

Механіка

УДК 532.593.5

DOI: 10.31471/2304-7399-2022-17(64)-118-132

ВЗАЄМОДІЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ПООДИНОКОЇ ХВИЛІ ІЗ ЗАНУРЕНИМ ТА НАПІВЗАНУРЕНИМ ХВИЛЕГАСНИКАМИ

І. М. Горбань¹, А. С. Корольова¹, О. Г. Лебідь²

¹Інститут гідромеханіки НАН України;

вул. Марії Капніст, 8/4, м. Київ;

e-mail: ivgorban@gmail.com, kan5nas@gmail.com;

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України; Чоколівський бульвар, 13, м. Київ;

e-mail: o.g.lebid@gmail.com

Експериментально досліджена взаємодія поверхневої солітонної хвилі з напівзануреною висячою стінкою та підводним бар'єром. В експериментах змінювалися амплітуда падаючої хвилі, осадка напівзануреної стінки та висота підводного бар'єру. Ці дослідження були спрямовані на визначення найбільш ефективних конфігурацій берегозахисних споруд з точки зору коефіцієнтів відбиття та проходження хвилі. Отримано, що при набіганні солітонної хвилі на навісну стінку відбитий солітон утворюється з нахату падаючої хвилі на споруду, а прохідний солітон формується після проходження рідини крізь зазор між дном і низом стінки. Характер взаємодії солітонної хвилі із зануреним бар'єром залежить від відношення амплітуди падаючої хвилі до товщини стовпа води над перешкодою. Коли значення цього параметру менше за критичне, що становить приблизно 1, падаюча хвиля м'яко поділяється на відбитий і прохідний солітони. Інакше, переміщення хвилі супроводжується інтенсивними хаотичними коливаннями вільної поверхні в околі споруди. Отримані з експериментів оцінки коефіцієнтів відбиття та проходження хвилі показують, що тонкі вертикальні бар'єри є достатньо ефективними в якості хвилегасників, а цільовий захист берегу може бути досягнутий за рахунок найкращого вибору осадки непроникної частини навісної стінки або висоти зануреної перешкоди. Виявлено, що навісна стінка, яка виступає за поверхню води, більш ефективно гасить енергію солітонних хвиль, ніж встановлений на дно підводний бар'єр. Вона може розсіювати до 60% енергії падаючої хвилі, тоді як повністю занурена споруда – до 20%.

Ключові слова: соліт онна хвиля, напівзанурена навісна стінка, підводний вертикальний бар'єр, коефіцієнт і відбиття та проходження, лабораторний експеримент.

1. Вступ

Прибережні території відіграють важливу роль для кожної країни у транспортному сполученні, а також в сільськогосподарській, промисловій та рекреаційній діяльності. Разом з тим, безпечне функціонування прибережної інфраструктури потребує її захисту від руйнівної енергії поверхневих хвиль та течій. Одним з дієвих засобів запобігання небезпечним процесам в береговій зоні водойм, є встановлення штучних берегозахисних споруд. Коли хвилі взаємодіють з такими конструкціями, вони трансформуються, скручуються, повністю або частково руйнуються.

Застосування традиційних берегозахисних систем (гребель, молів, хвилеломів) є не завжди доцільним та економічно обґрунтованим. Більш того, такі заходи можуть змінювати регіональні і локальні гідродинамічні та морфодинамічні характеристики і, тим самим, призводити до негативних наслідків в екосистемі.

При розробці нових підходів до вирішення проблеми берегозахисту, разом з ефективністю конструкції проти хвиль, повинні враховуватися перенос домішків і циркуляційні процеси в береговій зоні водойм, інтенсивність водообміну між узбережжям та відкритою акваторією, а також мінімізація фінансових витрат на будівництво і подальше обслуговування берегозахисних споруд. З цієї точки зору, перспективними є затоплені та напівзатоплені хвилеломи у вигляді тонких жорстких вертикальних бар'єрів. Такі перешкоди, хоча й не закривають береги від морських хвиль повністю, але істотно зменшують небезпеку розмивів та руйнувань. Крім того, вони сприяють інтенсифікації водообмінних процесів та підтриманню прибережного ландшафту для рекреаційних цілей [1].

Важливість проблеми зумовила проведення теоретичних і експериментальних досліджень щодо взаємодії поверхневих хвиль з перешкодами бар'єрного типу. В більшості з них розглядалися поодинокі довгі хвилі (солітони), які в океанах та морях розвиваються як цунамі, а в річках і каналах генеруються плавучими транспортними засобами, що рухаються в транскритичному режимі. Переважно, увага приділялася вивченню трансформацій таких хвиль над прямокутними порогами при різних параметрах хвилі і перешкоди [2–6].

Проходження поодинокі хвилі над зануреною вертикальною пластиною розглянуте в роботах [1, 7–11]. В [7], зокрема, показано, що збільшення висоти перешкоди приводить до зменшення відносної величини нахилу – вертикальної відстані між рівнем вільної поверхні води у стані спокою і відхиленням вільної поверхні при взаємодії хвилі з

береговим схилом. Виявлено, що два бар'єри, встановлені на заданій відстані, є більш ефективними щодо зменшення нахату хвиль цунамі, ніж одинарна споруда такого ж самого розміру. Отримана залежність величини нахату від відстані між бар'єрами в цій системі.

В роботі [1] ефекти хвильової гідродинаміки досліджені експериментально та чисельно на прикладі взаємодії солітонної хвилі із зануреною двохбар'єрною конфігурацією. Експерименти виконувались з метою отримання даних для верифікації чисельної моделі, побудованої на основі методу кінцевих об'ємів (VOF-типу). Останній ґрунтується на двовимірних рівняннях Рейнольдса, доповнених нелінійною $(k - \epsilon)$ -моделлю турбулентності для замикання. Отримано, що оптимальна відстань між бар'єрами відповідає випадку, коли висота прохідної хвилі, що утворена після другого бар'єру, досягає мінімального значення.

У чисельному моделюванні поширення поодинокі хвилі над зануреною вертикальною перешкодою, результати якого представлені в роботі [8], застосована двофазна модель в'язкої рідини. Це дозволило описати поле завихреності, яке генерується вільною поверхнею, а також процес проникнення повітряної фази в товщу води. Досліджені характеристики поширення солітонної хвилі при різних геометричних параметрах зануреної перешкоди. Отримано, зокрема, що ширина перешкоди мало впливає на коефіцієнти відбиття та проходження хвилі, в той час, як високі конструкції забезпечують значно ефективніший захист берегів від хвиль.

Результати фізичного експерименту, націленого на виявлення картини циркуляційної течії, викликані поширенням поверхневої поодинокі хвилі над затопленою вертикальною пластиною, наведені в [9]. На основі кількісних вимірювань швидкості методом лазерної анемометрії (PIV) та якісної візуалізації течії за допомогою мічених частинок, автори деталізували розвиток вихрового поля при взаємодії солітону із зануреною вертикальною пластиною чотирма фазами, що включає: формування зсувного шару на тильній стороні вертикальної пластини; генерацію вихорів великого масштабу та їх відрив; утворення вертикального струменя в товщі води; удар струменя об вільну поверхню.

В роботі [10] PIV-вимірювання поля швидкості та візуалізація течії застосовані для порівняння циркуляційних процесів, які генеруються солітонною хвилею над широкою прямокутною спорудою і вертикальною пластиною. Отримано, що вихрове поле, а також генерація струменевих течій за прямокутником і пластиною суттєво різняться. Зокрема, профіль вертикального струменя у випадку прямокутника є набагато крутішим, а нерівномірність горизонтальної швидкості вздовж області, що розглядається, більш виражена за тонкою пластиною.

Результати експериментальних і чисельних досліджень гідродинамічної течії, викликані солітонною хвилею над зануреними вертикальними пластинами, які відрізняються формою вершини, представ-

лені в роботі [11]. Отримано, що головна відмінність потоку за рівної та нахиленої вершинах пластини полягає в інтенсивності вторинного вихору, який утворюється в результаті дії висхідного струменю і обертається проти напрямку поширення хвилі.

На відміну від підводних перешкод, дослідження взаємодії поверхневих поодиноких хвиль з частково зануреними хвилеломами менше представлені в науковій літературі. В роботі [12] виконаний ряд лабораторних експериментів із різними співвідношеннями висоти падаючої хвилі до глибини води та відносної осадки бар'єру, де для вимірювання швидкості в околі бар'єру застосований метод лазерної анемометрії. Отримані результати використовувалися для верифікації чисельного методу, побудованого на основі двовимірних рівнянь Рейнольдса (RANS), доповнених $(k - \epsilon)$ -моделлю турбулентності. Чисельне моделювання, виконане в широкому діапазоні параметрів задачі, дозволило отримати наближені формули для максимальної висоти нахату хвилі та найбільшого хвильового навантаження на перешкоду.

В роботі [13] характеристики відбиття та проходження нелінійних солітонних хвиль різної амплітуди при їх взаємодії із частково зануреним хвилеломом екранного типу отримані чисельно методом згладжених гідродинамічних частинок (SPH). Розрахунки, виконані при різних зануреннях навісної стінки, показали, що такий хвилелом є ефективним в розсіюванні енергії падаючої хвилі, якщо глибина його занурення перевищує половину глибини води. Аналогічні дослідження проведені в роботі [14], де зроблена оцінка параметрів прохідної хвилі при різній глибині осадки екрану. Показано, зокрема, що даний метод недооцінює коефіцієнт проходження, особливо, для малих глибин занурення хвилелому.

В цій статті представлені результати фізичного моделювання взаємодії поверхневої поодинокі хвилі із повністю зануреною (підводною) та напівзануреною тонкими вертикальними перешкодами задля виявлення найбільш ефективної конструкції хвилегасника з точки зору зменшення енергії падаючої хвилі.

2. Методика досліджень

Експерименти виконувалися у хвильовому лотку Інституту гідромеханіки НАН України, який має довжину 16м, ширину 0.3м і висоту 0.7м. Для утворення хвилі в експериментальній установці використовувався генератор Рассела [15], який передбачає створення локального підйому рівня води падінням важкого тіла на дно лотка. Подальша еволюція збурення приводила до формування поодинокі хвилі. Реєстрація деформацій вільної поверхні при проходженні хвилі здійснювалась за допомогою емнісних датчиків. Датчики, встановлені до перешкоди, реєстрували падаючу та відбиту хвилі, за перешкодою реєструвалась хвиля, що пройшла. Взаємодія поодинокі хвилі з бар'єрами фіксувалась

також за допомогою цифрової відеокамери. Це давало можливість порівнювати покази датчиків з результатами, отриманими з аналізу цифрових фотографій. Детальний опис експериментальної установки представлений авторами в роботі [16].

Обробка експериментальних даних щодо хвилі, яка утворюється на початку експерименту падінням важкого тіла у воду, виявила, що її форма є близькою до теоретичного профілю солітонної хвилі, який описується розв'язком рівняння Котевега-де Вріза [17] в мілкій воді:

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

де a – амплітуда хвилі, H – незбурена глибина води в лотку.

Слід відмітити, що солітон є довгою дисперсною хвилею з однозначним співвідношенням між амплітудою та крутизною. В каналах з рівним дном такі хвилі поширюються з постійною швидкістю і без зміни форми. Але, при цьому, має місце незначне зменшення амплітуди хвилі через тертя рідини об стінки і дно каналу. Цю природню дисипацію енергії необхідно враховувати при визначенні коефіцієнтів відбиття і проходження хвилі, коли вона взаємодіє з різними типами перешкод. Зазначимо, що швидкість затухання хвильової енергії є важливою характеристикою експериментального каналу. Згідно з емпіричними висновками Келігана (1948) [18], затухання амплітуди поодинокі хвилі, яка поширюється в каналі постійної глибини, можна описати наступною залежністю:

$$\left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{a_0}{H}\right)^{\frac{1}{4}} + \frac{1}{12} \left(1 + \frac{2H}{B}\right) \sqrt{\frac{v}{g^2 H^2}} \cdot \frac{x}{H} \quad (2)$$

або законом затухання Мей (1983) [18], який був отриманий при повторній обробці результатів Келігана методом збурень:

$$a^{1/4} = a_0^{1/4} + 0.08356 \sqrt{\frac{v}{g^2 H^2}} \cdot \frac{x}{H}, \quad (3)$$

де a_0 – початкова амплітуда хвилі, v – кінематична в'язкість рідини, H – глибина води в каналі, x – відстань, на яку поширилася хвиля, B – ширина каналу.

В експериментах, що представлені в цій роботі, оцінка втрат енергії хвилі в каналі з горизонтальним дном визначалася на основі показів датчиків, розташованих вздовж каналу, які фіксували глибину води в заданих положеннях. Для прикладу на рис. 1 показано отриману в фізичному моделюванні еволюцію по часові солітонної хвилі з відносною амплітудою $a/H \approx 0.35$, коли глибина води в каналі підтримувалась на рівні 13 см.

Рис. 2 ілюструє оцінки затухання амплітуди цієї хвилі при її переміщенні вздовж каналу та їхнє порівняння з результатами, що обчислені за формулами (1) і (2). Суцільна крива на рис. 2 відповідає регресійній

залежності $a/a_0 = e^{bx/H}$, де $b = 0.003746$, яка побудована за експериментальними даними. Зазначимо, що зі зміною глибини води в каналі величина b також змінюється. Аналогічні залежності, що описують згасання амплітуди та енергію хвилі, знайдені також для інших глибин. На рис. 2 видно, що в експерименті згасання хвилі є трохи вищим, ніж це визначається аналітичними залежностями (2) і (3) (позначено трикутниками/квадратами). При цьому, основна тенденція зберігається.

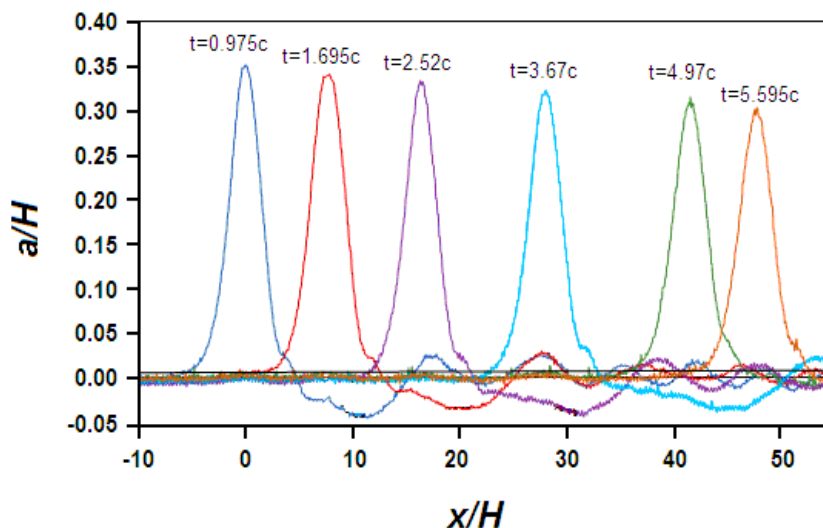


Рис. 1. Експериментальні профілі поодинокі хвилі в лабораторному каналі з горизонтальним дном

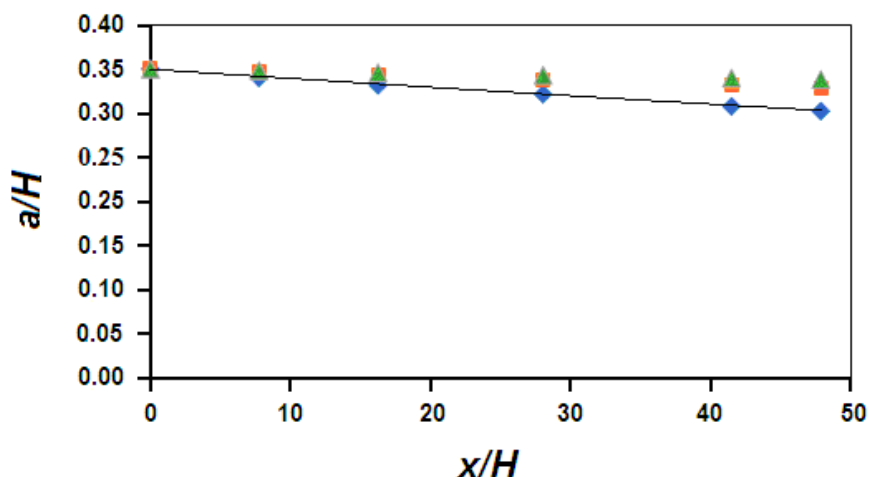


Рис. 2. Згасання амплітуди поодинокі хвилі, що поширюється в каналі з горизонтальним дном при глибині води $H = 13$ см: \blacklozenge – дані експериментальних досліджень, \blacksquare , \blacktriangle – результати, отримані за аналітичними залежностями Келігана (1948) та Мей (1983) відповідно [18]

3. Трансформації вільної поверхні

Далі будуть представлені результати досліджень динаміки солітонної хвилі в лабораторному каналі, поперек якого встановлена перешкода у вигляді висячої стінки чи пластини, зафіксованої на дні. У першому випадку верх перешкоди виступає за поверхню води, а між її низом і дном є зазор (напівзанурена стінка). В іншому разі пластина розташована нижче вільної поверхні, і така перешкода має вигляд повністю зануреного бар'єру. Ширина цих споруд складала 1 см, а довжина у поперечному напрямку дорівнювала ширині каналу, що нівелювало вплив торцевих явищ.

Експерименти для напівзануреної навісної стінки виконувалися для різних величин її осадки z , де z – відстань від вільної поверхні в стані спокою до нижньої частини перешкоди (рис. 3). В цьому разі, маємо справу зі спорудою, яка є непроникною поблизу вільної поверхні, в той же час, знизу рідина перетікає безперешкодно. Як показано в роботі [19], така конструкція хвилелому сприяє зменшенню динамічних навантажень на саму споруду.

Аналіз відеоматеріалу, отриманого в експерименті, показав наступну картину взаємодії поодинокій хвилі з навісною вертикальною стінкою (див. рис. 3). Підійшовши до перешкоди, падаюча хвиля вгорі накочується на стінку, а знизу проходить крізь зазор між спорудою і донною поверхнею. Після того, як накат хвилі досягає максимуму, вона скочується, утворюючи відбиту хвилю, яка потім переміщується у протилежному напрямку. З рідини, що перетекла знизу, формується прохідна хвиля.

Як показав експеримент, визначальну роль у взаємодії поодинокій хвилі із напівзануреною стінкою грає величина осадки, або глибина занурення стінки z . На рис. 4 представлено записи рівня вільної поверхні, зроблені датчиками $D1, D2$ у двох випадках: коли нижня частина перешкоди знаходиться на одному рівні з поверхнею води (рис. 4а) і коли перешкода занурена на 5 см під воду (рис. 4б). Зазначимо, що глибина води H в цьому експерименті складала 14 см, а датчики було розташовано на відстанях $\approx 7H$ і $\approx 5H$ від перешкоди відповідно. Результати представлено в безрозмірному вигляді: амплітуду хвилі a віднесено до глибини води H , а безрозмірний час вводиться як $\bar{t} = t\sqrt{gH}/H = t\sqrt{g/H}$.

На рис. 4а видно, що при взаємодії падаючої хвилі (позначена цифрою 1) з навісною вертикальною стінкою, яка розташована в один рівень з вільною поверхнею (при $z = 0$), основна маса рідини проходить повз споруду знизу, і відбитої хвилі або не спостерігається, або її інтенсивність дуже мала у порівнянні з падаючою хвилею. Тут можна бачити прохідну хвилю (позначена цифрою 3) і хвилю, відбиту від торцевої стінки лотка (позначена цифрою 4). По мірі збільшення осадки вертикальної стінки (рис. 4б), взаємодія хвилі з перешкодою посилю-

ється, як результат, зростає інтенсивність відбитої хвилі (позначена цифрою 2), а енергія хвилі, що пройшла, відповідно, падає. Очевидно, що зі збільшенням осадки вертикального екрану, зменшується накат води також і на торцеву стінку лотка. Тому падає інтенсивність хвилі, яка відбивається від торцевої стінки експериментального каналу. З наведених результатів випливає, що ефективність даної захисної споруди проти хвиль зростає при збільшенні заглиблення вертикальної стінки.

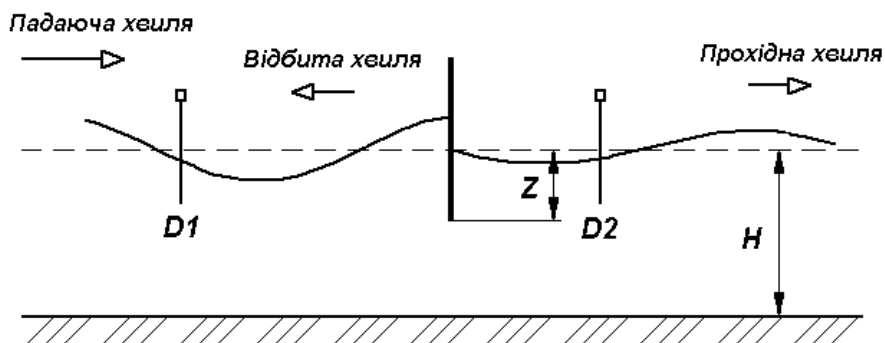
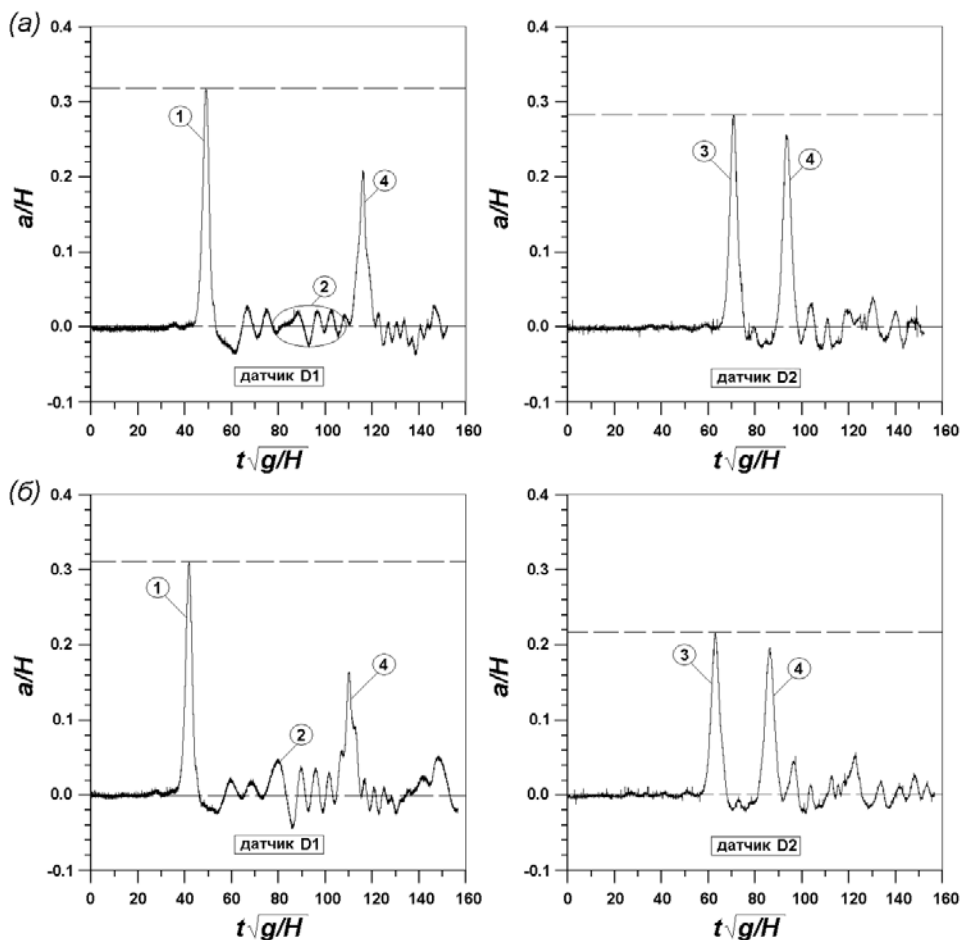


Рис. 3. Ескіз напівзануреного вертикального бар'єру та схема течії при проходженні над ним поодинокі хвилі: z – величина осадки перешкоди; H – глибина води в каналі; $D1, D2$ – ємнісні датчики. Пунктирною лінією позначений рівень вільної поверхні води у стані спокою

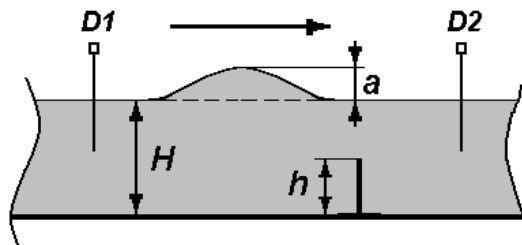
Дослідження взаємодії поодинокі хвилі із повністю зануреною вертикальною стінкою виявили, що вона має інший характер, ніж в попередньому випадку. Схема цього експерименту і характерні величини показані на рис. 5. Оскільки дослідження були спрямовані на виявлення загальних закономірностей взаємодії солітонної хвилі з тонкою підводною пластиною, то в різних експериментах варіювалися глибина води в лотку H , висота пластини h , а також амплітуда падаючої хвилі a . Розглядалися значення $H = 8\text{см}, 11\text{см}$ і 17см ; $h = 6\text{см}$ і 9см ; $a = (0.1 \div 0.35)H$.

Аналіз профілів вільної поверхні, які були отримані протягом цих експериментів, дозволив встановити, що еволюція солітонної хвилі при проходженні над тонкою зануреною пластиною (бар'єром) залежить від значення складної величини $K_{int} = a/(H - h)$, яку раніше було названо коефіцієнтом взаємодії [20]. В діапазоні параметрів цього дослідження ($0.15 < K_{int} < 2$) виявлено, що при малих значеннях K_{int} має місце м'який удар падаючої хвилі об перешкоду, який супроводжується слабкими трансформаціями прохідної хвилі та утворенням оберненого солітону незначної інтенсивності. Зі збільшенням величини K_{int} сценарій проходження солітонної хвилі над підводним бар'єром ускладнюється через дисперсійні ефекти, зумовлені генерацією за прохідною хвилею ланцюжка вторинних солітонів. Коли $K_{int} > 1$, відбувається



1 – падаюча хвиля, 2 – хвиля, відбита від перешкоди, 3 – хвиля, що пройшла, 4 – хвиля, відбита від торцевої стінки лотка.

Рис. 4. Збурення вільної поверхні при взаємодії хвилі з напівзануреною стінкою при $H = 14$ см: $a - z = 0$, $b - z = 5$ см



H – глибина води в каналі; a – амплітуда хвилі; h – висота перешкоди; $D1, D2$ – ємнісні датчики.

Рис. 5. Схематичне зображення поширення поодинокі хвилі над зануреною 900 вертикальною перешкодою. Стрілка вказує напрямок поширення хвилі

складна взаємодія солітонної хвилі з підводною перешкодою. Вона характеризується тим, що процес поділу хвилі на прохідну і відбиту супроводжується інтенсивними хаотичними збуреннями вільної поверхні в околі бар'єру. Але повного руйнування прохідної хвилі при цьому не спостерігається. На деякій відстані від перешкоди ($\approx 2H$) вона відновлює свою форму, крім того, за нею спостерігається «дисперсійний хвіст», утворений вторинними солітонами. За результатами досліджень зроблено оцінку критичного значення коефіцієнта K_{int} , при якому відбувається якісний перехід від одного сценарію взаємодії солітонної хвилі із зануреним бар'єром до іншого. Отримано, що $K_{int}^{cr} \approx 1$.

На рис. 6 представлений фотознімок, на якому зафіксоване проходження солітону з амплітудою $a/H = 0.3$ над вертикальною пластинкою висотою $h = 9$ см при глибині води в каналі $H = 11$ см. Коефіцієнт взаємодії в цьому разі складає $K_{int} \approx 1.7$, що є вищим за критичне значення. Виходячи з наведеної вище класифікації, це фото відповідає сильній взаємодії солітонної хвилі з перешкодою. На ньому відображений момент, коли маса рідини, що пройшла над пластинкою, формує підняття вільної поверхні, яке, згідно з висновками роботи [17], далі буде трансформуватися в солітон. Ці висновки підтверджують записи рівня вільної поверхні, зроблені датчиками $D1$ і $D2$ за тих же гідродинамічних умов, що й попередній фотокадр (рис. 7).

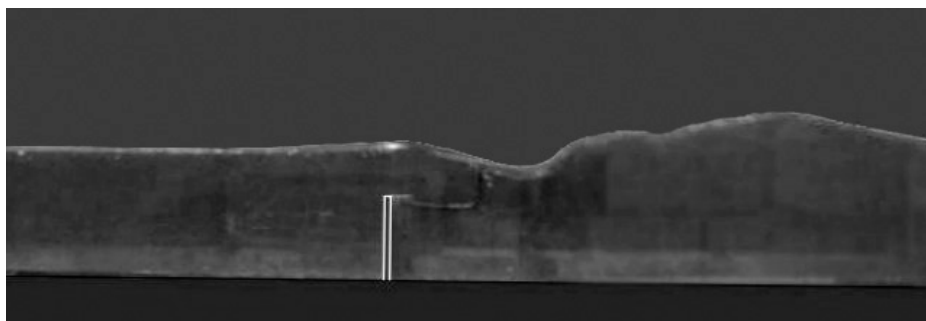
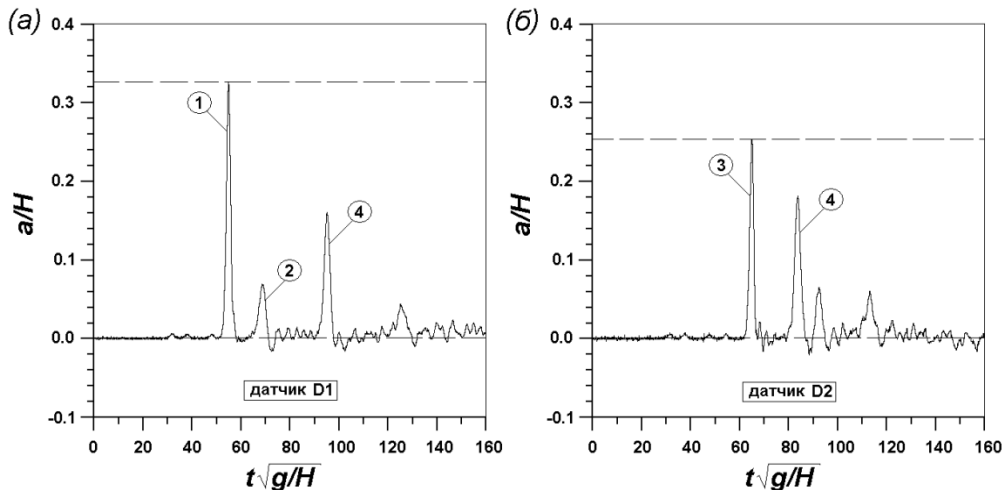


Рис. 6. Фотокадр сильної взаємодії солітону з вертикальною пластинкою

На рис. 7а можна бачити падаючу хвилю (позначена цифрою 1) і відбитий солітон (позначений цифрою 2). На рис. 7б показані прохідна хвиля (позначена цифрою 3) і хвиля, відбита від торцевої стінки каналу (цифра 4). Ці результати підтверджують, що незважаючи на за критичне значення коефіцієнта взаємодії, прохідна хвиля відновлює солітонну форму після проходження над підводною перешкодою, а хаотичні збурення вільної поверхні трансформуються у дисперсійний ланцюжок хвиль малої амплітуди.



1 – падаюча хвиля, 2 – відбита хвиля, 3 – хвиля, що пройшла, 4 – хвиля, відбита від торцевої стінки лотка.

Рис. 7. Збурення вільної поверхні, викликані поширенням солітону над зануреним бар'єром висотою $h = 9$ см при глибині води в лотку $H = 11$ см

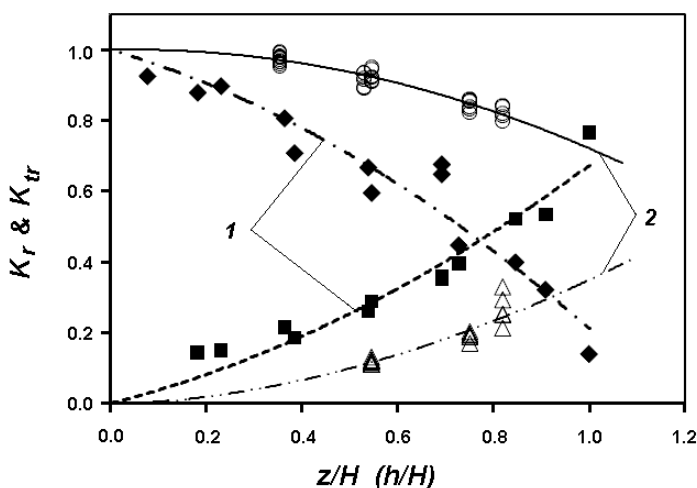
4. Оцінка ефективності вертикальних бар'єрів проти хвиль

Для оцінки гідравлічної ефективності розглянутих перешкод, як спеціальних хвилегасників, використовуються коефіцієнти відбиття $K_r = a_r/a_i$ та проходження $K_{tr} = a_{tr}/a_i$, де a_i – амплітуда хвилі, яка набігає на перешкоду, a_r – амплітуда відбитої хвилі, a_{tr} – амплітуда хвилі, що пройшла. Коефіцієнт проходження K_{tr} змінюється в діапазоні $0 < K_{tr} < 1$, де значення 0 означає неможливість проходження (бар'єр встановлений так, що виключається перелив рідини), а значення 1 передбачає повне проходження, коли бар'єр відсутній. Аналогічно коефіцієнт відбиття K_r змінюється в тих же межах, але значення 0, навпаки, відповідає випадку, коли перешкода відсутня, а значення 1 – повному відбиттю хвилі від перешкоди.

На основі аналізу даних виконаних експериментальних досліджень отримано узагальнюючі залежності коефіцієнтів проходження K_{tr} та відбиття K_r від відносної довжини осадки напівзануреного бар'єру z/H і відносної висоти повністю зануреного бар'єру h/H . На рис. 8 вони представлені у вигляді маркерів та кривих, побудованих за дискретними даними методом найменших квадратів. Зазначимо, що криві 1 відповідають напівзануреній споруді, а криві 2 – повністю зануреній.

З наведених результатів випливає, що є чітка кореляція між значеннями коефіцієнтів проходження та відбиття. При збільшенні величини осадки/висоти вертикальної пластини, ступінь впливу перешкоди зростає, що призводить до більш сильної взаємодії поодинокі хвилі з

перешкодою. Як наслідок, інтенсивність відбитої хвилі зростає, і, відповідно, падає енергія хвилі, що проходить. Разом з тим, зменшується висота нахату поодинокі хвилі на торцеву стінку каналу.



○, ◆ – коефіцієнти проходження; Δ, ■ – коефіцієнти відбиття.

Рис. 8. Залежності коефіцієнтів проходження K_{tr} та відбиття K_r від відносної осадки напівзануреного бар'єру z/H (криві 1) та відносної висоти підводного бар'єру h/H (криві 2)

Характер кривих на рис. 8, які стосуються напівзануреного бар'єру, свідчать про істотне зменшення амплітуди прохідної хвилі і відповідне збільшення амплітуди відбитої хвилі, коли осадка споруди зростає. Існує відстань між бар'єром і дном, при якій ці дві величини зрівнюються, а далі відбита хвиля переважає ту, що пройшла. При цьому, затухання хвилі при проходженні через таку споруду може досягати 60–70%. Ці дані вказують на високу ефективність навісної стінки щодо розсіювання енергії хвиль, що набігають на береги. Отримані результати підтверджують висновки роботи [13] про те, що частково занурений хвилелом екранного типу є ефективним в розсіюванні енергії падаючих хвиль, якщо глибина занурення хвилелому перевищує половину глибини води.

Криві, позначені цифрою 2, відповідають повністю зануреному бар'єру. Очевидно, що його вплив на динаміку солітонної хвилі є не таким вражаючим, як в попередньому випадку. Але й тут зменшення хвильової енергії може досягати 20%. Зазначимо, що при оцінюванні ефективності хвилеломів повинні враховуватися екологічні та економічні чинники, такі як інтенсивність водообмінних течій та вартість спорудження і обслуговування.

Висновки

Виконане фізичне моделювання генерації, поширення та взаємодії поверхневих поодинокі хвиль з тонкими вертикальними бар'єрами

різного типу – навісними (напівзануреними) та встановленими на дно (повністю зануреними). Отримані характеристики прохідної та відбитої хвиль в широких діапазонах глибини дослідного каналу, геометричних параметрів споруд та амплітуди падаючої хвилі.

Описані різні типи взаємодії солітонної хвилі із зануреним вертикальним бар'єром, коли падаюча хвиля або м'яко поділяється на прохідну та відбиту, або цей процес супроводжується утворенням ланцюжка вторинних солітонів та хаотичними пульсаціями рідини навколо перешкоди. Показано, що тип взаємодії визначається відношенням амплітуди хвилі до ширини зазору між вершиною споруди і незбуреною поверхнею води. На основі аналізу великої кількості даних встановлено, що критичне значення цього коефіцієнту, при якому відбувається перехід від однієї моделі взаємодії до іншої, дорівнює ≈ 1 .

Отримано, що при набіганні солітонної хвилі на навісну вертикальну стінку, відбита хвиля утворюється з нахату падаючої хвилі на споруду, а прохідна хвиля формується після проходження маси рідини через зазор між дном і нижньою частиною стінки.

Оцінки коефіцієнтів відбиття та проходження хвилі свідчать про те, що тонкі вертикальні бар'єри хоча й не пригнічують нелінійні солітонні хвилі повністю, але є достатньо ефективними в зменшенні їхньої інтенсивності, а цільовий захист може бути досягнутий за рахунок найкращого вибору осадки непроникної частини хвилелому або висоти зануреної перешкоди. Встановлено, що напівзанурені хвилеломи такого типу можуть розсіювати до 60% енергії падаючої хвилі, а повністю занурені – до 20%.

Література

1. Wu Y.-T. Propagation of solitary wave soverdouble submerged barriers / Y.-T. Wu, S.-C. Hsiao // *Water*. – 2017. – Vol. 9, Issue 12. – P. 917-17.
2. Pelinovsky E. Solitary wave transformation on the underwater step: Asymptotic theory and numerical experiments / E. Pelinovsky, B. H. Choi, T. Talipova, S. D. Woo, D. C. Kim // *Applied Mathematics and Computation*. – 2010. – Vol. 217, Issue 4. – P. 1704-1718.
3. Liu P.L.-F. A numerical study of the evolution of a solitary wave over a shelf / P. L.-F. Liu, Y. Cheng // *Physics of Fluids*. – 2001. – Vol. 13, Issue 6. – P. 1660-1667.
4. Lu J. Numerical study of solitary wave fission over an underwater step / J. Lu, X. Yu // *Journal of Hydrodynamics*. – 2008. – Vol. 20, Issue 3. – P. 398-402.
5. Lin P. A numerical study of solitary wave interaction with rectangular obstacles / P. Lin // *Coastal Engineering*. – 2004. – Vol. 51, Issue 1. – P. 35-51.
6. Chang K.-A. Vortex generation and evolution in water waves propagating over a submerged rectangular obstacle. Part 1. Solitary waves / K.-

- A. Chang, T.-J. Hsu, P. L.-F. Liu // Coastal Engineering. – 2001. – Vol. 44, Issue 1. – P. 13-36.
7. Fridman A.M. Tsunami wave suppression using submarine barriers / A.M. Fridman, L.S. Alperovich, L. Shemer, et al. // Physics. – 2010. – Vol. 53, Issue 8. – P. 809-816
 8. Wang J. Numerical study on interaction of a solitary wave with the submerged obstacle / J. Wang, G. He, R. You, P. Liu // Ocean Engineering. – 2018. – Vol. 158. – P. 1-14.
 9. Lin C. Vortex shedding induced by a solitary wave propagating over a submerged vertical plate / C. Lin, T.-C. Ho, S.-C. Chang // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2005. – Vol. 26, Issue 6. – P. 894-904.
 10. Lin C. Characteristics of vortex shedding process induced by a solitary wave propagating over a submerged obstacle / C. Lin, T.-C. Ho, S.-C. Hsieh, K.-A. Chang // Proceedings of OMAE 2006 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering June 4-9, 2006, Hamburg, Germany.
 11. Chang C.-H. Numerical simulations and experimental visualization soft-hevortex characteristics fora solitary wave interacting with a bottom-mounted vertical plate / C.-H. Chang, C. Lin, K.-H. Wang, J. M. Jaf // Journal of Hydro-Environment Research. – 2018. – Vol. 19. – P. 88-102.
 12. Liu P. L.-F. Solitary wave runup and force on a vertical barrier / P. L.-F. Liu, K. AL-Banaa // Journal of Fluid Mechanics. – 2004. – Vol. 505. – P. 225-233.
 13. Shao S. SPH simulation of solitary wave interaction with a curtain-type breakwater / S. Shao // Journal of Hydraulic Research. – 2005. – Vol. 43, Issue 4. – P. 366-375.
 14. Ketabdari M. J. WCSPH simulation of solitary wave interaction with a curtain-type breakwater / M. J. Ketabdaria, N. Kamania, M. H. Moghaddam // AIP Conference Proceedings. – 1648, 2015.
 15. Monaghan J.J. Scott Russell's wave generator / J.J. Monaghan, A. Kos // Physics of Fluids. – 2000. – Vol. 12. – P. 622-630.
 16. Городецький О.В. Генерація, розповсюдження та накат відокремлених хвиль на берегові схили / О. В. Городецький, А. С. Котельнікова, В. І. Нікішов, В. В. Олексюк. та ін. // Прикладна гідромеханіка. – 2010. – Том 12 (84), №1. – С. 40-47.
 17. Hammack J.L. The Korteweg-de Vries equation and water waves. Part 2. Comparison with experiments / J.L. Hammack, H. Segur // Journal of Fluid Mechanics. – 1974. – Vol. 65. – P. 289-314.
 18. Huang C.-J. On the interaction of a solitary wave and a submerged dike / C.-J. Huang, C.-M. Dong // Coastal Engineering. – 2001. – Vol. 43. – P. 265-286.
 19. Nejadkazem O. Non-propagating waves and behavior of curtainwall-pile breakwaters / O. Nejadkazem, M. Gharabaghi, A. Reza // Journal of the Persian Gulf (Marine Science). – 2012. – Vol. 3, Issue 7. – P. 11-26.

20. Котельнікова А. С. Взаємодія поверхневих поодиноких хвиль з підводними перешкодами /А. С. Котельнікова, В. І. Нікішов, С. М. Срібнюк // Доповіді НАНУ.– 2012. – №7. – С.54-59.

Стаття надійшла до редакційної колегії 24.10.2022 р.

INTERACTION OF A SURFACE SOLITARY WAVE WITH SUBMERGED AND SEMI-SUBMERGED BREAKWATERS

I. M. Gorban¹, A. S. Korolova¹, O. G. Lebid²

¹*Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine;*

Kyiv, Marii Kapnist st., 8/4;

e-mail: ivgorban@gmail.com, kan5nas@gmail.com;

²*Institute of Telecommunications and Global Information Space*

of the NAS of Ukraine; Kyiv, Chokolivsky Boul.,13;

e-mail: o.g.lebid@gmail.com

The interaction of a surface solitary wave with a semi-submerged curtain wall and an underwater barrier was experimentally investigated. The incident wave amplitude, the draft of the semi-submerged wall and the height of the submerged barrier were varied in different experiments to derive the most effective breakwater configuration in terms of reflection and transmission wave coefficients. It was obtained that the meeting of a solitary wave with the curtain wall looks as follows: the reflected wave is formed from the roll of the incident wave on the structure, and the transmitted wave grows after the passage of the liquid mass through the gap between the bottom and the lower part of the wall. The interaction of a solitary wave with a submerged barrier depends on the ratio of the incident wave amplitude to the thickness of the water column above the obstacle. When its value is less than a critical value, which is about 1, the incident wave splits smoothly into reflected and transmitted solitons. Otherwise, intense chaotic oscillations of the free surface occur above the obstacle. Evaluations of wave reflection and transmission coefficients showed that thin vertical barriers are sufficiently effective in reducing the intensity of nonlinear solitary waves. The target protection can be achieved by choosing the best draft of the impervious part of the curtain wall or the optimal height of the submerged barrier. A semi-submerged wall was shown to be more effective for damping the energy of a solitary wave compared to an underwater barrier installed on the bottom. The curtain wall can dissipate up to 60% of the energy of the incident wave, while the submerged barrier - up to 20%.

Keywords: *solitary wave, semi-submerged curtain wall, submerged-vertical barrier, reflection and transmission coefficients, laboratory experiment.*