажирських та вантажних перевезень, а також задіяних у військових операціях. Це зумовило розвиток систем управління рухом суден на перенасичених ділянках акваторій, таких як порти, канали, річки, тощо. Зросло також вимоги до безпеки руху суден. Тому активно досліджуються шляхи попередження зіткнень і поліпшення екологічної ситуації в акваторії та її прибережній зоні у випадку інтенсивного судноплавства. Це пояснює неабиякий інте-

рес інженерів-суднобудівників та гідротехніків до результатів відповідних гідродинамічних досліджень. Не дивно, що останнім часом збільшується кількість теоретичних та експериментальних досліджень, які стосуються гідродинамічної взаємодії суден, зокрема, взаємодії суден з береговими конструкціями, взаємодії суден під час маневрування, взаємодії суден в обмежених фарватерах тощо [2–4, 8–10].

Вивчення взаємодії судна, яке проходить біля берегової лінії (вертикальної стінки), з виступом є дуже важливим з практичної точки зору. Це може бути хвилеріз, пришвартоване судно, платформа, особливість берегової лінії і таке інше. Подібні задачі розглядалися [5, 7] за допомогою наближеної теорії тонкого тіла, але значно цікавішим і важливішим є просторовий випадок, оскільки в залежності від форми конструкцій та суден гідродинамічні навантаження на них можуть істотно змінюватись.

У даній роботі аналізується гідродинамічна взаємодія суден різної форми з береговими гідротехнічними конструкціями, які схематизуються (виступами різних розмірів) в умовах мілкої води. Вважається, що взаємодія відбувається при малих числах Фруда ($Fr \ll 1$) так, що граничну умову на вільній поверхні можна замінити умовою на твердій стінці.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для розв'язку задачі використовується модель ідеальної нестисливої рідини. Нехай Ω – область, у якій рухається тіло, а S – її гранична поверхня. У випадку безвихрової течії задача зводиться до розв'язання рівняння Лапласа для потенціалу:

$$\Delta\varphi(\vec{x}) = 0, \quad \vec{x} = (x, y, z) \in \Omega, \quad (1)$$

з граничними умовами:

$$\left. \frac{\partial\varphi(\vec{x})}{\partial n} \right|_S = \vec{V}(\vec{x}_0, t) \times \vec{n}(\vec{x}_0), \quad (2)$$

$\vec{x}_0 \in S$; $\vec{n}(\vec{x}_0)$ – одинична зовнішня нормаль до поверхні S ; $\vec{V}(\vec{x}_0, t)$ – закон руху поверхні. Задача Лапласа (1) з граничними умовами (2) розв'язується чисельно за допомогою методу граничних елементів [1, 2, 6].

В даній роботі розглядаються декілька типових форм суден.

1. Судно моделюється тривісним еліпсоїдом.

2. Судно складається з вертикального еліптичного циліндра висотою h_{cyl} , який наближено описує борти судна, та напівеліпсоїда, що описує дно судна (рис. 1, а). Відношення висоти циліндра до посадки судна $h_{cyl}/c = 4/5$. Далі таку форму судна будемо називати "судно з вертикальними бортами".

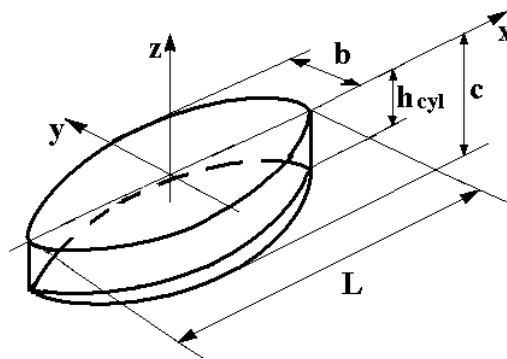
3. Форма судна в центральній частині наближено описується горизонтальним циліндром довжиною L_{cyl} з половиною еліпса в поперечному перерізі. Ніс та корму судна моделюють частинами тривісних еліпсоїдів (рис. 1, б). Відношення півосей a_1 та a_2 до довжини судна $a_1/L = a_2/L = 1/4$. Далі будемо називати таку форму – судно з циліндричною вставкою.

4. Несиметричне судно з циліндричною вставкою відрізняється від попереднього випадку тим, що кормова і носова частини моделюються частинами різних еліпсоїдів. Корму та ніс судна моделюють чвертьеліпсоїди різних розмірів, а саме $a_1/L = 1/16$, $a_2/L = 1/4$.

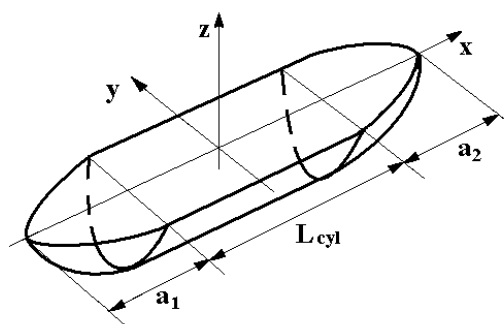
Співвідношення основних розмірів у всіх суден однакове $b/L = 1/12$, $c/L = 1/24$. Тут L – довжина, b – напівширина, а c – посадка судна.

Розглянемо рух судна зі швидкістю V в напрямку осі x на мілкій воді глибиною $h = 1.1c$. Судно рухається біля вертикальної стінки на відстані від неї $\Delta d = 4b$. В певний момент часу судно проходить повз виступ (на стінці) розміром $\Delta l \times 2b \times h$, рис. 2.

Дослідимо зміни гідродинамічних сил на рухоме судно залежно від його форми та довжини виступу.



а



б

Рис. 1. Схема моделі судна з вертикальними бортами (а) та моделі судна з циліндричною вставкою (б)

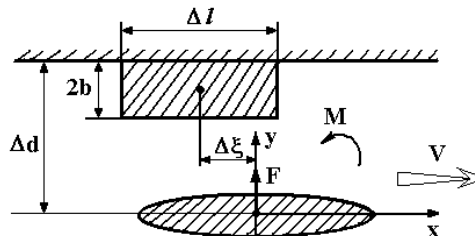
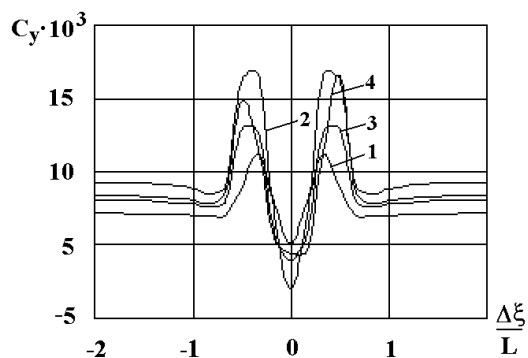


Рис. 2. Схема проходження судна повз виступ (вид зверху)

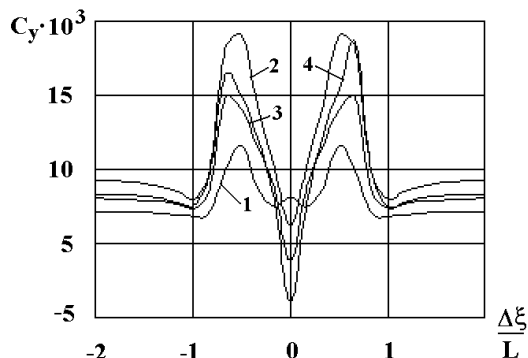
2. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

На рис. 3–6 наведені графіки коефіцієнтів бокової сили $C_y = F/\rho V^2 L b$ та моменту $C_m = M/\rho V^2 L^2 b$, які діють на судна різних форм, що рухаються повз виступ з різними значеннями довжини Δl . Зазначимо також, що центр моментів знаходиться в центрі ваги. Номера кривих на рисунках відповідають наступним формам суден:

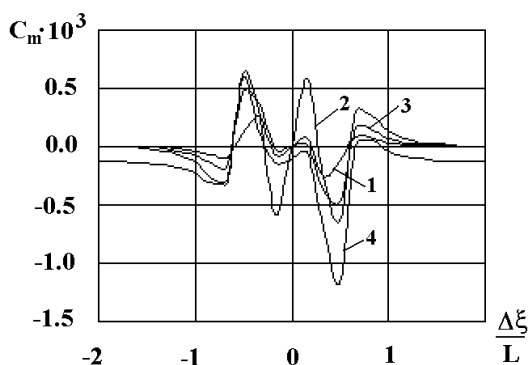
- 1 – судно у формі еліпсоїда;
- 2 – судно з вертикальними бортами;



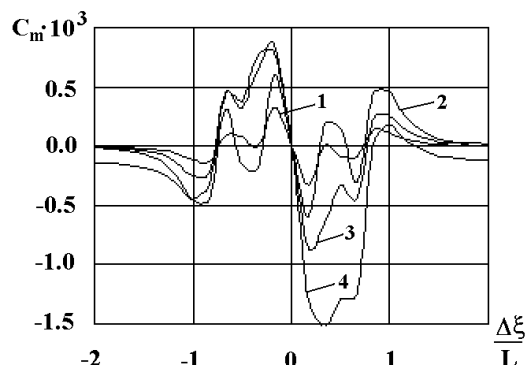
а



а



б



б

Рис. 3. Порівняння коефіцієнтів бокової сили (а) та моменту (б), що діє на судно при проходженні його повз виступ довжиною $\Delta l = L/20$

Рис. 4. Порівняння коефіцієнтів бокової сили (а) та моменту (б), що діє на судно при проходженні його повз виступ довжиною $\Delta l = L/2$

3 – судно з циліндричною вставкою;

4 – несиметричне судно.

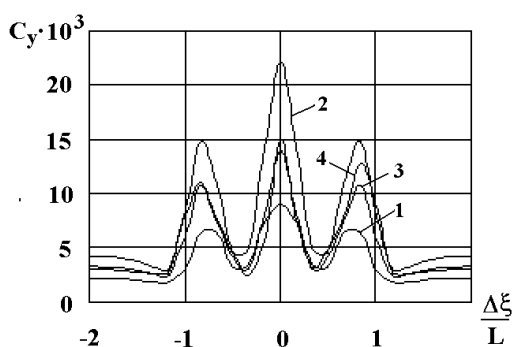
При $\Delta l = L/20$ виступ має форму пластини. При підході судна на відстань $\Delta \eta \approx L$ від виступу на судно починає діяти сила притягання. Вона різко зростає і набуває свого максимального значення при $|\Delta \xi| \approx L/2$. Після цього сила притягання зменшується і при розташуванні міделя судна та середини виступу на одному траверзі вона стає близькою до нуля (рис. 3, а).

Залежність моменту гідродинамічних сил від $\Delta \xi$ має складніший характер. Розрахунки свідчать, що найнебезпечнішим є момент повороту судна до виступу при $|\Delta \xi| \approx L/2$. Спочатку (область $\Delta \xi < 0$) відбувається відворот носа судна від виступу, тоді при $\Delta \xi \approx -\frac{2L}{3}$ поворот носа судна до виступу, далі при $\Delta \xi \approx -\frac{L}{3}$ знову відворот. Зазначимо, що момент останнього відвороту носа судна від виступу істотний лише для судна з вертикаль-

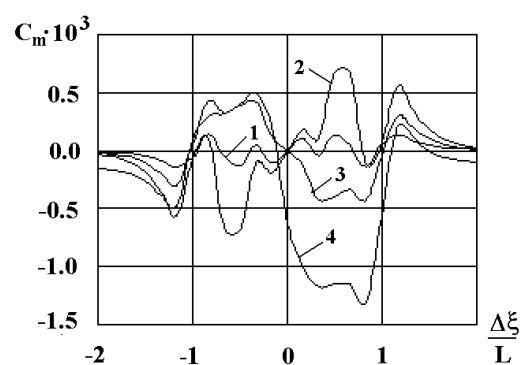
ними бортами (рис. 3, б, крива 2), для суден інших форм він практично нульовий. Зазначимо також, що залежності моментів від $\Delta \xi$ для симетричних суден антисиметричні, тобто при проходженні виступу міделем судна (область $\Delta \xi > 0$) момент змінює знак. При збільшенні довжини виступу до $\Delta l = L/2$ характер сил та моментів практично не змінюється (рис. 3).

При довжині виступу $\Delta l = L$ (довжина виступу дорівнює довжині судна) залежність сили від $\Delta \xi$ має три екстремуми (рис. 4, а), що узгоджується з результатами роботи [7]. Причому максимального значення сила притягання досягає в точці $\Delta \xi = 0$, тобто коли мідель судна і виступ знаходяться на одному траверзі. При подальшому збільшенні довжини виступу область дії сили притягання зростає (рис. 5, а), і це дуже небезпечно. У цьому випадку виступ на певному проміжку часу та відстаней $\Delta \xi$ фактично перегворюється в стінку.

При такій довжині виступу момент часто змінює свою монотонність і має багато екстремумів.

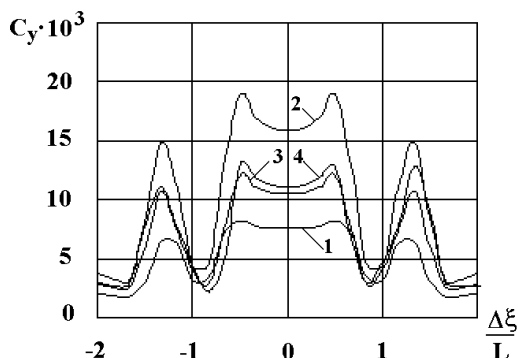


а

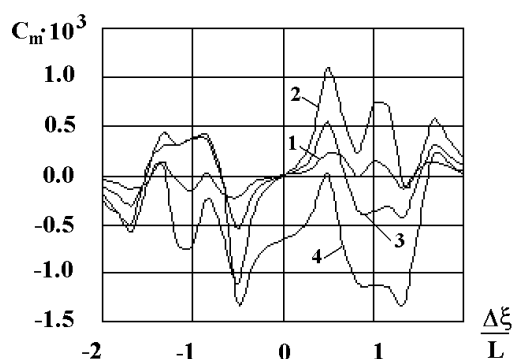


б

Рис. 5. Порівняння коефіцієнтів бокової сили (а) та моменту (б), що діє на судно при проходженні його повз виступ довжиною $\Delta l = L$



а



б

Рис. 6. Порівняння коефіцієнтів бокової сили (а) та моменту (б), що діє на судно при проходженні його повз виступ довжиною $\Delta l = 2L$

ВИСНОВКИ

Залежність моменту для еліпсоїда нагадує осцилюючу функцію (рис. 4, б,–5, б, крива 1). Однак для судна з циліндричною вставкою (рис. 4, б,–5, б, криві 3–4) в області $\Delta\xi < 0$ момент діє так, що відбувається відворот носу судна від виступу. Для судна з вертикальними бортами (рис. 4, б,–5, б, крива 2) напрямок моменту протилежний.

Порівнюючи криві 3 та 4 на рисунках 3–6 можна сказати, що бокові сили, які діють на судно симетричної та несиметричної форми з однаковим співвідношенням осей практично не відрізняються (рис. 3, а–6, а). Однак моменти для симетричного і несиметричного суден відрізняються помітно. З рис. 3, б–6, б видно, що взаємодія корми і виступу є інтенсивнішою, ніж взаємодія носа судна і виступу. Можна помітити, що максимальне значення моменту повороту корми судна до виступу майже вдвічі перевищує аналогічне значення моменту повороту носа судна до виступу.

Використовуючи чисельний метод граничних елементів, розраховані залежності коефіцієнтів гідродинамічних сил та моментів, що діють на судна різних форм при взаємодії їх з береговими гідротехнічними спорудами (рис. 2), які моделюються прямокутним виступом різної довжини. Розрахунки проводились для суден чотирьох різних форм: еліпсоїдної, судна з вертикальними бортами (рис. 1, а), симетричного та несиметричного судна з циліндричною вставкою (рис. 1, б).

Показано, що характер залежностей сил та моментів змінюється зі зміною довжини виступу. Характер залежності бокової сили однаковий для суден усіх форм. Найменші значення бокової сили спостерігаються для судна еліпсоїдної форми, а найбільші – для судна з вертикальними бортами. На всій ділянці взаємодії бокова гідродинамічна сила діє як сила притягання судна до виступу не залежно від його довжини. У випадку малої дов-

жини виступу $\Delta l \leq \frac{L}{20}$ при проходженні міделем судна середини виступу спостерігається мінімальне значення бокової сили, а у випадку великої довжини $\Delta l \geq L$ навпаки – максимальне.

Характер залежностей коефіцієнтів гідродинамічного моменту значною мірою визначається формою судна. Графіки моменту, що діє на судно з формою еліпсоїда, нагадують осцилюючу функцію. Якщо виступ має форму пластини (рис. 3, б), залежності для всіх розглянутих типів суден мають однаковий характер. При довжині виступу $\Delta l \geq L$ гідродинамічний момент, що діє на судно з вертикальними бортами в області $\Delta \xi < 0$, намагається відвернути ніс судна в протилежну від виступу сторону, а при проходженні міделем судна середини виступу – навпаки намагається відвернути від виступу корму судна (рис. 5, б–6, б, крива 2). На судно з циліндричною вставкою момент діє протилежним чином (рис. 5, б–6, б, криві 3–4).

Моменти для симетричного і несиметричного суден на відміну від бокових сил помітно відрізняються. Взаємодія корми і виступу є інтенсивнішою ніж взаємодія носової частини судна і виступу. Максимальне значення гідродинамічного моменту, що відповідає повороту корми судна до виступу, майже вдвічі перевищує аналогічне значення моменту, що повертає ніс судна до виступу.

Слід зазначити, що на гідродинамічні моменти на відміну від бокових сил істотно впливає форма та розмір зануреної частини судна, тому необхідно виконувати розрахунки для кожного конкретного судна.

1. Бенержи П., Баттерфилд Р. Метод граничних елементов в прикладных науках.– М.: Мир, 1984.– 494 с.
2. Горбань В. О., Масюк С. В. Чисельне моделювання гідродинамічної взаємодії тіл, що рухаються в рідині // Прикладна гідромеханіка.– 2006.– 8, N 3.– С. 27-49.
3. Горбань В. О., Масюк С. В. Гідродинамічна взаємодія суден на мілководді // Прикладна гідромеханіка.– 2007.– 9(81), N 4.– С. 17-29.
4. Cohen S., Beck R. Experimental and theoretical hydrodynamic forces on a mathematical model in confined water // Journal of Ship Research.– 1983.– 27, N 2.– P. 75-89.
5. Gui Q. Y., Chuang J. M. and Hsiung C. C. A discussion on irregularities which occur in computation of ship manoeuvring in a restricted waterway using the numerical conformal mapping method // Int. Shipbuild. Progr.– 1992.– 39, N 417.– P. 55-67.
6. Hess J. L., Smith A. M. Calculations of nonlifting potential flow about arbitrary three-dimensional bodies // Journal of Ship Research.– 1964.– 8, N 2.– P. 22-44.
7. Hsiung C. C. and Qianyi Gui Computing interaction forces and moment on a ship in restricted waterway // Int. Shipbuild. Progr.– 1988.– 36, N 403.– P. 219-254.
8. Korsmeyer F. T., Lee C. - H., Newman J. N. Computation of Ship Interaction forces in restricted water // Journal of Ship Research.– 1993.– 37, N 4.– P. 298-306.
9. Krishnankutty P. Forces between ships during sid-sea replenishment and harbour transit // IE(I) Journal-MR.– 2004.– 84, N 2.– P. 54-56.
10. Krishnankutty P. and Varyani K. S. Force on the mooring lines of a ship due the hydrodynamic interaction effects of a passing ship // Int. Shipbuild. Progr.– 2004.– 51, N 1.– P. 33-57.