УДК 532.592

© 2012

А. С. Котельнікова, член-кореспондент НАН України **В. І. Нікішов, С. М. Срібнюк**

Взаємодія поверхневих поодиноких хвиль з підводними перешкодами

Представлено результати експериментальних досліджень процесу взаємодії поверхневих поодиноких хвиль з підводними перешкодами типу "поріг" і "вертикальна пластина". Показано, що довжина перешкоди істотно впливає на процес взаємодії хвилі з перешкодою. Виявлено, що залежно від амплітуди хвилі, глибини потоку і висоти перешкоди реалізуються два основні сценарії процесу взаємодії. Запропоновано критерій, залежно від величини якого реалізується перший або другий сценарій взаємодії хвиль з перешкодою.

Взаємодія хвиль цунамі з береговими схилами призводить до виникнення нелінійних поодиноких хвиль, які істотно впливають на стійкість берегів та гідротехнічних споруд. Основними причинами виникнення хвиль цунамі є підводні землетруси, виверження підводних вулканів, падіння крупних мас грунту з крутих схилів берега. В результаті дії цих факторів на поверхні рідини формується система довгих хвиль відносно малої амплітуди. З наближенням до берега під впливом прибережної топографії амплітуда і крутизна цих хвиль значно збільшується, що призводить до їх руйнування, і тоді вони рухаються до берегової лінії у вигляді ундулярного або турбулентного бору. Така форма хвилі є типовою для катастрофічних хвиль різної природи, в тому числі і цунамі. Створення штучних берм на морському дні та хвилеруйнівних молів істотно впливає на параметри хвильового процесу, зменшуючи руйнівну дію хвиль у прибережній зоні. Тому дослідження взаємодії нелінійних хвиль з різноманітними перешкодами має важливе значення в інженерній практиці при проектуванні підводних конструкцій для захисту берегів від ерозії та дисипації хвильової енергії.

Проблема поширення поодиноких хвиль над підводними перешкодами є об'єктом багатьох досліджень, виконаних як на основі чисельних розрахунків, так і експериментально. Загалом, увага приділяється моделюванню процесу трансформації хвилі над прямокутними порогами [1–5] залежно від амплітуди хвилі та геометричних параметрів перешкоди.

У роботі [1] задача розв'язувалася в рамках розширеної 1D Бусінеск-подібної системи та повністю нелінійних дисперсійних 2D рівнянь Нав'є–Стокса. Теоретична модель включала лінійний потенціальний опис хвильової трансформації на порозі та слабо нелінійну теорію довгих хвиль, основану на рівнянні Кортевега–де Фриза. Чисельні експерименти з дослідження процесу еволюції поодинокої хвилі, що поширюється над порогом, наведено в [2]. Результати показали, що хвилі над уступом розпадаються на декілька солітонів. Розпадання поодинокої хвилі над підводним порогом за допомогою методу кінцевої різниці досліджувалося в роботі [3]. Коефіцієнти хвильового відбиття, проходження та дисипації залежно від довжини і висоти перешкоди вивчалися в [4]. Проведено порівняння визначених коефіцієнтів з експериментальними даними і теоретичними результатами. Показано, що чисельні результати коефіцієнта проходження менші за теоретичні значення.

У даній роботі наводяться результати експериментальних досліджень процесу взаємодії поодиноких хвиль з підводними перешкодами типу "поріг" і "вертикальна пластина".

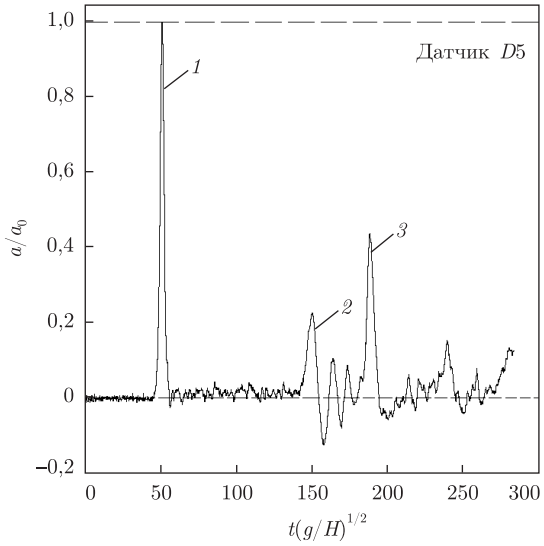

Рис. 1. Збурення вільної поверхні при поширенні поодинокої хвилі над вертикальною пластиною при глибині води у лотку $H = 11$ см: *1* — збурення вільної поверхні, викликане проходженням хвилі; *2* — хвиля, що відбилася від пластини; *3* — хвиля, що відбилася від торцевої стінки лотка

Експерименти проводились у хвильовому лотку довжиною 16, шириною 0,3 та висотою 0,7 м при глибинах води 8, 11, 17, 23 см і висоті перешкод 6 і 9 см. Генерація поодиноких хвиль відбувалася шляхом створення локального підйому рівня води, який виникав при падінні важкого тіла на дно лотка. Подальша еволюція збурення призводила до формування однієї поодинокої хвилі. Дисперсійний "хвіст", що виникав при генерації хвилі, відсікався за допомогою спеціального обладнання. Відзначимо, що ефективність такого відсікання знижується з ростом глибини, проте інтенсивність дисперсійного "хвоста" залишається малою. Докладний опис експериментальної установки подано в [6].

Реєстрація деформації вільної поверхні здійснювалася за допомогою шести ємкісних датчиків, частково занурених у воду. Сигнал від датчиків подавався на аналого-цифровий перетворювач, з'єднаний з ПК. Величина часового інтервалу між даними, що реєструвалися, становила 5 мс для кожного датчика. В процесі проведення експериментів датчики розташовувалися вздовж осі каналу. Взаємодія поодинокої хвилі з підводними перешкодами також реєструвалася за допомогою цифрової відеокамери.

Після генерації хвиля з амплітудою a поширюється вниз по потоку, і підйом рівня вільної поверхні, що виникає при проходженні хвилі, реєструється датчиками. На рис. 1 наведено запис даних, отриманих одним з датчиків протягом одного пробігу при поширенні поодинокої хвилі в лотку з вертикальною пластиною висотою $h = 9$ см при глибині води $H = 11$ см. Спочатку датчик записує збурення вільної поверхні, викликане проходженням хвилі (крива *1*). Видно, що дисперсійний "хвіст" практично відсутній. Потім датчик реєструє хвилю, що відбилася від вертикальної пластини (крива *2*), а далі — хвилю, яка відбилася від торцевої стінки лотка (крива *3*).

Поодинокі хвилі, що формувалися в експерименті, є типовими нелінійними хвилями. Теоретичний профіль цих хвиль описується рівнянням [7] $\eta = a\mathrm{sech}^2[(3a/4H^3)^{1/2}x]$, де a — амплітуда хвилі; H — незбурена глибина води.

Основна увага в дослідженнях приділялася сильній взаємодії хвиль з перешкодами. Виявлено, що залежно від амплітуди хвилі, глибини потоку і висоти перешкоди реалізуються

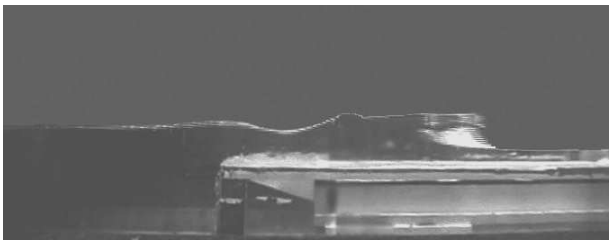

Рис. 2. Фотокадр взаємодії поодинокої хвилі з прямокутним уступом висотою 9 см при глибині води в лотку 11 см

два сценарії процесу взаємодії. Перший характеризується трансформацією хвилі і зміною її форми над перешкодою. Відбита хвиля в цьому випадку або не спостерігається, або її інтенсивність мала порівняно з падаючою хвилею. За другим сценарієм відбувається розпадання хвилі над перешкодою на дві частини. При цьому задня частина захоплюється поблизу перешкоди, формуючи відбиту хвилю, в той час як передня частина продовжує поширюватися вниз по потоку. При сильному зростанні нелінійних ефектів відбувається руйнування переднього фронту хвилі, і вона рухається далі у вигляді турбулентного бору.

Було запропоновано критерій, залежно від величини якого реалізується перший або другий сценарій взаємодії хвиль з перешкодою

$$K_{\text{int}} = \frac{a}{H-h},$$

де h — висота перешкоди. Коли величина цього параметра $K_{\text{int}} \succ K_{cr}$ ($K_{cr} = 1{,}0$) і довжина перешкоди більше за довжину хвилі, має місце руйнування хвилі.

На рис. 2 наведено фотографію взаємодії поодинокої хвилі з амплітудою $a = 0{,}3H$ з прямокутним порогом, довжина якого більше за довжину падаючої хвилі. В даному випадку висота порогу дорівнює 9 см, глибина води — 11 см. При переході з великої глибини H на мілку $(H - h)$ швидкість поширення довгої хвилі $c = \sqrt{gh}$ зменшується, і, відповідно, довжина хвилі зменшується. Енергія хвилі зосереджується на більш короткій ділянці, що збільшує висоту хвилі і її крутизну. В результаті утворюється бор. При заданій глибині води в лотку і висоті перешкоди хвиля, що пройшла, руйнувалася на відстані, яка має порядок довжини хвилі. Місце руйнування залежить також від амплітуди падаючої хвилі, при зменшенні висоти хвилі відстань, на якій відбувається руйнування, збільшується.

Процес взаємодії поодинокої хвилі з вертикальною пластиною при тих же умовах ($h = 9$ см, $H = 11$ см) має інший характер. При поширенні поодинокої хвилі над вертикальною пластиною взаємодія є також значною: можна бачити сильну деформацію вільної поверхні рідини за пластиною (рис. 3), яка спостерігається і при взаємодії хвилі з порогом (рис. 2). Як і при взаємодії з прямокутним порогом, падаюча хвиля розпадається на дві частини. Задня частина захвачується поблизу порогу, формуючи відбиту хвилю із супроводжуючим дисперсійним "хвостом", а передня проходить і поширюється вниз по потоку. Результати експериментальних даних показують, що вдалині від перешкоди хвиля, що пройшла, має профіль, подібний до профілю падаючої хвилі.

З рис. 2 і 3 видно, що збільшення довжини перешкоди (при одних і тих умовах) може призводити до втрати стійкості хвилі, що пройшла. Коли перешкода має велику довжину, процес ділення відбувається над перешкодою, і хвиля, що пройшла, руйнується і поширюється далі у вигляді бору.

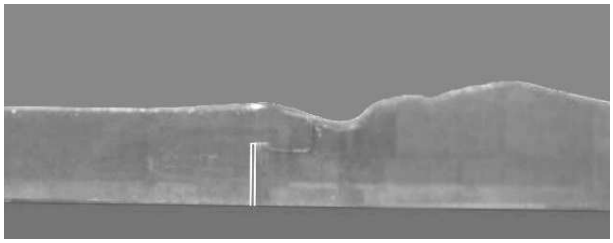

Рис. 3. Фотокадр взаємодії поодинокої хвилі з вертикальною пластиною висотою 9 см при глибині води в лотку 11 см

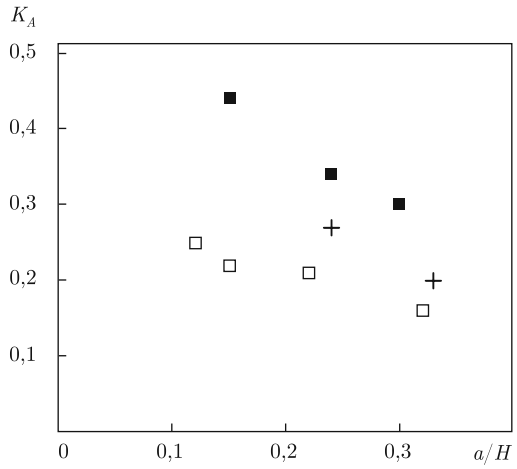

Рис. 4. Коефіцієнти відбиття за амплітудою залежно від відношення амплітуди хвилі до глибини води в лотку: ■ — висота уступу $h = 9$ см; □ — висота уступу $h = 6$ см; + — вертикальна пластина висотою $h = 9$ см

Характер взаємодії хвиль з перешкодою визначається коефіцієнтами відбиття за амплітудою та за енергією $K_a = a_r/a_i$, $K_E = E_r/E_i$ і відповідними коефіцієнтами проходження $K_a = a_{tr}/a_i$, $K_E = E_{tr}/E_i$, де a_r, a_{tr} і a_i — амплітуда відбитої хвилі, що пройшла, та падаючої хвилі відповідно; E_r — енергія відбитої хвилі; E_{tr} — енергія хвилі, що пройшла, та E_i — енергія падаючої хвилі. Коефіцієнти відбиття та проходження залежать від висоти перешкоди, глибини води, а також від крутизни падаючої хвилі та її довжини.

На рис. 4 наведено значення коефіцієнтів відбиття за амплітудою для підводного порогу у вигляді заштрихованих квадратів для висоти порогу $h = 9$ см, незаштрихованих квадратів — $h = 6$ см залежно від відношення амплітуди хвилі до глибини води в лотку. Глибина води становила 11 см. Для порівняння на рисунку подано також дані щодо коефіцієнтів відбиття для вертикальної пластини у вигляді хрестиків ($h = 9$ см, $H = 11$ см).

Як було показано вище, ступінь взаємодії поодинокої хвилі з порогом визначається коефіцієнтом взаємодії K_{int}. З рис. 4 видно, що збільшення висоти уступу h при одній і тій же глибині води призводить до збільшення величини цього коефіцієнта, тобто ступінь взаємодії збільшується, і, як наслідок, коефіцієнт відбиття зростає. Іншими словами, має місце значне відбиття енергії хвилі, і в цьому випадку ефективність захисної споруди у вигляді підводного порогу стає більшою.

Згідно з роботою [4], коефіцієнти відбиття і проходження залежать також від довжини перешкоди. Із збільшенням довжини перешкоди коефіцієнт відбиття зростає, незважаючи

на те, що процес розпаду хвиль є подібним. Коефіцієнт проходження при збільшенні довжини перешкоди зменшується за рахунок процесу руйнування хвилі. Дійсно, коефіцієнт відбиття за амплітудою для вертикальної пластини (див. рис. 4, дані у вигляді хрестиків) значно менший за відповідні значення цього коефіцієнта у випадку порогу (рис. 4, дані у вигляді заштрихованих квадратів). Очевидно також, що при збільшенні глибини води в лотку вплив перешкоди на поширення поодинокої хвилі зменшується, і, відповідно, коефіцієнти відбиття будуть зменшуватися.

Для визначення коефіцієнта відбиття за енергією необхідно проводити оцінку енергії поодиноких хвиль. Відомо, що для поодиноких хвиль відносно невеликої амплітуди величина кінетичної енергії близька до величини потенційної енергії, і для оцінки загальної енергії хвилі можна використовувати таку залежність [8]:

$$E = \rho g \int\limits_{-\infty}^{\infty} \eta^2 dx,$$

де ρ — густина рідини.

Дослідження показали, що залежності коефіцієнтів відбиття за амплітудою і за енергією від амплітуди хвилі мають тільки кількісні відмінності, оскільки величина енергії залежить як від амплітуди хвилі, так і від її швидкості та довжини. Відзначимо, що визначення коефіцієнтів проходження для випадку перешкоди у вигляді порогу є складним, оскільки хвиля, що пройшла, поширюється далі у вигляді бору.

Таким чином, у роботі наведено результати експериментальних досліджень взаємодії поверхневої поодинокої хвилі з затопленими перешкодами типу "поріг" і "вертикальна пластина". Виявлено, що при поширенні хвилі над підводною перешкодою відбувається деформація її профілю; хвилі змінюють свою форму, швидкість поширення, також змінюється їх амплітуда і довжина. Залежно від амплітуди хвилі, глибини потоку, висоти перешкоди і, відповідно, від введеного коефіцієнта взаємодії реалізуються два основних сценарії взаємодії хвиль з перешкодами. Перший характеризується помірною взаємодією хвилі з перешкодою. Відбита хвиля в цьому випадку або не спостерігається, або її інтенсивність мала порівняно з падаючою хвилею. За другим сценарієм, який характеризується сильною взаємодією, відбувається розпадання хвилі над перешкодою на дві частини і формування бору. Показано, що зростання коефіцієнта взаємодії призводить до збільшення коефіцієнта відбиття, що, в свою чергу, характеризує енергію потоку, який проходить над перешкодою і діє на берегову смугу. Довжина перешкоди істотно впливає на характер відбиття хвилі, що взаємодіє з перешкодою, тобто на величину коефіцієнтів відбиття і проходження.

1. *Pelinovsky E., Choi B. H., Talipova T. et al.* Solitary wave transformation on the underwater step: Asymptotic theory and numerical experiments // Appl. Math. and Computation. – 2010. – **217**. – P. 1704–1718.
2. *Liu P. L.-F., Cheng Y.* A numerical study of the evolution of a solitary wave over a shelf // Physics of Fluids. – 2001. – **13**, No 6. – P. 1660–1667.
3. *Ji L., Ping Y. X.* Numerical study of solitary wave fission over an underwater step // J. of Hydrodynamics. – 2008. – **20**(**3**). – P. 398–402.
4. *Lin P.* A numerical study of solitary wave interaction with rectangular obstacles // Coastal Engineering. – 2004. – **51**. – P. 35–51.
5. *Chang K.-A., Hsu T.-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. – **44**. – P. 13–36.
6. *Городецький О. В., Котельнікова А. С., Нікішов В. І. та ін.* Генерація, розповсюдження та накат відокремлених хвиль на берегові схили // Прикл. гідромеханіка. – 2010. – **12** (**84**), № 1. – С. 40–47.

7. *Hammack J. L., Segur H.* The Korteweg–de Vries equation and water waves. Part 2. Comparison with experiments // J. Fluid Mech. – 1974. – **65**. – P. 289–314.
8. *Li Y., Raichlen F.* Energy balance model for breaking solitary wave runup // J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. – 2003. – **47**. – P. 47–59.

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ *Надійшло до редакції 27.12.2011*

А. С. Котельникова, член-корреспондент НАН Украины **В. И. Никишов, С. М. Сребнюк**

Взаимодействие поверхностных одиночных волн с подводными препятствиями

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса взаимодействия поверхностных одиночных волн с подводными препятствиями типа "порог" и "вертикальная пластина". Показано, что длина препятствия существенно влияет на процесс взаимодействия волны с препятствием. Обнаружено, что в зависимости от амплитуды волны, глубины потока и высоты препятствия реализуются два основных сценария процесса взаимодействия. Предложен критерий, в зависимости от величины которого реализуется первый или второй сценарий взаимодействия волн с препятствием.

A. S. Kotelnikova, Corresponding Member of NAS of Ukraine **V. I. Nikishov, S. M. Srebnyuk**

On the interaction of surface solitary waves and underwater obstacles

The results of experimental study of the interaction of surface solitary waves with underwater obstacles of the "step" and "vertical plate" types are presented. It is shown that a change of obstacle's length considerably influences the interaction process. It is found that two scenarios of the interaction process are realized, by depending on the wave amplitude, water depth, and obstacle height. The criterion that determines the realization of the first of two scenarios is proposed.