

УДК 532.538

ГІДРОДИНАМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ СУДЕН З БЕРЕГОВИМИ СПОРУДАМИ В УМОВАХ ТЕЧІЇ

В. О. ГОРБАНЬ, С. В. МАСЮК, В. І. НІКІШОВ

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Отримано 20.02.2009

На основі панельного методу виконано чисельне моделювання гідродинамічної взаємодії судна, що рухається, з береговими спорудами. Споруди моделюються прямокутними виступами, берег розглядається як вертикальна стінка. Для описання впливу дна та берега використано спеціальну функцію Гріна. Зроблено оцінки сил та моментів, що діють на судно, за наявності зустрічної або попутної течії. Показано, що в умовах обмеженого фарватеру зустрічна течія є небезпечнішою за попутну.

Используя панельный метод, выполнено численное моделирование гидродинамического взаимодействия движущегося судна с береговыми сооружениями. Сооружения моделируются прямоугольными выступами, берег рассматривается как вертикальная стенка. Для описания влияния дна и берега используется специальная функция Грина. Получены оценки сил и моментов, действующих на судно, при наличии встречного и попутного течения. Показано, что в условиях ограниченного фарватера встречное течение опасней попутного.

On the base of the panel method, the hydrodynamic interaction between the moving vessel and coastal structures is carried out. The coastal structures are designed by rectangular leegs and the bank is considered as a vertical wall. To describe an influence of the bank and bottom, the special Green function is used. The forces and moments of the vessel are estimated under conditions either of following or of cross current. The last is obtained to be dangerous when a vessel moves in the bounded fairway.

ВСТУП

За останні десятиріччя інтенсивність судноплавства значно зросла. Спостерігається збільшення кількості, розмірів і типів суден, що використовуються для пасажирських та вантажних перевезень. Це зумовило розвиток систем управління рухом суден на перенасичених ділянках акваторій, таких як порти, канали, річки тощо. Зросли також вимоги до безпеки руху суден. Тому активно досліджуються шляхи попередження зіткнень суден між собою та з портовими спорудами, зокрема, з причальними стінками. Це пояснює неабиякий інтерес інженерів-суднобудівників та гідротехніків до результатів відповідних гідродинамічних досліджень. 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 [3–5, 8–11].

Відомо, що при рухові суден в умовах обмеженого фарватеру сили гідродинамічної взаємодії значно зростають порівняно з тими, що діють у необмеженій рідині. Зокрема, істотно зростають сили притягання між об'єктами взаємодії, наприклад, між двома судами або між судном та береговою лінією. Геометричні неоднорідності фарватеру (змі-

ни глибини та ширини, гідротехнічні споруди, пришвартовані судна та інші) впливають на рухоме судно, і цей вплив при певних обставинах, наприклад, на мілкій воді, може бути досить значним.

Вивчення взаємодії судна, яке проходить поблизу берегової лінії (вертикальної або нахиленої стінки), з виступом є важливим з практичної точки зору. Це може бути хвилеріз, пришвартоване судно, платформа, особливість берегової лінії. Подібні задачі розв'язувалися [6, 8] 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 зростати.

Для аналізу динаміки суден біля берега важливими факторами є наявність течії, хвиль, довжина яких близька до ширини судна, а також довгих хвиль з довжиною, що значно перевищує розміри суден. Вони формуються, зокрема, внаслідок взаємодії з нерівностями дна та біля берега.

В даній роботі розглядаються лише окремі аспекти гідродинамічної взаємодії суден з береговими гідротехнічними конструкціями (виступами різних розмірів) на мілкій воді за наявності течії. Вважається, що взаємодія відбувається при малих числах Фруда ($Fr \ll 1$) так, що граничну умову на вільній поверхні можна замінити умовою на твердій стінці.

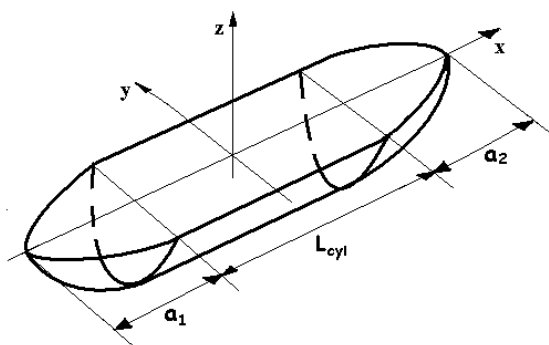


Рис. 1. Схема моделі судна з циліндричною вставкою

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для розв'язання 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:

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

де $\vec{x}_0 \in S$; $\vec{n}(\vec{x}_0)$ – одинична зовнішня нормаль до поверхні S ; $\vec{V}(\vec{x}_0, t)$ – закон руху поверхні. В роботі задача Лапласа (1) з граничними умовами (2) розв'язується чисельно за допомогою методу граничних елементів. Функція Гріна в цьому випадку є відомою. Відповідний числовий алгоритм описаний в роботах [1–4, 7].

Розглянемо типову модель судна з циліндричною вставкою: довжина судна – L , півширина – b та осадка – c (рис. 1). В центральній частині форма судна наближено описується горизонтальним циліндром довжиною L_{cyl} з половиною еліпса в поперечному перерізі. Ніс та корму судна моделюють частинами тривісних еліпсоїдів. Відношення півосей a_1 та a_2 до довжини судна дорівнюють $a_1/L = a_2/L = 1/4$.

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) [4].

Припустимо, що судно взаємодіє з виступом в умовах течії. Позначимо V_s – швидкість течії

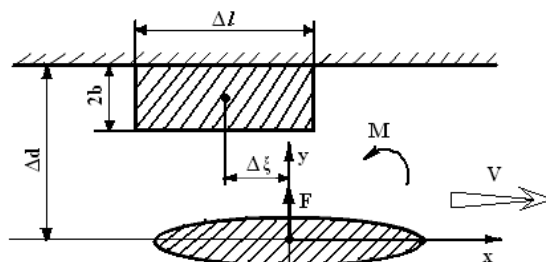


Рис. 2. Схема проходження судна повз виступ (вид зверху)

вздовж осі x . Тоді потенціал швидкості, що відповідає рухові судна зі швидкістю V повз виступ, має вигляд:

$$\varphi = (V - V_s)\varphi_c - V_s\varphi_b + V_s x, \quad (3)$$

де φ_c – потенціал швидкості, який відповідає рухові судна з одиничною швидкістю повз виступ, а φ_b – потенціал, що відповідає рухові виступу з одиничною швидкістю повз нерухоме судно.

Очевидно, що рівняння (3) буде задовольняти як граничним умовам на поверхнях тіл, так і умові на нескінченності.

Зауважимо, що даний підхід дозволяє враховувати вплив течії на сили взаємодії між судном та виступом тільки в рамках потенційного обтікання. В умовах течії навколо виступу вихроутворення не враховується.

2. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

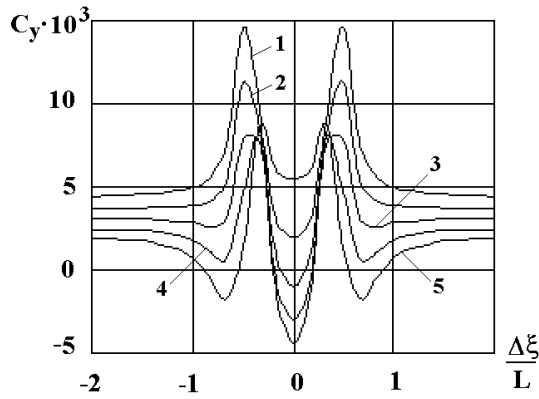
На рисунках 3–6 наведені результати розрахунків, зокрема, графіки коефіцієнтів бокової сили $C_y = F/\rho V^2 L b$ та моменту $C_m = M/\rho V^2 L^2 b$, що діють на судно при проходженні його повз виступи різної довжини в умовах течії. Зазначимо, що центр моментів знаходиться в центрі ваги судна.

Номера кривих на рис. 3–6 відповідають наступним швидкостям течії V_s :

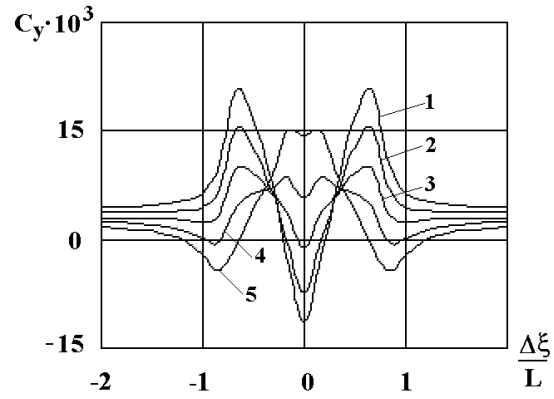
- 1 – $V_s = -0.2$;
- 2 – $V_s = -0.1$;
- 3 – $V_s = 0$;
- 4 – $V_s = 0.1$;
- 5 – $V_s = 0.2$.

Проаналізуємо спочатку взаємодію судна з виступом в стоячій воді, тобто коли швидкість течії дорівнює нулеві. Цьому випадку відповідає крива 3 на рис. 3–6.

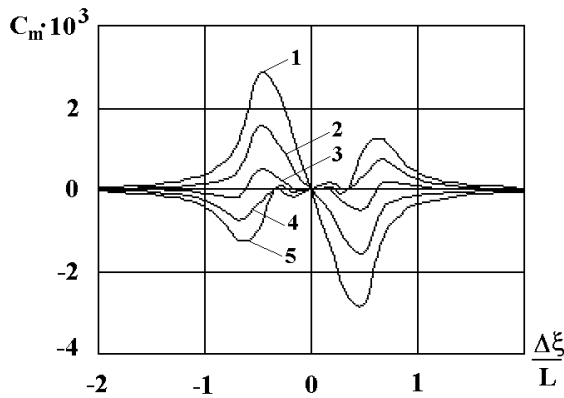
При $\Delta l = L/20$ форма виступу близька до пластини. При розташуванні судна на відстані $\Delta\xi \approx L$



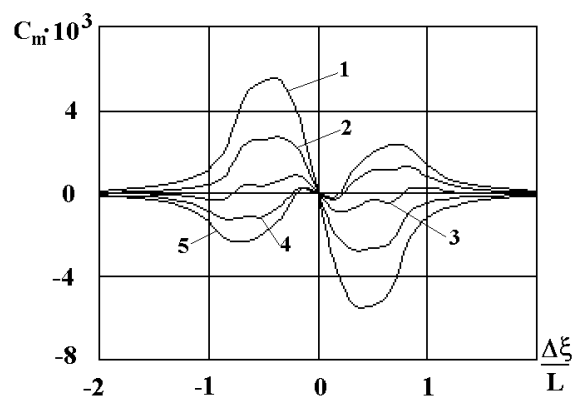
a



a



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 $\Delta l = L/2$

від виступу на нього починає діяти сила притягання до виступу, $C_y > 0$. 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 траверсі вона стає близькою до нуля (рис. 3, а).

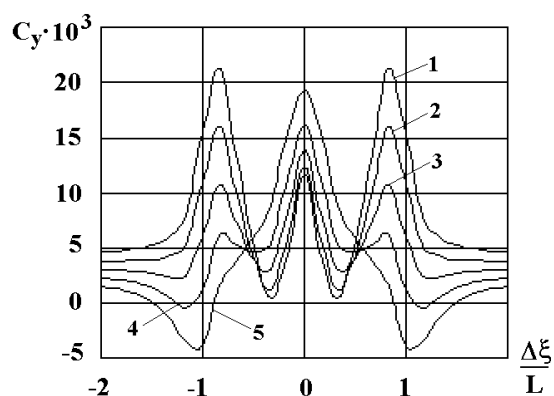
Залежність гідродинамічного моменту від $\Delta\xi$ має складніший характер (рис. 3, б). Розрахунки свідчать, що найнебезпечнішим є момент повороту судна до виступу при $|\Delta\xi| \approx L/2$. Спочатку (область $\Delta\xi < -\frac{2L}{3}$) відбувається відворот носової частини судна від виступу, а тоді при $(-\frac{2L}{3} \leq \Delta\xi \leq 0)$ – поворот носу судна до виступу. Залежності моментів від $\Delta\xi$ для симетричних суден антисиметричні, тобто при проходженні виступу міделем судна момент змінює знак.

При збільшенні довжини виступу до $\Delta l = L/2$

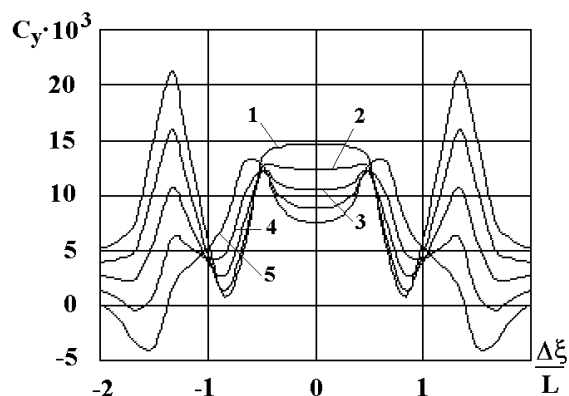
форми розподілу сил та моментів практично не змінюються (рис. 4), і відмінності мають тільки кількісний характер.

При довжині виступу $\Delta l = L$ (з довжиною близькою до довжини судна) залежність сили від $\Delta\xi$ має три екстремуми (рис. 5, а), що узгоджується з результатами роботи [7]. Причому, максимальне значення сили притягання досягається в точці $\Delta\xi = 0$, тобто коли мідель судна і виступ знаходяться на одному траверсі. При подальшому збільшенні довжини виступу область максимальної дії сили притягання зростає (рис. 6, а), і це дуже небезпечно. У цьому випадку виступ на певному проміжку часу та відстаней $\Delta\xi$ фактично перетворюється в стінку. При такій довжині виступу (рис. 5–6, б) в області $\Delta\xi < 0$ момент головним чином діє так, що відбувається повернення носу судна до виступу.

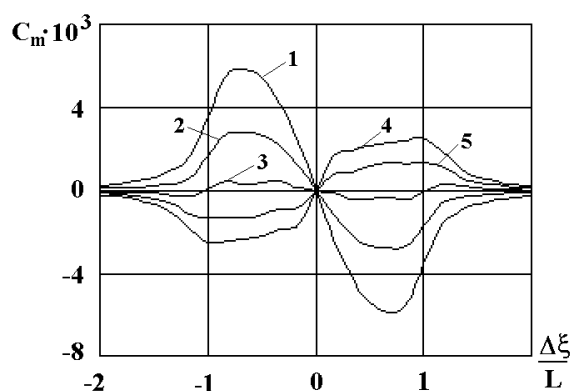
Сила, а особливо момент гідродинамічної взає-



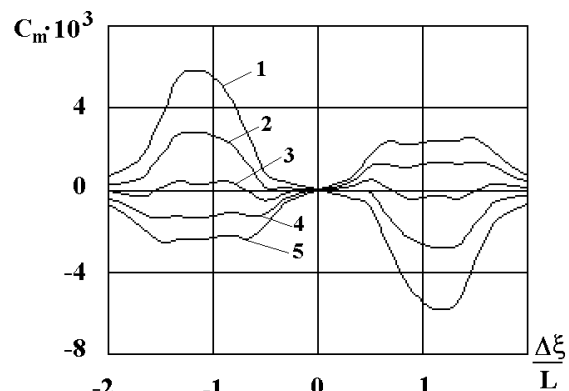
a



a



б



б

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

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

модії між судном та виступом, істотно зростають у випадку, коли у фарватері присутня навіть невелика (10% від швидкості судна) зустрічна течія (рис. 3–6, крива 2). В області максимальних значень сила зростає майже в 1.5 рази, а момент – майже в 5 разів. Якщо швидкість течії збільшується до 20% від швидкості судна, сили гідродинамічної взаємодії зростають ще майже в 2 рази (рис. 3–6, крива 1). Зростання сил пов'язане з накладанням на генероване судном гідродинамічне поле потенційного гідродинамічного поля, що викликано обтіканням нерівності границі (гідротехнічної споруди). Розподіл гідродинамічних сил і моментів буде залежати також від розмірів та інтенсивності вихрових зон як біля нерівності, так і за судном, що рухається. Збільшення сил гідродинамічної взаємодії для потенційної течії (рис. 3–6, а, криві 1–2) відбувається таким чином, що максимальне значення сил зростає, а мі-

німально зменшується, тобто зростають абсолютні значення гідродинамічних сил. Моменти при наявності зустрічної течії (рис. 3–6, б, криві 1–2) в області $\Delta\xi < 0$ намагаються повернути ніс судна до виступу, а в області $\Delta\xi > 0$ – навпаки, намагаються повернути корму судна до виступу.

У випадку, коли течія не зустрічна, а попутна, гідродинамічний момент змінює свій знак на протилежний (рис. 3–6, б, криві 4–5), тобто в області $\Delta\xi < 0$ він намагається повернути корму судна до виступу, а в області $\Delta\xi > 0$ – ніс. Абсолютні значення моментів при попутній течії є приблизно в 2 рази меншими за ті, що виникають при зустрічній течії. Бокова сила при попутній течії (рис. 3–6, а, криві 4–5) загалом дещо зменшується порівняно зі стоячою водою. Також зменшується її максимальне значення. Однак на деяких ділянках руху при наявності попутної течії значення бокової сили є більшими, ніж при її відсутності. Отже, гідродина-

мічна взаємодія об'єктів є причиною значної зміни навантажень на них (в рамках потенційної теорії). У випадку відривного обтікання сили і моменти можуть істотно змінюватись.

ВИСНОВКИ

На основі методу граничних елементів розраховані залежності коефіцієнтів гідродинамічних сил та моментів, що діють на судно (рис. 1) при взаємодії його з береговими гідротехнічними спорудами, які моделюються прямокутними виступами різної довжини (рис. 2). Використовується наближення потенційного обтікання. Показано, що характер залежностей сил та моментів змінюється зі зміною довжини виступу і залежить від напрямку та швидкості течії.

При відсутності течії на всій ділянці взаємодії бокова сила діє як сила, що притягує судно до виступу незалежно від його довжини. У випадку малої довжини виступу при розташуванні міделя судна і середини виступу на одному траверсі спостерігається мінімальне значення бокової сили, а у випадку великої довжини – навпаки, максимальне. При довжині виступу $\Delta l = L$ залежність сили від $\Delta \xi$ має три екстремуми, а максимальне значення сила притягання досягає в точці $\Delta \xi = 0$ (рис. 5, а). При подальшому збільшенні довжини виступу область максимальної дії сили притягання зростає (рис. 6, а), тобто виступ на певному проміжку відстаней $\Delta \xi$ фактично відіграє роль стінки.

Моменти при відсутності течії (рис. 3–6, б, крива 3) в області $\Delta \xi < 0$ головним чином намагаються повернути ніс судна до виступу, а в області $\Delta \xi > 0$ – навпаки, намагаються повернути корму судна до виступу. При довжині виступу $\Delta l \leq L$ момент досягає максимального значення при $|\Delta \xi| \approx L/2$ (рис. 3–5, б). При довжині виступу $\Delta l = 2L$ це максимальне значення моменту зміщується в точку $|\Delta \xi| \approx L$ (рис. 6, б).

У випадку, коли у фарватері є навіть невелика зустрічна течія, бокова гідродинамічна сила може зрости майже в 1.5 рази, а гідродинамічний момент – майже в 5 разів (рис. 3–6, криві 1–2).

У випадку попутної течії (як для випадку стаціонарних течій, так і для змінних за часом течій) (рис. 3–6, криві 4–5) гідродинамічний момент змінює свій знак на протилежний (рис. 3–6, б, криві 4–5), тобто в області $\Delta \xi < 0$ він намагається повернути корму судна до виступу, а в області $\Delta \xi > 0$ – ніс судна до виступу. Крім того, абсолютне значення моменту є в 2 рази меншим, ніж при зустрічній течії.

При попутній течії на деяких ділянках руху значення бокової сили збільшуються порівняно зі стоючою водою, але максимальне значення бокової сили зменшується (рис. 3–6, а, криві 4–5).

В загальному випадку можна зробити висновок, що з точки зору гідродинамічної взаємодії в рамках потенційного наближення зустрічна течія є небезпечнішою за попутну, оскільки при рухові судна вздовж берегової лінії вона призводить до значного збільшення гідродинамічних сил між судном і гідротехнічними спорудами. Тому на практиці її вплив потрібно враховувати.

1. Бенержи П., Баттерфилд Р. Метод граничних елементів в прикладних 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. Масюк С. В. Гідродинамічна взаємодія суден з береговими спорудами на мілкій воді // Прикладна гідромеханіка. – 2008. – 10(82), N 3. – С. 77-81.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Krishnankutty P. Forces between ships during sid-sea replenishment and harbour transit // IE(I) Journal-MR. – 2004. – 84, N 2. – P. 54-56.
11. 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.