

УДК 532

ГЕНЕРАЦІЯ, РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТА НАКАТ ВІДОКРЕМЛЕНИХ ХВИЛЬ НА БЕРЕГОВІ СХИЛИ

О. В. ГОРОДЕЦЬКИЙ*, А. С. КОТЕЛЬНИКОВА*, В. І. НІКІШОВ*,
В. В. ОЛЕКСЮК*, П. Ю. РОМАНЕНКО*, Л. В. СЕЛЕЗОВА*,
Г. П. СОКОЛОВСЬКИЙ*, С. М. СРІВНЮК**

* Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

** Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Полтава

Одержано 07.09.2009

Представлено результати експериментальних досліджень генерації, розповсюдження та наката поверхневих відокремлених хвиль на берегові схили, які мають різні кути нахилу до горизонту. Описана методика генерації відокремлених хвиль та процес реєстрації деформації вільної поверхні при розповсюдженні відокремленої хвилі вздовж лотка. Отримані основні характеристики хвиль та величини наката хвиль на берег. Проведено порівняння результатів з відомими аналітичними залежностями та експериментальними даними.

Представлены результаты экспериментальных исследований генерации, распространения и наката поверхностных уединенных волн на береговые склоны, установленные под разными углами к горизонту. Описана методика генерации уединенных волн и процесс регистрации деформации свободной поверхности при распространении уединенной волны вдоль лотка. Получены основные характеристики волн и величины наката волн на берег. Проведено сравнение результатов с известными аналитическими зависимостями и экспериментальными данными.

The results of experimental investigation of the generation, propagation and run-up of surface solitary waves on slopes are presented. Slopes of the different angles in respect to horizon have been considered. The methodology of the generation of solitary waves and recording method of deformation of free surface, when solitary propagated along the channel, are described. Main wave characteristics and values of run-up for series of slopes have been obtained. Results are compared with analytical relationships and experimental data.

ВСТУП

Відокремлені хвилі або комбінацію від'ємних та додатних хвиль, які є подібними до відокремлених, часто використовують для вивчення процесів наката та підйому води при цунамі [1, 2]. Зазвичай причиною виникнення цунамі є зміщення дна океану на великих площах під час сильних підводних землетрусів. В деяких випадках цунамі є наслідком різкого зсуву в горизонтальному напрямку великих та продовгуватих підводних схилів, великих підводних зсувів, падіння мас ґрунту з крутих схилів берега [3]. Океанські хвилі, які генеруються землетрусом, є довгими хвилями відносно малої амплітуди. Коли ці хвилі наближаються до берега, амплітуда хвиль істотно збільшується під впливом прибережної топографії, і вони можуть руйнуватись біля берегової лінії [3]. Взаємодія таких хвиль з береговими спорудами може призводити до катастрофічних наслідків. Тому виникає проблема визначення величин наката хвиль на берегові схили в залежності від топографії дна та параметрів хвиль. Процес взаємодії відокремлених хвиль, які характеризуються балансом ефектів дисперсії та нелінійності, з береговим схилом повністю подібний до взаємодії хвиль цунамі з берегом. Саме тому дані, отримані при проведенні чисельного або фізичного моделювань взаємодії

відокремлених хвиль із схилами, є дуже важливими.

Багато робіт присвячено дослідженню взаємодії відокремлених хвиль з вертикальною стінкою та береговими схилами, виконаних як на основі чисельних розрахунків, так і експериментально. Загалом, увага приділяється визначенню величин наката хвиль у залежності від їхньої амплітуди та кута нахилу берега.

Взаємодія поверхневих відокремлених хвиль з вертикальною стінкою розглянута в роботах [4, 5]. В [4] теоретично досліджено лобове зіткнення двох однакових відокремлених хвиль, що еквівалентно, при відсутності в'язкості, відбиттю відокремленої хвилі від вертикальної стінки. Аналітично встановлено, що амплітуда хвилі після відбиття зменшується. Також показано, що швидкоплинне затухання амплітуди, яке спостерігається в експерименті, пояснюється наявністю дисперсійного хвоста. В [5] розглянуто зіткнення відокремленої хвилі, що розповсюджується над горизонтальним дном, з вертикальною стінкою. Приведено результати для стадії руху, коли хвиля контактує зі стінкою. Показано, що час контактування хвилі зі стіною забезпечує визначення параметрів фазового зсуву при відбитті хвиль різної амплітуди.

Накат поверхневих відокремлених хвиль на бе-

регові схили досліджено в роботах [1, 2, 6–11], основну увагу в яких приділено вивченню взаємодії хвиль з похилими схилами. Математичне моделювання процесів, що розглядаються, проведено в роботах [1, 8, 10, 11]. В роботі [1] на основі нелінійних рівнянь мілкої води розвинено чисельну модель нахату відокремлених хвиль на берегові схили. Чисельна модель дозволяє завбачати накат хвиль із врахуванням процесів обвалення хвиль, дисипації енергії при обваленні хвиль, "тісляобвального" розповсюдження тощо. Результати обчислень відповідають даним експериментальних досліджень, які проведені авторами.

Емпіричний метод оцінки нахату відокремлених хвиль, що обвалюються, на похилій схил (ухил $1/15$) запропоновано в роботі [2]. Метод ґрунтується на законі збереження енергії хвилі; дисипація енергії оцінюється на основі чисельної моделі, розвиненої раніше. Накат відокремлених хвиль, які не обвалюються, на береговий схил розглянуто в роботі [7]. Розв'язок системи нелінійних рівнянь мілкої води, яка описує характеристики хвиль у прибережній зоні, отримано на основі застосування перетворення годографа. Показано, що максимальний накат є дещо більший, ніж було прийнято раніше.

В роботі [8] обчислено, використовуючи експериментально обґрунтовану модель нелінійної хвилі, характеристики відокремлених хвиль, що руйнуються, та хвиль на мілкій воді на схилах з ухилами від $1/100$ до $1/8$ ($1/100$, $1/35$, $1/15$, $1/8$). Характеристики хвиль визначено поблизу та вдалині від руйнуючої точки, розглянуто геометричну подібність припливів як функцію висоти хвилі та ухилу дна. Також виведено емпіричні вирази для коефіцієнта руйнування та швидкості хвилі при руйнуванні.

Роботу [9] присвячено експериментальному дослідженню нахату відокремлених хвиль на берегові схили (ухили берега $1/20$, $1/40$, $1/60$). Хвилі генерувались рухом вертикальної пластини вздовж лотка по лінійно-зростаючій траєкторії та траєкторії відокремленої хвилі, щоб моделювати різні хвильові висоти і спостерігати процес нахату. Експериментальні результати показали, що чим більш пологий схил, тим менший накат призводить до того самого цунамі.

Чисельному і експериментальному дослідженню нахату і відкочуванню відокремлених хвиль з берегового схилу присвячена робота [10]. Розглядалися хвилі, що руйнуються (ухил берега $1/20$), і хвилі, що не руйнуються (ухил берега $1/1.732$). В роботі [11] розвинено чисельну модель для вивчення нахату довгих хвиль і проведено порів-

няння результатів з аналітичними розв'язками та експериментальними даними. Моделювання нахату відокремлених хвиль на відносно круту площину (ухил більше $1/2.75$) показало добре узгодження поверхневих зміщень та висот нахату з експериментами. Також представлено дані для висот нахату в каналі, що звужується, і каналі, що розходиться. Показано, що для хвиль відносно великої амплітуди бор, який обвалюється, виникає при відкочуванні хвилі зі схилу.

Відомо, що для виникнення відокремленої хвилі достатньо створити підняття вільної поверхні в локалізованій області. В роботі [12], ґрунтуючись на експериментальних та теоретичних результатах, показано, що буде генеруватись щонайменше одна відокремлена хвиля, яка супроводжується цугом дисперсійних хвиль ("хвостом"), якщо в початковий момент часу певний об'єм води знаходиться над незбуреним рівнем води у хвильовому лотку. Для створення локального підняття вільної поверхні застосовують два основних методи. Генератори поршневого типу, в яких відбувається горизонтальний рух вертикальної пластини за заданим законом, відносяться до першого типу. Для зменшення інтенсивності "дисперсійного хвоста", який завжди виникає в процесах генерації відокремлених хвиль, швидкість руху пластини вибирається таким чином, щоб вона відповідала у кожній позиції в часі осередненій по вертикалі горизонтальній швидкості хвилі, яка генерується. Для розрахунків закону руху пластини в якості відокремленої хвилі для визначення осередненої швидкості хвилі можна розглядати різні залежності, що описують відокремлені хвилі. Докладно ці питання розглянуто в роботі [13], де автори використали КдВ рішення, рішення рівнянь мілкої води другого порядку та рішення Релея [14]. Такі генератори були застосовані, зокрема в роботах [2, 4, 10–12]. Треба відмітити, що технічна реалізація цього методу досить складна. В другому методі початкове локалізоване підняття вільної поверхні здійснюється за рахунок падіння важкого тіла від поверхні води на дно лотка [15]. В роботі [16] обвали схилів берегів та генерація хвиль моделювались за допомогою трикутного твердого тіла, що зісковзує зі схилу під кутом 45° . Недоліком цього методу генерування є наявність дисперсійного хвоста, який впливає на об'єктивність даних щодо коефіцієнтів відбиття, визначення яких при наявності "хвостів" дає значну помилку.

В даній роботі приводяться результати експериментальних досліджень процесів генерації, розповсюдження та нахату відокремлених хвиль на берегові схили, що мають кути нахилу до горизон-

ту 11° , 17° , 30° , 45° , 60° , 90° . Початкове локалізоване підняття рівня води відбувалось за рахунок падіння важкого тіла на дно лотка. І на відміну від інших робіт було застосовано спеціальне обладнання, за допомогою якого відсікався дисперсійний "хвіст". Ефективність такого відсікання падає з ростом глибини, але інтенсивність дисперсійного "хвоста" все одно залишається малою.

1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА

Експерименти проводились у хвильовому лотку довжиною 16 м, шириною 0.3 м та висотою 0.7 метрів. Бокові стінки лотка були зроблені зі скла.

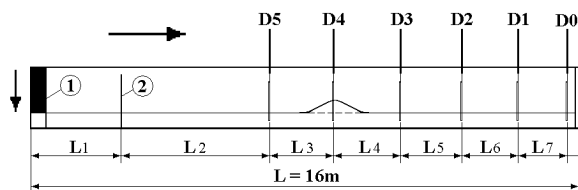


Рис. 1. Схема лабораторного каналу:

1 – генератор хвиль; 2 – обладнання для відсікання дисперсійного хвоста; L_1 – відстань від торця лотка до обладнання, що відсікає дисперсійний хвіст, L_2 – відстань від відсікача до датчика D_5 ; L_3, \dots, L_7 – відстані між датчиками у лотку; D_0, \dots, D_5 – ємносні датчики. Стрілка вказує напрям розповсюдження відокремленої хвилі

Початкове локалізоване підняття рівня води відбувалось за рахунок падіння важкого тіла, тобто генератора хвиль (позначено цифрою 1 на рис. 1), на дно лотка. Подальша еволюція збурення приводила до формування однієї відокремленої хвилі. На рис. 2 представлено загальний вигляд тіла генератора відокремлених хвиль (позначено цифрою 1 на рис. 2), яке має форму прямокутної призми ($0.23 \times 0.3 \times 0.75$ м). Рух тіла по вертикалі відбувається вздовж направляючих (цифра 3, 4 на рис. 2). До тіла жорстко прикріплені виносні циліндри (цифра 2 на рис. 2) з шайбами на активних торцях (цифра 5 на рис. 2). Направляючі, позначені на рис. 2 цифрою 4, роз'єднані з експериментальним лотком та мають обмежувач руху тіла (цифра 6 на рис. 2). Розміри шайб підібрано таким чином, що при падінні тіла-генератора нижні площини шайб дотикаються до обмежувачів, залишаючи між тілом генератора та дном лотка проміжок 5–7 мм.

На відміну від інших робіт (наприклад, [15]), у даній роботі було застосовано спеціальне обладнання (позначено цифрою 2 на рис. 1), за допомогою якого відсікався дисперсійний "хвіст". Було показано, що ефективність такого відсікання падає з

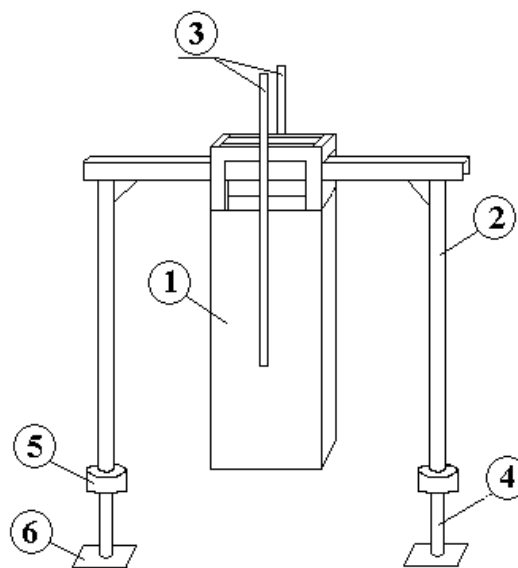


Рис. 2. Генератор відокремлених хвиль:

1 – тіло генератора; 2 – виносні циліндри; 3, 4 – направляючі; 5 – шайба; 6 – обмежувач

ростом глибини, проте інтенсивність дисперсійного "хвоста" залишається малою.

В торці лотка було встановлено моделі берегових схилів, що представляли собою металеву конструкцію, до якої прикріплювалась пластина з плексигласу товщиною 10 мм. Це забезпечило необхідну жорсткість конструкції. Реєстрація деформації вільної поверхні при проходженні відокремленої хвилі здійснювалась за допомогою шести ємносних датчиків (D_0 – D_5), які розміщувались вздовж вісі лотка (рис. 1). Сигнал від датчиків подавався на аналого-цифровий перетворювач, з'єднаний з персональним комп'ютером. Величина часового інтервалу між даними, що реєструвались, була 5 мс для кожного датчика. Отримані дані дозволяють обчислювати середню швидкість руху хвилі між датчиками, форму та енергію хвилі. Проходження відокремленої хвилі також реєструвалось цифровою відеокамерою, що дозволяло проводити порівняння результатів, отриманих за допомогою датчиків та при аналізі цифрових фотографій.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експерименти по дослідженню динамічних характеристик генератора проводились для таких глибин води у лотку: 8, 11, 17, 23 см. Реєстрація

деформації вільної поверхні здійснювалась за допомогою ємносних датчиків, частково занурених у воду. Перед проведенням експериментів виконувалось тарування датчиків безпосередньо в досліджуваному лотку. В процесі проведення експериментів датчики розташовувались вздовж вісі каналу, що дозволило визначити швидкість поширення хвилі, її амплітуду та форму профілю. На рис. 3 наведено типову форму відокремленої хвилі, яка була отримана на основі обробки даних експериментів.

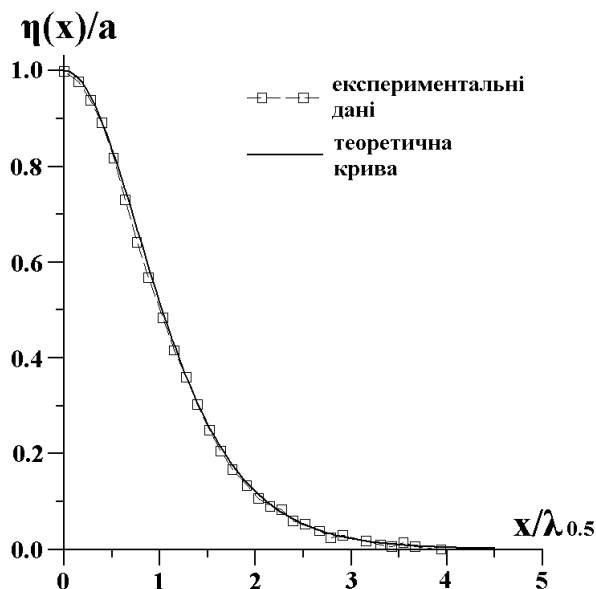


Рис. 3. Форма профілю відокремленої хвилі $\eta(x)/a$ по відношенню до $x/\lambda_{0.5}$: $\lambda_{0.5}$ – відстань від точки, що відповідає гребню хвилі, до точки, яка відповідає половині амплітуди [17]

На цьому самому рисунку суцільна крива відображає теоретичний профіль відокремленої хвилі (розв'язок рівняння Котевага-де Вріза) [12],

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

де a – амплітуда відокремленої хвилі; H – незбурена глибина води у лотку. Як можна бачити із рисунка, хвилі, що формуються в експерименті, є типовими нелінійними хвилями, солітонами.

Після генерації хвиля розповсюджується вниз по потоку і реєструється датчиками. На рис. 4 наведено запис даних, отриманих одним із датчиків ($D3$) на протязі одного пробігу при глибині води у лотку 11 см. Можна бачити, що спочатку датчик записує збурення вільної поверхні, викликане проходженням хвилі (цифра 1, рис. 4). Слід відмітити, що дисперсійний "хвіст" практично відсу-

тній, що підтверджує ефективність застосованого обладнання для відсікання "хвоста". Потім датчик реєструє хвилю, що відбилася від торцевої стінки лотка (цифра 2, рис. 4). Відбита хвиля рухається догори по потоку і знову відбивається вже від пластини, яка відсікає дисперсійний "хвіст", і розповсюджується вниз по потоку. Вона позначена цифрою 3 на рис. 4.

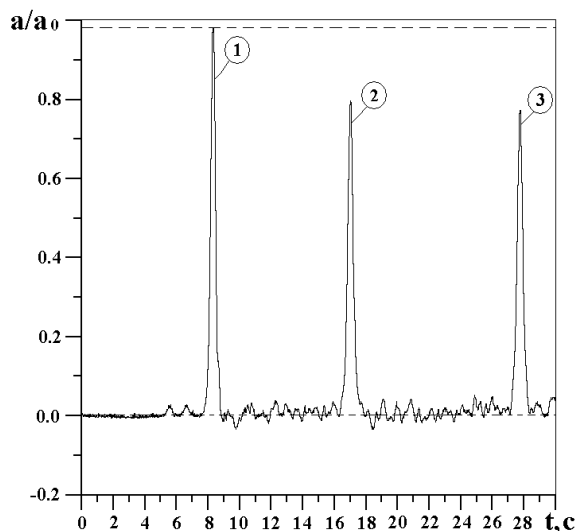


Рис. 4. Збурення вільної поверхні при розповсюдженні відокремленої хвилі при глибині води у лотку $H=11$ см (датчик $D3$, рис 1): 1 – збурення вільної поверхні, викликане проходженням хвилі; 2 – хвиля, що відбилася від торцевої стінки лотка; 3 – хвиля, що відбилася від пластини, яка відсікає дисперсійний хвіст

Однією з важливих характеристик відокремлених хвиль є енергія хвилі. Її затухання при розповсюдженні хвилі вздовж басейну необхідно враховувати при визначенні коефіцієнта відбиття. Крім того, швидкість затухання хвильової енергії є важливою характеристикою самого каналу. Оцінка величини втрат енергії хвилі, яка поширюється вздовж каналу, була зроблена на основі даних, отриманих датчиками, розташованими вздовж лотка на заданій відстані. На рис. 5 та 6 представлено дані затухання амплітуди хвилі для глибини води у лотку $H = 11$ см та $H = 17$ см відповідно.

Аналіз результатів затухання хвилі показав, що представлені дані описуються експоненціальною залежністю

$$\frac{a}{a_0} = \exp \left(\frac{-bx}{H} \right), \quad (2)$$

де b – постійна величина.

Аналіз результатів експериментальних даних

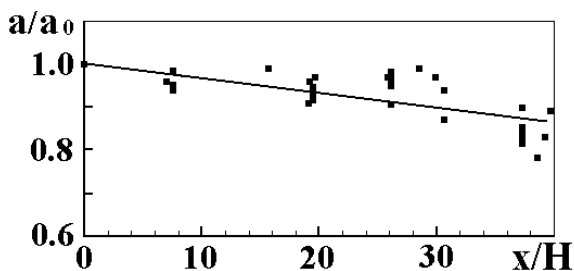


Рис. 5. Затухання амплітуди відокремленої хвилі при рівні води у лотку $H = 17$ см

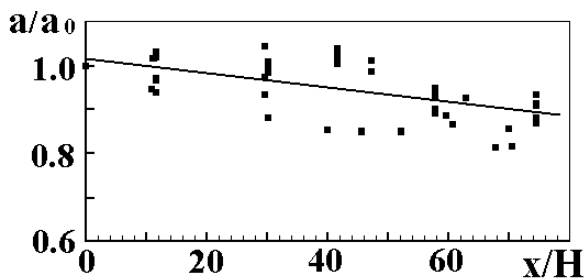


Рис. 6. Затухання амплітуди відокремленої хвилі при рівні води у лотку $H = 11$ см

показав, що затухання амплітуди відокремленої хвилі можна описати за допомогою співвідношення (2) з показником експоненти $b = 0.00362$ при глибині води у лотку $H = 17$ см та $b = 0.001737$ при $H = 11$ см (на рис. 5, 6 суцільна лінія відповідає виразу (2)). Отримані результати є важливими при вивченні процесів розповсюдження відокремлених хвиль та відбиття від берега.

3. МАКСИМАЛЬНА ВИСОТА НАКАТУ

Однією із важливих характеристик процесу взаємодії відокремленої хвилі із береговим схилом є величина нахату. Визначенню цієї величини присвячено багато робіт, в яких розглядаються як хвилі з обваленням, так і хвилі, що рухаються догори по схилу без обвалення [1, 2, 6–11, 18]. На рис. 7 представлена схема визначення величини нахату R відокремленої хвилі на схил.

Треба відзначити, що існують два режими взаємодії відокремлених хвиль зі схилом: без обвалення і з обваленням хвилі у процесі її руху вгору по схилу. Величини нахату будуть суттєво відрізнятися для цих режимів. Відомо, що існує декілька критеріїв, які визначають межу між цими режимами. Зупинимось на двох найбільш відомих. В роботі [6] на основі рівнянь мілкої води розглянуто лінійний випадок, коли в рівняннях залишено

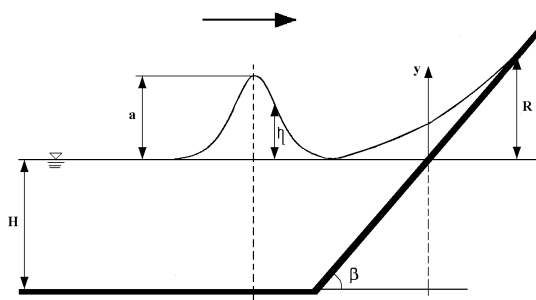


Рис. 7. Ескіз нахату відокремленої хвилі. R – висота нахату відокремленої хвилі на схил; H – глибина води у лотку; a – амплітуда хвилі; η – поточне збурення вільної поверхні; β – кут нахилу берегового схилу



Рис. 8. Висота нахату відокремленої хвилі на вертикальну стінку: + – результати проведених досліджень величини нахату на вертикальний берег; ▲ – результати експериментальних досліджень Кім і Ко [18]; суцільна лінія – теоретичні дані Чен і Стріт [18]

тільки перший порядок малості, а також нелінійну теорію на основі використання перетворення годографа. Була отримана залежність максимальної висоти нахату від параметрів відокремленої хвилі,

$$\frac{R}{H} = 2.831 (\text{ctg } \beta)^{1/2} \left(\frac{a}{H} \right)^{5/4}, \quad (3)$$

яка є такою ж самою як для лінійного режиму, так і для нелінійного. Автор також знайшов вираз, який описує межу між режимом нахату з обваленням і без обвалення хвилі:

$$\frac{a}{H} = 0.8183 (\text{ctg } \beta)^{-10/9}. \quad (4)$$

В роботі [8] у результаті обробки чисельних розрахунків методом граничних елементів потенційної задачі взаємодії відокремлених хвиль із похилим схилом було отримано наступну формулу, яка

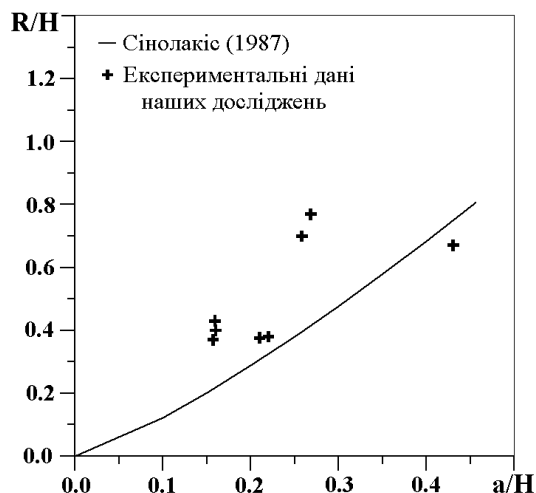


Рис. 9. Висота накату відокремленої хвилі на береговий схил з кутом нахилу 60° :

+ – результати проведених досліджень величини накату на береговий схил з кутом нахилу 60° ;
суцільна лінія – наближена нелінійна теорія Сінолакса [6]

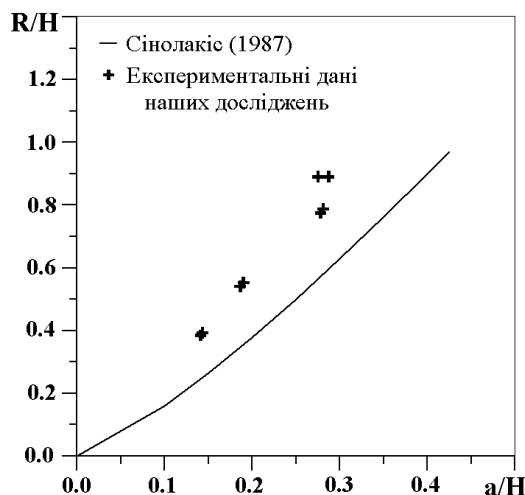


Рис. 10. Висота накату відокремленої хвилі на береговий схил з кутом нахилу 45° :

+ – результати проведених досліджень величини накату на береговий схил;
суцільна лінія – наближена нелінійна теорія Сінолакса [6]

описує межу між режимами:

$$\frac{a}{H} = 16.9 \operatorname{ctg}^{-2} \beta. \quad (5)$$

Аналіз показав, що залежність (4) призводить до менших значень, ніж залежність (5), для похилих схилів, тобто до переоцінки впливу укрупнення хвильового фронту під впливом ефекту зменшення глибини на схилі. Однак для помірних схилів формула (4) адекватно описує вказану межу.

В роботі [7] при застосовуванні наближеної не-

лінійної теорії отримано наступну залежність максимальної висоти накату:

$$\frac{R}{H} = \frac{R_s}{H} + \frac{R_{cr}}{H} = \frac{R_s}{H} \left(1 + \frac{R_{cr}}{R_s} \right), \quad (6)$$

$$\frac{R_{cr}}{H} = 0.293 (\operatorname{ctg} \beta)^{3/2} \left(\frac{a}{H} \right)^{9/4}, \quad (7)$$

$$\frac{R_{cr}}{R_s} = 0.104 \operatorname{ctg} \beta \frac{a}{H}, \quad (8)$$

де R_s/H – накат, що визначається згідно (3); R_{cr}/H – поправка до наближеної теорії, що основана на нелінійному підході, представленим в [7]. Таким чином, нелінійний накат відрізняється від лінійного накату додатковою складовою, яка є функцією початкової відносної висоти падаючої хвилі і берегового схилу.

Інтерес до вивчення процесу взаємодії відокремлених хвиль зі схилом у першу чергу пов'язаний з дослідженнями цунамі. Цим інтересом обумовлена більша увага, яка приділяється в експериментальних дослідженнях, до похилих схилів [1, 8–10], ніж до середніх та крутих. В роботі дослідження проводились, в основному, з середніми та крутими схилами, які в літературі висвітлені недостатньо повно. Величини кутів схилів були такі: 11° , 17° , 30° , 45° , 60° , 90° . На рис. 8 наведено результати проведених досліджень величини накату на вертикальний берег (позначені хрестом). На рисунку також приведено результати експериментальних досліджень, які позначено як трикутник [18]. Видно, що отримані експериментальні результати співпадають з теоретичною кривою і даними інших авторів.

Дані вимірювань величини накату на берегові схили для різних кутів нахилу представлено на рис. 9–13. Результати проведених досліджень величини накату позначено хрестом. На рис. 9–12 суцільна лінія відповідає наближеній нелінійній теорії [6]. На рис. 11 разом з експериментальними результатами, отриманими для кута 30° , наведено результати експериментальної роботи [7], в якій дані величини накату знайдені для кута 26° , що дещо відрізняється від нашого випадку. Можна бачити, тим не менш, що різниця невелика, і можна зробити висновок, що величина накату може бути описана залежністю Сінолакса [6] для помірних схилів. Аналогічний висновок можна зробити з аналізу отриманих у роботі даних про накат відокремленої хвилі на схил, що має кут 17° . Ці результати наведено на рис. 12. Тут також представлені результати експериментальних досліджень, отриманих для схилу, який має кут

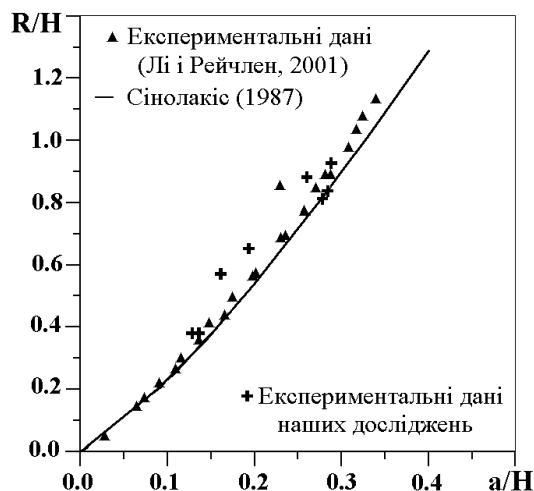


Рис. 11. Висота нахату відокремленої хвилі на береговий схил:
 + - результати проведених досліджень величини нахату на береговий схил з кутом нахилу 30°;
 ▲ - результати експериментальних досліджень для 26° [19];
 суцільна лінія - наближена нелінійна теорія Сінолакиса для кута нахилу 26° [6]

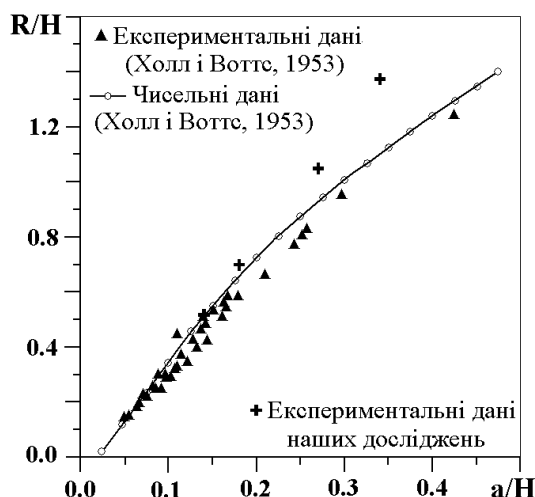


Рис. 13. Висота нахату відокремленої хвилі на береговий схил:
 + - результати проведених досліджень величини нахату на береговий схил з кутом нахилу 11°;
 ▲ - результати експериментальних досліджень для 10° Холла і Вотса [7];
 - o - - чисельні результати для 10° Холла і Вотса [7]

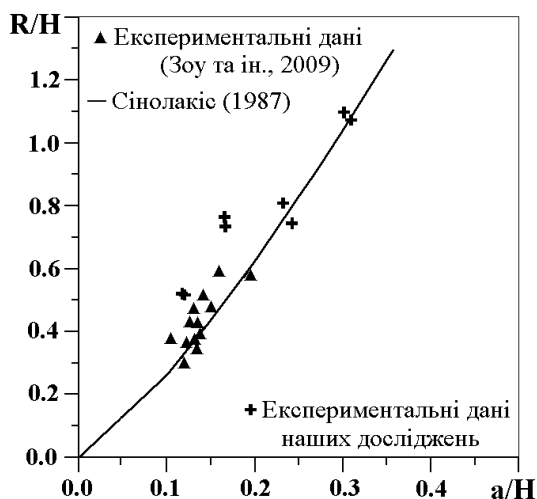


Рис. 12. Висота нахату відокремленої хвилі на береговий схил з кутом нахилу 17°:
 + - результати проведених досліджень величини нахату на береговий схил;
 ▲ - результати експериментальних досліджень для 20° [19];
 суцільна лінія - наближена нелінійна теорія Сінолакиса для кута нахилу 20° [6]

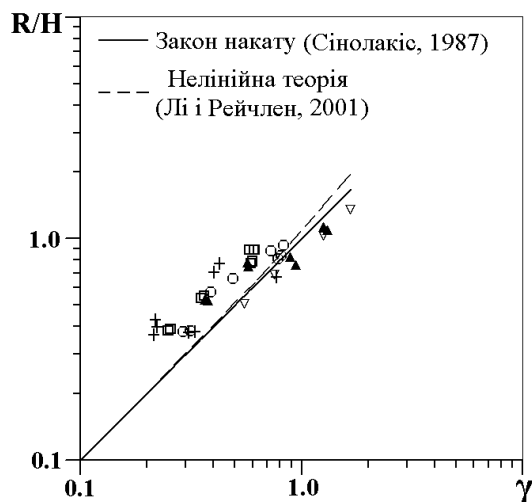


Рис. 14. Нормалізований нахат відокремлених хвиль на берегові схили з різними кутами нахилу по відношенню до нормалізованої висоти хвиль:
 + - 60°; □ - 45°; o - 30°; ▲ - 17°; ▽ - 11°;
 суцільна лінія - закон нахату Сінолакиса [6]; штрихова - нелінійна теорія Лі і Рейчлена [7];

$$\gamma = 2.831(\text{ctg } \beta)^{1/2}(a/H)^{5/4}$$

20° [19]. Результати експериментальних даних по визначенню величини нахату на береговий схил з кутом нахилу 11° представлено на рис. 13. Отримані дані порівняно з експериментальними дослідженнями та чисельними результатами, які отримані для кута 10° [7].

Аналіз даних підтверджує, що залежність, запропонована Сінолакисом [6] можна використовувати для опису величини нахату для помірних і крутих схилів.

Узагальнені дані по визначенню величини нахату для схилів, що досліджувались у роботі, представлено на рис. 14. Результати досліджень порів-

няно з законом нахату Сінолакиса [6] (суцільна лінія) та з теорією, запропонованою в [7] (штрихова лінія).

Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що висота нахату змінюється в залежності від відносної висоти хвилі та від кута нахилу берегового схилу, іншими словами, висота нахату відокремленої хвилі R/H збільшується при збільшенні відносної висоти хвилі і при зменшенні кута нахилу берегового схилу. Величини максимальних накатів, отриманих у ході експериментальних досліджень, є дещо більшими, ніж при визначенні величини нахату за залежностями (3) та (6). Треба відзначити, що введена в роботі [7] поправка для розрахунків нахату, є вагомою для похилих схилів; для помірних та крутих схилів достатньо використовувати формулу Сінолакиса [6].

ВИСНОВКИ

В даній статті експериментально досліджено генерацію, розповсюдження та накат поверхневих відокремлених хвиль на берегові схили, в тому числі на вертикальну стінку. Отримані основні характеристики хвиль, що розповсюджуються в лотку, та величини нахату хвиль на берег.

Як впливає із приведених результатів, модифікований метод генерації відокремлених хвиль (солітонів), який застосовано в дослідженнях, дозволяє генерувати солітони з малою інтенсивністю дисперсійного "хвоста". Це дає можливість отримати об'єктивні дані, наприклад, щодо коефіцієнтів відбиття, визначення яких при наявності "хвостів" дає значну помилку. Розроблена експериментальна установка дозволяє отримувати об'єктивні дані про процеси розповсюдження та взаємодії відокремлених хвиль з топографічними перешкодами та береговими схилами. Показано, що відокремлені хвилі описуються рівнянням Кортевега-де Вриза, профіль хвилі співпадає з класичним профілем, що описується законом "sech²". Результати досліджень висоти нахату хвилі на берегові схили відповідають відомим теоретичним та експериментальним даним. Показано, що величина нахату відокремлених хвиль на помірні та круті схили добре описується формулою Сінолакиса [6].

1. *Ying Li, Fredric Raichlen* Non-breaking and breaking solitary wave run-up // *J. Fluid Mech.*– **456**.– 2002.– P. 295–318.

2. *Ying Li, Fredric Raichlen* Energy balance model for breaking solitary wave runup // *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.*– **47**.– 2003.– P. 47–59.

3. *Пелиновский Е. Н.* Гидродинамика волн цунами.– ИИФ РАН: Нижний Новгород, 1996.– 276 с.

4. *J. G. B. Byatt-Smith* The reflection of a solitary wave by a vertical wall // *J. Fluid Mech.*– **197**.– 1988.– P. 503–521.

5. *M. J. Cooker, P. D. Weidman and D. S. Bale* Reflection of a high-amplitude solitary wave at a vertical wall // *J. Fluid Mech.*– **342**.– 1997.– P. 141–158.

6. *Synolakis C. E.* The run-up of solitary waves // *J. Fluid Mech.*– **185**.– 1987.– P. 523–545.

7. *Ying Li, Fredric Raichlen* Solitary wave runup on plane slopes // *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.*– **127**, N 1.– 2001.– P. 33–44.

8. *Grilli S. T., Svendsen I. A., Subramanya R.* Breaking criterion and characteristics for solitary waves on slopes // *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.*– **123**, N 3.– 1997.– P. 102–112.

9. *Yu-Hsuan Chang, Hwung-Hweng Hwung* Experiments on the run-up of solitary waves over sloping bottoms // Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering National Cheng Kung University.– Tainan.– November 2006.– P. 359–372.

10. *Pengzhi Lin, Kuang-An Chang and Philip L.-F. Liu* Runup and rundown of solitary waves on sloping beaches // *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.*– **125**, N 5.– 1999.– P. 247–255.

11. *G. Pedersen and B. Gjevic* Run-up of solitary waves // *J. Fluid Mech.*– **135**.– 1983.– P. 283–299.

12. *Hammack J. L., Segur H.* The Korteweg-de Vries equation and water waves. Part 2. Comparison with experiments // *J. Fluid Mech.*– **65**.– 1974.– P. 289–314.

13. *Katell G., Eric B.* Accuracy of solitary wave generation by piston wavemaker // *J. Hydraulic Research.*– **40**, N 3.– 2002.– P. 321–331.

14. *Ламб Г.* Гидродинамика.– М.-Л.: ОГИЗ, 1947.– 928 с.

15. *Monaghan J. J., Kos A.* Scott Russel's wave generator // *Physics of Fluids.*– **12**, N 3.– 2000.– P. 622–630.

16. *P. Heinrich* Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides // *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.*– **118**, N 3.– 1992.– P. 249–266.

17. *Koop C. G., Butler G.* An investigation of the internal solitary waves in a two-fluid system // *J. Fluid Mech.*– **112**.– 1981.– P. 225–251.

18. *Nam Hyeong Kim and Haeng Sik Ko* Numerical simulation on solitary wave propagation and run-up by SPH method // *KSCE J. of Civil Engineering.*– **12**, N 4.– 2008.– P. 221–226.

19. *H. Zhou, M. H. Teng, K. Feng* On the zhang-wu run-up model // Proc. Confer. "Advances in Engineering Mechanics – Reflections and Outlooks".– In Honor of T. Y. - T. Wu, Vancouver, BC, Canada, 21–22 June 2004, Word Scientific Publishing.– 2009.– P. 257–264.