

УДК 551.466

Котельнікова А. С.¹, пров. інж.,
Нікішов В. І.¹, чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н., проф.

Вплив підводних перешкод на процес поширення поверхневих поодиноких хвиль

Представлено результати експериментальних досліджень процесу взаємодії поверхневих поодиноких хвиль з підводними перешкодами. Виявлено, що в залежності від амплітуди хвилі, глибини потоку і висоти перешкоди існують два основні сценарії процесу. Запропоновано критерій, який визначає реалізацію першого чи другого сценарію взаємодії. Показано, що геометричні параметри перешкоди суттєво впливають на взаємодію хвилі з перешкодою.

Ключові слова: поодинока хвиля, підводна перешкода, коефіцієнти проходження та відбиття.

¹ Інститут гідромеханіки НАН України,
03680, м. Київ, Желябова, 8/4
e-mail: vinihm@gmail.com

Дослідження взаємодії нелінійних хвиль з береговими схилами і підводними перешкодами має велике значення в інженерній практиці, наприклад, при проектуванні конструкцій для дисипації хвильової енергії та захисту берегів від ерозії. Створення штучних берм на морському дні та хвилеломів суттєво впливають на параметри хвильового процесу, зменшуючи їх руйнівну дію в прибережній зоні [1-3]. При поширенні поверхневих гравітаційних хвиль над донною поверхнею зі складним рельєфом або при наявності локальних неоднорідностей типу виступів, впадин, каналів має місце концентрація хвильової енергії і суттєве переформування структури хвильового потоку, змінюється форма хвилі, швидкість поширення, а також амплітуда і довжина хвилі. Крім того, взаємодія нелінійних хвиль з неоднорідностями дна супроводжується генерацією вихрових структур [4, 5]. Тому важливою задачею є вивчення закономірностей трансформації хвиль при їх взаємодії з топографічними особливостями донної поверхні.

В роботі представлено результати експериментальних досліджень процесу взаємодії поодиноких хвиль з підводними перешкодами типу

A. S. Kotelnikova¹, Senior engineer,
V. I. Nikishov¹, Corr. Mem. of NASU, Dr. Sci., Prof.

Effect of underwater obstacles on propagation of surface solitary waves

The results of experimental study of interaction process of surface solitary waves with underwater obstacles are presented. Two main scenarios of the process exist depending on wave amplitude, depth and height of obstacle. The criterion determining the realization of the first or the second scenario of the interaction is proposed. It is shown that interaction highly depends on the geometric parameters of obstacles.

Key Words: solitary wave, underwater obstacle, transmission and reflection coefficients.

¹ Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine,
8/4 Zheliabov str., Kiev, 03680, Ukraine
e-mail: vinihm@gmail.com

«вертикальна пластина», «прямокутний поріг» і «уступ».

Експерименти проводились у хвильовому лотку довжиною 16 м, шириною 0,3 м та висотою 0,7 м з глибинами води 8 см, 11 см і 17 см. Ширина перешкод відповідала ширині хвильового лотка, висота складала 6 см і 9 см. Перешкоди встановлювались на дні каналу перпендикулярно напрямку руху потоку: вертикальна пластина і поріг довжиною 30 см – на відстані ≈ 260 см від торцевої стінки, уступ довжиною 272 см – в торці лотка.

Генерація поодиноких хвиль відбувалась шляхом створення локального підйому рівня води, який виникав при падінні важкого тіла на дно лотка. Подальша еволюція збурення призводила до формування поодинокі хвилі. Дисперсійний «хвіст», який виникав при генерації хвилі, відсікався за допомогою спеціального пристрою. Ефективність такого відсікання падає з ростом глибини, проте інтенсивність дисперсійного «хвоста» залишається малою. Докладний опис експериментальної установки представлено в [6].

Реєстрація деформації вільної поверхні при проходженні поодинокі хвилі здійснювалась розподіленими ємнісними датчиками. Величина

часового інтервалу між даними, що реєструвалися, була 5 мсек для кожного датчика. Тривалість одного експерименту складала ≈ 30 с. В ході експерименту датчики були розташовані вздовж осі лотка. Для визначення параметрів падаючої і відбитої хвиль чотири датчики були встановлені до перешкоди, два датчики, встановлені за перешкодою у випадку «вертикальна пластина» і «порог» або над перешкодою у випадку «уступу», реєстрували хвилю, що пройшла. Взаємодія поодинокі хвилі з підводними перешкодами реєструвалась також за допомогою цифрової відеокамери.

Результати експериментальних досліджень

Поодинокі хвилі, що формувалися в експерименті, є типовими нелінійними хвилями. Теоретичний профіль цих хвиль (суцільна лінія на рис. 1) описується рівнянням [7]

$$\eta = a \cdot \operatorname{sech}^2 \left[\left(3a/4H^3 \right)^{1/2} x \right],$$

де a – амплітуда хвилі, H – незбурена глибина води. Форма поодинокі хвилі, яка була отримана в результаті обробки даних експериментів, представлена на рис. 1.

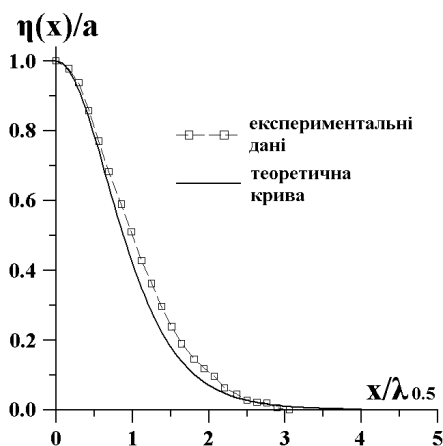


Рис. 1. Форма профілю поодинокі хвилі $\eta(x)/a$ по відношенню до $x/\lambda_{0,5}$; $\lambda_{0,5}$ – відстань від точки, що відповідає гребню хвилі, до точки, яка відповідає половині амплітуди хвилі [8]

Після генерації хвиля з амплітудою a рухається вздовж каналу з горизонтальною донною поверхнею без помітних змін, крім незначного зменшення амплітуди, обумовленого дією дисипативних процесів (тертя рідини о дно і стінки лотка).

Картина поширення хвилі в лотку змінюється, коли на дні каналу встановлено перешкоду. Виявлено, що в залежності від амплітуди хвилі, гли-

бини води і висоти перешкоди реалізуються два основних сценарії процесу взаємодії хвилі з підводною перешкодою: *трансформація і взаємодія*. *Перший сценарій* характеризується трансформацією хвилі та зміною її форми над перешкодою. Відбита хвиля в цьому випадку або не спостерігається, або її інтенсивність мала в порівнянні з падаючою. *Другий* – характеризується сильною взаємодією поодинокі хвилі з перешкодою. Відбувається її розпаданню над перешкодою на дві частини. При цьому задня частина захоплюється перешкодою, формуючи відбиту хвилю із супроводжуючим дисперсійним «хвостом», в той час як передня частина продовжує поширюватись вниз по потоку.

Запропоновано критерій, в залежності від величини якого реалізується перший чи другий сценарій взаємодії поодинокі хвилі з перешкодою: $K_{\text{int}} = a/(H - h)$, де h – висота перешкоди. Коли цей критерій більше критичного значення $K_{\text{int}} > K_{\text{int}}^{\text{cr}}$ ($K_{\text{int}}^{\text{cr}} = 1,0$), відбувається сильна взаємодія поодинокі хвилі з перешкодою. У випадку $K_{\text{int}} < K_{\text{int}}^{\text{cr}}$ хвиля проходить перешкоду з незначними змінами висоти і форми профілю.

Аналіз даних експерименту показав, що при поширенні поодинокі хвилі над вертикальною пластиною руйнування хвилі, що пройшла, не відбувається. Об'єм рідини, що пройшов над пластиною, формується у вигляді підняття вільної поверхні, яка згідно [7] далі повинна трансформуватися в солітон. Але в будь-якому випадку, при зменшенні глибини води в лотку і незмінній висоті пластина збільшується ступінь впливу перешкоди, що призводить до більш сильної взаємодії поодинокі хвилі з перешкодою. В результаті інтенсивність відбитої хвилі зростає і, відповідно, падає енергія хвилі, що пройшла. Певну роль при цьому грають і витрати енергії на формування вихору. При проходженні поодинокі хвилі над перешкодою типу «вертикальна пластина» відбувається відрив потоку, який зумовлює утворення вихору, що вимагає витрат енергії. Після проходження хвилі вихор руйнується і розсіюється.

Подібна картина спостерігається при взаємодії поодинокі хвилі з «порогом». Але при збільшенні критерію взаємодії після проходження перешкоди проявляються нелінійні ефекти, які спричиняють руйнування хвилі, що пройшла. Довжина перешкоди ($L = 30$ см) була меншою за довжину падаючої хвилі ($\lambda = 44$ см), і руйнування хвилі не спостерігалось. Вдалині від перешкоди форма профілю хвилі, що пройшла, була подібна до профілю падаючої хвилі.

У випадку «поодинокі хвиля – уступ» при $K_{\text{int}} < K_{\text{int}}^{\text{cr}}$ руйнування хвилі, що пройшла, не відбувається. Але змінюється амплітуда і форма профілю хвилі, що пройшла, тобто відбувається її трансформація. На рис. 2 представлено фотокадр поширення поодинокі хвилі над підводним уступом висотою 6 см при глибині води в лотку 17 см. Критерій взаємодії рівний 0,35.



Рис. 2. Фотокадр поширення поодинокі хвилі над підводним уступом висотою $h = 6$ см при глибині води $H = 17$ см ($K_{\text{int}} = 0,35$)

Збільшення висоти уступу ($h = 9$ см) при незмінній глибині води ($H = 17$ см), тобто збільшення значення критерію взаємодії, призводить до суттєвої зміни характеру взаємодії поодинокі хвилі з перешкодою (рис. 3). Видно, що над ус-

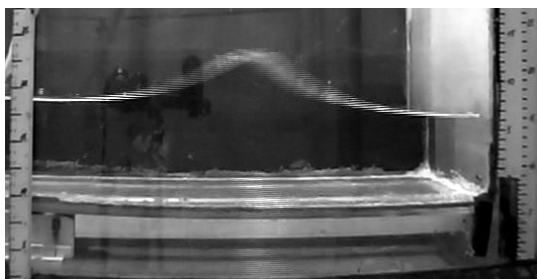


Рис. 3. Фотокадр поширення поодинокі хвилі над підводним уступом висотою $h = 9$ см при глибині води $H = 17$ см ($K_{\text{int}} = 0,44$)

тупом під впливом зростання нелінійних ефектів відбувається укручення хвилі та загострення форми. Незважаючи на те, що K_{int} в даному випадку залишається меншим $K_{\text{int}}^{\text{cr}}$ ($K_{\text{int}} = 0,44$), профіль хвилі зазнає значних змін. При зменшенні глибини води в лотку, постійній висоті перешкоди ($h = \text{const}$, $K_{\text{int}} > K_{\text{int}}^{\text{cr}}$) і збільшенні довжини перешкоди вплив перешкоди на форму профілю стає більш суттєвим. При переході з великої глибини H на мілку ($H - h$) швидкість поширення довгої хвилі зменшується, а отже, зменшується її довжина. Енергія хвилі зосереджується на більш ко-

роткій ділянці, що призводить до збільшення висоти і крутизни хвилі. При сильному зростанні нелінійних ефектів відбувається руйнування переднього фронту хвилі, і вона може рухатись далі у вигляді турбулентного бору.

Можна зробити висновок, що визначальними параметрами процесу взаємодії поодинокі хвилі з перешкодою є величина коефіцієнту взаємодії K_{int} , а також відношення довжини хвилі до довжини перешкоди. Коли перешкода має велику довжину, процес розщеплення відбувається над перешкодою, і хвиля, що пройшла, руйнується і поширюється далі у вигляді бору.

Характер взаємодії хвиль з перешкодою визначається також коефіцієнтами відбиття по амплітуді та по енергії: $K_a^r = a_r/a_i$, $K_E^r = E_r/E_i$ і відповідними коефіцієнтами проходження $K_a^r = a_{tr}/a_i$, $K_E^r = E_{tr}/E_i$, де a_r , E_r ; a_{tr} , E_{tr} і a_i , E_i – амплітуда та енергія відбитої хвилі, хвилі, що пройшла, та падаючої хвилі, відповідно.

На рис. 4 представлено значення коефіцієнтів відбиття по амплітуді для вертикальної пластини у вигляді заштрихованих трикутників ($h = 9$ см), не заштрихованих трикутників ($h = 6$ см) в залежності від відносної амплітуди хвилі. Глибина води складала 11 см. Для порівняння на рисунку наведено дані для порогу висотою 9 см у вигляді жирних хрестиків, для порогу висотою 6 см – тонкі хрестики; заштриховані квадрати відповідають уступу висотою 9 см, не заштриховані квадрати – уступу висотою 6 см. Видно, що для висоти перешкоди 6 см при глибині води в лотку 11 см значення коефіцієнтів відбиття для прямокутного порогу довжиною 30 см (тонкі хрестики) та уступу довжиною 272 см (не заштриховані квадрати) мало відрізняються. Коефіцієнти відбиття для вертикальної пластини (не заштриховані трикутники) в даному випадку ($H = 11$ см, $h = 6$ см) мають менші значення. Збільшення висоти перешкоди ($h = 9$ см) при глибині води 11 см призводить до збільшення коефіцієнтів відбиття, тобто ступінь взаємодії збільшується. Збільшення висоти перешкоди ($h = 9$ см) при глибині води 11 см призводить до збільшення коефіцієнтів відбиття, тобто ступінь взаємодії збільшується. В цьому випадку коефіцієнти відбиття для уступу (заштриховані квадрати) мають більші значення, ніж для порогу (жирні хрестики) і вертикальної пластини (заштриховані трикутники). Тобто можна стверджувати, що при сильній взаємодії (другий сценарій, $K_{\text{int}} > 1,0$) довжина перешкоди суттєво впливає на значення коефіцієнтів відбиття.

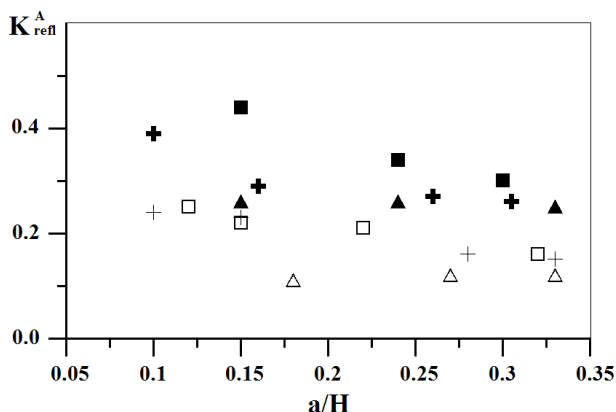


Рис. 4. Коефіцієнти відбиття по амплітуді в залежності від відносної амплітуди хвилі: ▲ – вертикальна пластина висотою $h = 9$ см; △ – вертикальна пластина висотою $h = 6$ см; ⊕ – підводний поріг висотою $h = 9$ см; + – підводний поріг висотою $h = 6$ см; ■ – висота уступу $h = 9$ см; □ – висота уступу $h = 6$ см

Оскільки вертикальна пластина тонка в порівнянні з прямокутним порогом і уступом, коефіцієнти відбиття мають менші значення (дані у вигляді трикутників). Відповідно, збільшення довжини перешкоди (поріг і уступ) призводить до збільшення коефіцієнтів відбиття (див. рис. 4). Коли довжина перешкоди значно більша за довжину хвилі (уступ) коефіцієнти відбиття мають більші значення, ніж для перешкод, довжина яких співрозмірна або менша довжини хвилі (поріг, тонка пластина). Відзначимо, що процес розпаду хвиль для вищезгаданих перешкод є подібним.

Відзначимо, що залежності коефіцієнтів відбиття по амплітуді і по енергії від висоти хвилі мають тільки кількісні відмінності.

Висновки

В роботі наведено результати експериментальних досліджень взаємодії поверхневих поодиноких хвиль з підводними перешкодами. Виявлено, що при поширенні хвилі над перешкодою відбувається деформація її профілю; хвилі змінюють свою форму, швидкість поширення, також змінюється їх амплітуда і довжина. В залежності від амплітуди хвилі, глибини потоку, висоти перешкоди і, відповідно, від введеного критерію взаємодії реалізуються два основних сценарії взаємодії хвиль з перешкодами. Перший сценарій характеризується помірною взаємодією хвилі з перешкодою. Відбита хвиля в цьому випадку або не спостерігається, або її інтенсивність мала в порівнянні з падаючою хвилею. За другим сценарі-

єм, який характеризується сильною взаємодією, відбувається розпадання хвилі над перешкодою на дві частини і формування бору. Показано, що зростання критерію взаємодії призводить до збільшення коефіцієнту відбиття, що, в свою чергу, характеризує енергію потоку, який проходить над перешкодою і діє на берегову смугу. Довжина перешкоди суттєво впливає на характер відбиття хвилі, що взаємодіє з перешкодою, тобто на величину коефіцієнтів відбиття і проходження.

Список використаних джерел

1. Lin P. A numerical study of solitary wave interaction with rectangular obstacles // Coastal Engineering. – 2004. – V. 51. – P. 35-51.
2. Ji L., Xi-Ping Y. Numerical study of solitary wave fission over an underwater step // Journal of Hydrodynamics. – 2008. – V. 20, N 3. – P. 398-402.
3. Nakoulima, N. Zahibo, E. Pelinovsky, Talipova T., Kurkin A. Solitary wave dynamics in shallow water over periodic topography // CHAOS. – 2005. – V. 15, 037107. – P. 1-8.
4. Chang K.-A., Hsu J., Liu P.L.-F. Vortex generation and evolution in water waves propagating over a submerged rectangular obstacle. Part 1. Solitary waves // Coastal Engineering. – 2001. – V. 44. – P. 13-36.
5. Lin C., Ho T.-C., Chang S.-C. et al. Vortex shedding induced by a solitary wave propagating over a submerged vertical plate // Intern. J. Heat and Fluid Flow. – 2005. – V. 26. – P. 894-904.
6. Gorodetskiy O. V., Kotelnikova A. S., Nikishov V. I. et al. Generation, propagation, and run-up of solitary waves on slopes // Applied Hydro-mechanics. – 2010. – V. 12. – P. 40-47. (in Russian).
7. Hammack J. L., Segur H. The Korteweg-de Vries equation and water waves. Part 2. Comparison with experiments // J. Fluid Mech. – 1974. – V. 65. – P. 289-314.
8. Koop C.G., Butler G. An investigation of internal solitary waves in a two-fluid system // J. Fluid Mech. – 1981. – V. 112. – P. 225-251.

Надійшла до редколегії 12.05.13