

УДК 532.593.5

Volodymyr Voskoboinick¹, DSci, Head of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2161-6923> **e-mail:** vlad.vsk@gmail.com

Oleksii Lebid², DSci, Deputy Director for Scientific Research of Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NAS Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4003-8068> **e-mail:** o.g.lebid@gmail.com

Oleksandr Voskoboinyk¹, PhD, Associate professor of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-4433> **e-mail:** alexandr.vsk@gmail.com

Yurii Merenger¹, PhD Student of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-8595-6622> **e-mail:** YuriMer@gmail.com

Sofiia Voskoboinik³, Student of the Department of Information Technology, Artificial Intelligence, and Cybersecurity of National University of Food Technologies
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-8829-7588> **e-mail:** ivosk3@gmail.com

¹Institute of Hydromechanics of the National academy sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

³National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

INFLUENCE OF PERMEABLE PILE BREAKWATER ON SURFACE WAVES

Abstract. *Laboratory experimental researches were conducted to study the influence of the pile shape of permeable vertical breakwater on the formation and transformation of surface waves. The experiments conducted in a wave channel, where waves of different heights, periods and wavelengths were generated, with permeable breakwaters of a fuel structure with piles of circular, square and triangular cross-section. The use of a group of sensors made it possible to determine the features of wave transformation during their interaction with single-row permeable vertical walls. Regardless of the direction of the frontal surface of the square cross-section piles of permeable breakwaters, the height of the reflected and transmission surface waves increased and the increase coefficient increased with increasing steepness of the incoming wave. The height of the reflected wave significantly exceeded the height of the transmission wave. With increasing permeability of the vertical single-row pile breakwater, the steepness of the reflected wave decreased, and the steepness of the transmission wave, on the contrary, increased. The highest ratios between reflected wave heights and transmitted wave heights as a function of normalized wave number were recorded for breakwaters with a permeability of 20%, which consisted of square-section piles, where the side of the square was directed towards the incoming wave. The lowest ratios between reflected wave heights and transmitted wave heights as a function of wave number were observed for breakwaters with a permeability of 50%, which consisted of square-section piles, where the edge of the pile was directed towards the wave.*

Key words: *surface wave, permeable breakwater, square cross-section piles, wave height sensors, reflected and transmission waves, wave energy dissipation.*

**В.А. Воскобійник¹, О.Г. Лебідь², О.А. Воскобойник¹,
Ю.П. Меренгер¹, С.І. Воскобойник**

¹Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

³Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

ВПЛИВ ПРОНИКНОГО ПАЛЬНОГО ХВИЛЕЛОМУ НА ПОВЕРХНЕВІ ХВИЛІ

***Анотація.** Проведено лабораторні експериментальні дослідження з метою визначення впливу проникного пального хвилелому з палями квадратного поперечного перерізу на формування та трансформацію поверхневих хвиль. Досліди проводилися у хвильовому каналі, де генерувалися хвилі різної висоти, періоду та довжини хвилі, з проникними хвилеломами пальної конструкції з палями квадратного поперечного перерізу. Використання групи датчиків дозволило визначити особливості трансформації хвиль під час їх взаємодії з однорядними проникними вертикальними стінками. Незалежно від напрямку фронтальної поверхні палі квадратного поперечного перерізу проникних хвилеломів висота відбитої та проникної поверхневих хвиль збільшувалася і коефіцієнт збільшення наростає зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі. Висота відбитої хвилі значно перевищувала висоту проникної хвилі. Зі збільшенням проникності вертикального однорядного пального хвилелому крутизна відбитої хвилі зменшувалася, а крутизна проникної хвилі навпаки збільшувалася. Найвищі відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від нормованого хвильового числа реєструвалися для хвилеломів проникністю 20%, які склалися з палі квадратного поперечного перерізу, де сторона квадрату була направлена назустріч прийдешній хвилі. Найменші відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від хвильового числа спостерігалися для хвилеломів проникністю 50%, які склалися з палі квадратного поперечного перерізу, де ребро палі було спрямоване назустріч хвилі.*

***Ключові слова:** поверхнева хвиля, проникний хвилелом, палі квадратного поперечного перерізу, датчики висоти хвиль, відбиті та проникні хвилі, дисипація хвильової енергії.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.18-30>

Вступ

Наявність парникового ефекту, через накопичення парникового газу, внаслідок інтенсивного спалювання викопних вуглецевих корисних копалин, вирубки лісів, промислових відходів та іншої діяльності людства, призводить до підвищення температури та значного потепління клімату на Землі, а відповідно танення льодовиків і підвищення рівня Світового океану. Все це призводить до розмивання прибережної зони, підтоплення поселень та гідротехнічних споруд. Внаслідок підвищення рівня морських та океанських акваторій збільшуються висоти морських хвиль, чисельність та інтенсивність штормів і тайфунів, що вимагає покращення засобів і конструкцій берегозахисних споруд, їх ефективності та можливості захистити берег від розмивів і ерозії ґрунтів, критичної прибережної інфраструктури, місць проживання та відпочинку населення багатьох морських країн [1-4].

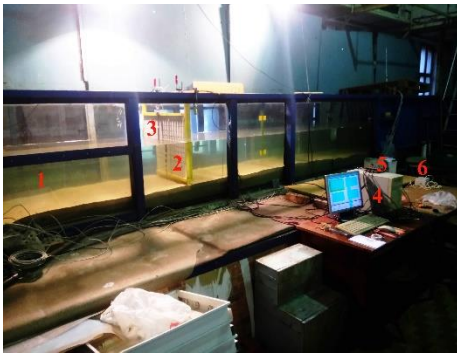
В якості берегозахисних споруд в морській інженерії широко використовуються хвилеломи або хвилерізи для розсіювання енергії хвиль, які взаємодіють з береговою лінією та прибережною інфраструктурою. Хвилеломи – це важливі об’єкти приморської інфраструктури, які захищають берегові лінії, гавані, пляжі та морські споруди від тривалого впливу поверхневих хвиль, що суттєво підтримує регіональну структурну стабільність та екологічну рівновагу. Хвилеломи будуються з надводною частиною, занурені та ті, які знаходяться в плавучому стані та закріплені до морського дна якорями. В останній час широкого розповсюдження набули проникні хвилеломи в якості пластинчатих, пальних та перфорованих конструкцій, які достатньо ефективні під час експлуатації, економічно більше вигідні та значно поліпшують екологію в місці їх розташування. Гідрравлічна ефективність пористих хвилеломів визначається їхньою геометрією, пористістю та взаємодією рідини хвильового поля та берегозахисної структури. Такі хвилеломи зменшують негативний вплив їх застосування на прибережні екосистеми, зменшують застій води на підвітряному березі та покращують якість води у захищених акваторіях. Вони приводять до значної дисипації енергії хвиль, що обумовлено процесом трансформації та розбиття хвиль, а також механізмом тертя водних мас, які переміщуються хвильовим рухом через щілини проникних хвилеломів. Попередні дослідження, результати яких опубліковані в фахових виданнях та доповідалися на спеціалізованих симпозіумах і конференціях [5-9], ретельно вивчали особливості та характеристики розсіювання хвиль проникними хвилеломами з використанням теоретичного аналізу, модельних експериментів, числового і фізичного моделювання та під час натурального використання таких хвилеломів.

В роботі [10] проведено комплексний огляд характеристик трансформації хвиль різними типами хвилеломів у морській інженерії та їх берегозахисних властивостей. Відмічено, що сучасні хвилеломи будуються з застосуванням нових передових матеріалів і конструкцій з метою підвищити ефективність експлуатації та зменшити матеріальні та фінансові витрати. Серед широкого класу побудованих і проєктованих хвилеломів в залежності від їх властивості відбивати, пропускати та розсіювати енергію хвиль, фізичних та експлуатаційних властивостей треба виокремити найбільше популярні типи хвилеломів, а саме вертикальні, похилі, плавучі, затоплені та проникні хвилеломи, кожний з цих типів хвилеломів має свої переваги та недоліки під час експлуатації та ефективної роботи в якості берегозахисних споруд [11-15]. Вибір типу хвилелому залежить від багатьох факторів, основними з яких є хвильові умови експлуатації, топографія дна та вплив на оточуюче середовище. В роботі прогнозується, що успіхи в розробці, виготовленні та застосуванні нових матеріалів, дизайні хвилеломів та технологіях їх виготовлення і експлуатації покращать характеристики хвилеломів з врахуванням місцевих умов їх розташування та вимог для забезпечення ефективного захисту берегових ліній, критичної інфраструктури та морських гідротехнічних споруд.

Мета роботи – визначення впливу проникного пального хвилелому з палями квадратного поперечного перерізу на формування та трансформацію поверхневих хвиль в лабораторних умовах.

Програма та методика досліджень

Визначення впливу проникної пальної стінки з палями квадратного поперечного перерізу, в яких сторона квадрату направлена назустріч напрямку хвилі, та особливостей трансформації гравітаційних хвиль поблизу них проводилося за допомогою візуальних досліджень та вимірюванням висот хвиль перед фронтальною частиною вертикальної стінки та позаду неї. Візуальні дослідження за допомогою фотоапаратури та відеокамер дозволили оцінити характерні особливості поведінки хвильового поля в досліджуваних областях. Інструментальні дослідження за допомогою датчиків висоти хвиль, а також датчиків пульсацій тиску дозволили визначити кількісні параметри хвильового руху та поля пульсацій хвильового тиску поблизу суцільних і проникних вертикальних стінок [16-18]. Для виконання цих наукових робіт було створено експериментальний стенд на базі хвильового каналу і досліди проводилися в лабораторних умовах. Основні параметри стенду та його можливості більше детально було опубліковано в роботах [19].



а



б

Рис. 1. Експериментальний стенд (а) та проникний хвилелом з палями квадратного поперечного перерізу проникністю 50% (б)

Експериментальні дослідження проводилися в хвильовому каналі довжиною близько 50 м, де на відстані близько 40 м від щитового генератора хвиль було зроблено вимірювальну ділянку (рис. 1а). Дно цієї ділянки було засипано кварцовим піском на висоту 0,2 м і на піску розташовували моделі досліджуваних вертикальних стінок (рис. 1а). В кормовій частині хвильового каналу було встановлено укісний щілинний поглинач хвиль. Хвильовий канал заповнювався водою на глибину 0.4 м або 0.5 м над піщаним дном (кварцовий пісок товщиною 0.2 м) в залежності від виконуваних дослідних робіт. Бокові стінки каналу були виготовлені з протидарного скла для проведення візуальних досліджень та відео- й фотозйомки. Ширина каналу складала 1.0 м і висота каналу була також 1.0 м. В середині хвильового каналу (1), як показано на рис. 1а, було встановлено проникну вертикальну стінку (2) на піщане дно хвильового каналу. Перед проникною пальною стінкою та позаду неї розташовувалися спеціально розроблені та створені [19] датчики висоти хвиль (3). Моделі паливих конструкцій мали різну проникність і розташовувалися перпендикулярно напрямку руху хвиль від генератора хвиль щитової конструкції, як показано на рис. 1б.

Експериментальний стенд було обладнано контрольно-вимірною апаратурою, датчиками, координатними пристроями, системами фіксації датчиків, апаратурою реєстрації даних, комп'ютерною технікою (4). Електричні сигнали датчиків висоти хвиль фільтрувалися і підсилювалися відповідними підсилувачами (5), потім через 16-канальний аналогово-цифровий перетворювач (6) подавалися на комп'ютер (4), де реєструвалися, а потім оброблялися та аналізувалися [19, 20]. Вимірювання висоти хвиль, а також хвильового тиску було здійснено за допомогою п'єзорезистивних датчиків динамічного тиску, фотографію яких наведено на рис. 1. П'єзорезистивні датчики динамічного тиску вимірювали тиск у тонкостінних трубках, які було занурено під поверхню води (рис. 1б). Під дією хвильового поля тиск в трубках змінювався у відповідності до параметрів хвиль і реєструвався цими високоточними (чутливість 2 Па) датчиками [3, 20].

Обробка і аналіз експериментальних даних було здійснено за допомогою спеціальної апаратури аналізу випадкових процесів або на комп'ютері за відповідними програмами і алгоритмами. Статистична обробка і аналіз результатів досліджень виконувалася з використанням математичного апарату теорії ймовірності та математичної статистики. В результаті було отримано і проаналізовано інтегральні, кореляційні та спектральні характеристики заміряних гідродинамічних параметрів хвильового поля та визначені характерні особливості взаємодії гравітаційних хвиль з проникними вертикальними стінками, які створено з палів квадратної поперечної форми.

Результати досліджень

На рис. 2 наведені результати вимірювання висот відбитих та проникних хвиль, нормованих глибиною води в хвильовому каналі (h^*/H), та коефіцієнтів трансформації хвиль, а саме, коефіцієнта відбиття хвиль (C_R), коефіцієнта проникнення хвиль (C_T) і коефіцієнта дисипації енергії хвиль (C_E) в залежності від крутизни прийдешньої хвилі для проникної вертикальної стінки з палями квадратного перерізу стороною назустріч хвилям. Номера кривих на рис. 2а наступні: крива 1 виміряна для відбитої хвилі від палів проникністю 20%, крива 2 – для відбитої хвилі від палів проникністю 50%, крива 3 – для проникної хвилі від палів проникністю 20%, крива 4 – для проникної хвилі від палів проникністю 50%, крива 5 – для прийдешньої хвилі. На рис. 2б перші дві криві – це коефіцієнти відбиття хвилі для стінок проникністю 20% та 50%, третя і четверта криві – це коефіцієнти проникнення хвиль для проникності вертикальної стінки 20% і 50%, а останні дві криві (крива 5 і крива 6) – це коефіцієнти дисипації енергії хвиль для проникності 20% і 50%.

Результати дослідження показали, що висоти відбитих та проникних хвиль збільшувалися незалежно від проникності пального хвилелому зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі. При цьому темп збільшення висоти відбитої та проникної хвилі поступово зменшувався зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі, як показано на рис. 2а. Нормовані висоти відбитих хвиль значно перевищували висоти проникних хвиль та висоту прийдешньої хвилі і ця різниця збільшувалася зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі. Зі збільшенням проникності однорядного вертикального пального хвилелому

висоти відбитих хвиль зменшувалися у порівнянні з хвилеломом меншої проникності, що впливає зі співставлення кривих 1 та 2 на рис. 2а. Висоти проникних хвиль мали протилежний характер зміни, а саме, висоти проникних хвиль для проникності 50% були вищими, ніж висоти проникних хвиль для пального хвилелому проникністю 20% (криві 3 та 4 на рис. 2а). Як показали результати досліджень, що наведені на рис. 2а, висота прийдешньої хвилі мала середні значення між висотами відбитих та проникних хвиль.

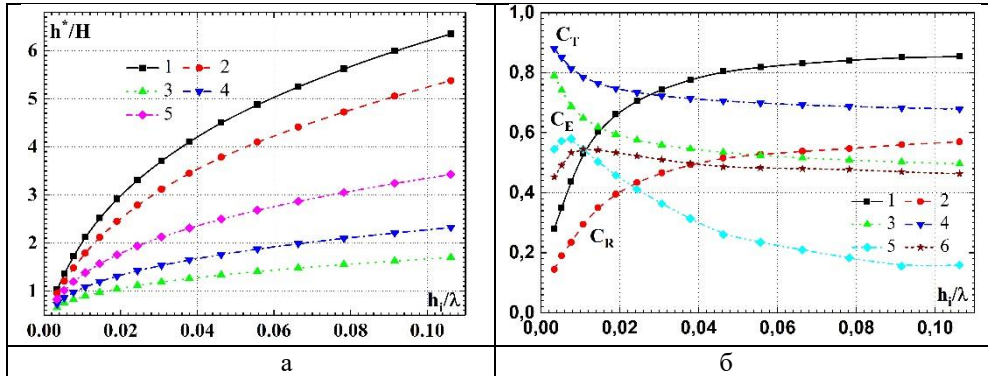


Рис. 2. Залежності висоти поверхневих хвиль (а) та коефіцієнтів трансформації хвиль (б) від крутизни початкової хвилі для проникної вертикальної стінки з пальями квадратного перерізу стороною назустріч хвилям

Результати дослідження висот відбитої та проникної хвилі дозволили визначити коефіцієнти трансформації поверхневої хвилі внаслідок її взаємодії з проникним вертикальним хвилеломом, який складався з паль квадратного поперечного перерізу, які представлено на рис. 2б. Так, коефіцієнти відбиття поверхневих хвиль, які визначалися за залежністю $C_R = h_R / h_i$, де h_R – висота відбитої проникним хвилеломом хвилі, а h_i – висота прийдешньої хвилі, яку генерував генератор хвиль у хвильовому каналі, збільшувалися зі збільшенням хвильового числа, а коефіцієнти проникнення хвиль ($C_T = h_T / h_i$, де h_T – висота проникної через хвилелом хвилі) навпаки зменшувалися зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі, як показано на рис. 2б. Наряду з цим коефіцієнт відбиття хвилі був вищим в умовах проведення досліджень з проникністю хвилелому 20%, ніж з проникністю 50%. Коефіцієнт відбиття хвилі від поверхні паль квадратного поперечного перерізу на малих значеннях крутизни прийдешньої хвилі більш стрімко зростав для проникності хвилелому 20%, ніж для проникності 50%, а потім зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі $h_i/\lambda > 0.08$ виходив на поличку зі значенням $C_R \approx 0.86$. Коефіцієнт проникнення хвилі навпаки був вищим для хвилелому проникністю 50%, ніж проникністю 20%. Це обумовлено тим, що проникний вертикальний пальний хвилелом, який мав незначну проникність, мав значний гідродинамічний опір проникненню хвиль, тому перед таким хвилеломом спостерігалися інтенсивні відбиті хвилі, що показано на рис. 2а, і, відповідно, значні коефіцієнти відбиття хвиль, як показано на рис. 2б, у порівнянні з проникним хвилеломом незначної проникності. Проникні хвилі та коефіцієнти проникнення хвиль мали протилежну тенденцію зміни гідродинамічних характеристик, що показано на рис. 2.

Коефіцієнти дисипації енергії хвилі, які розраховувалися за залежністю $C_E = \sqrt{1 - C_R^2 - C_T^2}$, показали, як розсіювалася або демпфувалася енергія прийдешньої хвилі внаслідок її взаємодії з проникним вертикальним однорядним хвилеломом. В області крутизни прийдешньої хвилі $h_i / \lambda \approx (0.3 - 0.5)$ спостерігалися екстремальні (максимальні) значення коефіцієнтів розсіювання енергії хвиль, які були вищими для проникності 20% пального хвилелому, ніж для його проникності 50%. При цьому екстремуми для меншої проникності та вищі показники дисипації хвильової енергії мали місце для менших значень крутизни прийдешньої хвилі. Так, зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі від діапазону екстремумів C_E коефіцієнт дисипації енергії хвилі зменшувався, як показано на рис. 2б, але темп зменшення цього коефіцієнта був вищий для хвилелому меншої проникності.

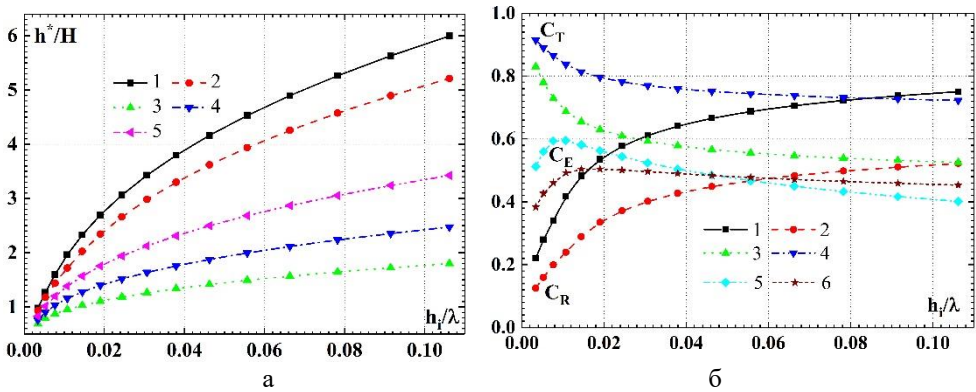


Рис. 3. Залежності висоти поверхневих хвиль (а) та коефіцієнтів трансформації хвиль (б) від крутизни початкової хвилі для проникної вертикальної стінки з палями квадратного перерізу ребром назустріч хвилям

На рис. 3 наведені результати вимірювання висот відбитих та проникних хвиль, нормованих глибиною води в хвильовому каналі, та коефіцієнтів трансформації хвиль в залежності від крутизни прийдешньої хвилі для проникної вертикальної стінки з палями квадратного перерізу ребром назустріч хвилям. Номера кривих на рис. 3а та на рис. 3б відповідають тим, що наведені на рис. 2а та на рис. 2б, але для паль квадратного перерізу, які направлено ребром назустріч хвилям.

Результати вимірювання висоти відбитих та проникних хвиль в залежності від крутизни прийдешньої хвилі для проникної вертикальної стінки з палями квадратного перерізу ребром назустріч хвилям, що представлені на рис. 3а, показали, що характер зміни крутизни поверхневих хвиль загалом не відрізнявся від того, що було отримано в попередніх результатах. Але значення висоти відбитих хвиль стали меншими, ніж в умовах дослідів з хвилеломом з палями квадратного поперечного перерізу та направленими сторонами назустріч напрямку хвиль, а висоти проникних хвиль навпаки незначно збільшилися для паль, в яких ребро було направлено назустріч напрямку хвилі, як було показано на рис. 2а та на рис. 3а.

Коефіцієнти відбиття хвилі на рис. 3б стали більшими, ніж на рис. 2б. Коефіцієнти проникнення хвиль через хвилелом з палями квадратного поперечного перерізу, де палі було направлено ребром до напрямку хвиль, мали вищі значення, ніж на рис. 2б для палів квадратного поперечного перерізу зі стороною направленою назустріч хвилі.

Коефіцієнти дисипації енергії хвиль в області малої крутизни прийдешньої хвилі в діапазоні $h_i / \lambda \approx (0.3 - 0.5)$ також мали максимальні значення (рис. 3б) подібно до даних вимірювання C_E в умовах пального хвилелому з палями квадратного поперечного перерізу (рис. 2б). Але максимуми коефіцієнтів дисипації хвиль були вищими на рис. 3б, ніж на рис. 2б для проникності 20% та меншими для проникності 50% в умовах обтікання квадратних палів, де їх ребро було направлено назустріч хвилі. Зменшення коефіцієнта дисипації енергії хвиль спостерігалось з найбільшими темпами зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі для палів квадратного поперечного перерізу зі стороною квадрату, яка направлена назустріч напрямку хвиль (див., рис. 2б). Для проникності хвилелому 50% коефіцієнти дисипації енергії хвиль для палів квадратного поперечного перерізу мали приблизно однаковий характер поведінки (рис. 2б та рис. 3б).

На рис. 4 наведені результати співставлення висот відбитої та проникної хвилі для палів квадратного поперечного перерізу проникних вертикальних хвилеломів різної проникності та напрямку фронтальної поверхні палів в залежності від крутизни прийдешньої хвилі. Криві 1 та 2 отримані для палів, де сторона квадрату направлена назустріч напрямку хвиль та проникності 20% (крива 1) та 50% (крива 2). Криві 3 та 4 отримані для палів, де ребро квадрату направлено назустріч напрямку хвиль та проникності 20% та 50%, відповідно, крива 3 та крива 4. Крива 5 отримана під час вимірювання висот прийдешньої хвилі.

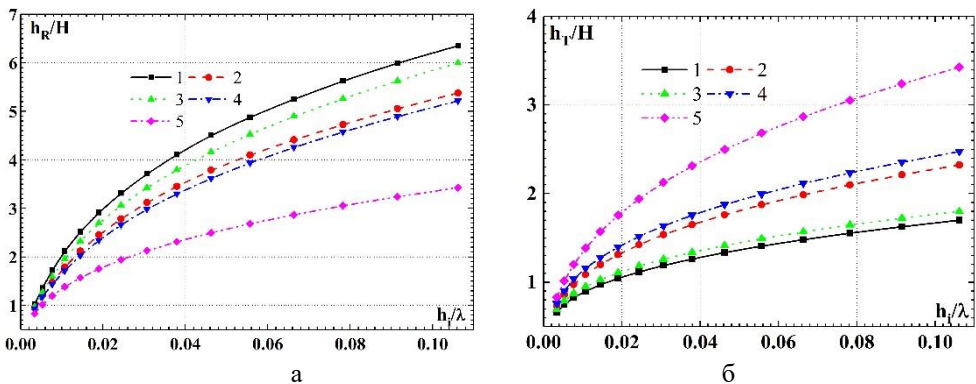


Рис. 4. Співставлення висот відбитої хвилі (а) та проникної хвилі (б) для палів квадратного поперечного перерізу проникних хвилеломів

Результати досліджень показали, що на хвилеломах з палями квадратної форми, в яких сторона квадрату направлена назустріч хвилі, мали вищі значення висоти відбитих хвиль, ніж на палях, де ребро палів було направлено назустріч хвилі, в усьому діапазоні зміни значень крутизни прийдешньої хвилі (рис. 4а). Треба зазначити, що різниця між висотами відбитих хвиль для досліджених форм палів була вищою для проникного хвилелому

проникністю 20%. Різниця між висотами відбитих хвиль та висотою прийдешньої хвилі збільшувалася зі збільшенням крутизни хвилі та зменшенням проникності пального хвилелому.

На рис. 4б наведені результати співставлення висот проникних через однорядний пальний хвилелом хвиль для паль квадратного поперечного перерізу проникних хвилеломів, які показали, що висота проникної хвилі найбільша для проникності 50% та квадратних паль, в яких ребро направлено назустріч напрямку прийдешніх хвиль. Найменші висоти проникних хвиль зареєстровано для паль проникністю 20% та квадратних за формою поперечного перерізу паль, де сторона квадрату направлена назустріч хвилі. Різниця між висотами прийдешньої хвилі та висотами проникної хвилі збільшувалася зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі, що показало більшу ефективність проникного пального хвилелому в якості берегозахисної споруди. При цьому берегозахисна ефективність однорядного пального хвилелому з палями квадратного поперечного перерізу, де сторона квадрату була направлена назустріч хвилі, була найвищою і ця ефективність покращувалася зі зменшенням проникності хвилелому.

На рис. 5 представлені результати вимірювань відношення висоти відбитої хвилі до висоти проникної хвилі в залежності від крутизни прийдешніх хвиль та від хвильового числа для однорядних проникних хвилеломів проникністю 20% та 50% з палями квадратного поперечного перерізу, де сторона квадрату або ребро палі було направлено назустріч прийдешній хвилі. Криві 1 і 2 отримані для квадратних паль, в яких сторона квадрату направлена назустріч напрямку хвилі, та проникності хвилелому 20% (крива 1) та 50% (крива 2). Криві 3 та 4 отримані для квадратних паль, в яких ребро палі направлено назустріч напрямку хвилі, та проникності хвилелому 20% (крива 3) та 50% (крива 4).

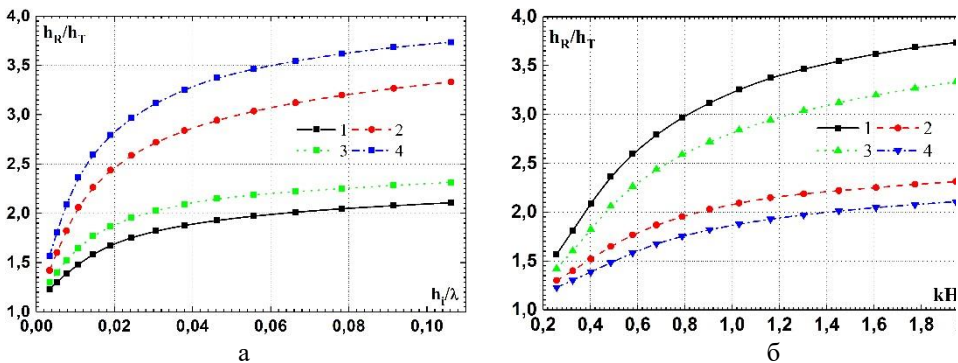


Рис. 5. Відношення висоти відбитої хвилі до висоти проникної хвилі в залежності від крутизни прийдешніх хвиль (а) та від хвильового числа (б)

Результати досліджень, які наведено на рис. 5а, показали, що найвищі відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від крутизни прийдешньої хвилі спостерігалися для хвилеломів проникністю 50%, які склалися з паль квадратного поперечного перерізу, де ребро палі було спрямоване назустріч хвилі. Найменші значення відношення між висотами відбитої та проникної хвилі мали місце для квадратних паль, в яких сторона квадрату була направлена назустріч хвилі, та для однорядного проникного

хвилелому проникністю 20%. Разом з тим, найвищі рівні відношення висот відбитої та проникної хвилі спостерігалися для хвилеломів проникністю 20% незалежно від форми поперечного перерізу палі відносно напрямку прийдешньої хвилі.

Результати досліджень, які наведено на рис. 5б, показали, що найвищі відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від нормованого хвильового числа реєструвалися для хвилеломів проникністю 20%, які склалися з палі квадратного поперечного перерізу, де сторона квадрату була направлена назустріч прийдешній хвилі. Найменші відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від хвильового числа спостерігалися для хвилеломів проникністю 50%, які склалися з палі квадратного поперечного перерізу, де ребро палі було спрямоване назустріч хвилі.

Висновки

Результати експериментальних досліджень з визначення впливу проникного пального хвилелому з палями квадратного поперечного перерізу на формування та трансформацію енергії поверхневих хвиль показали:

1. Незалежно від напрямку фронтальної поверхні палі квадратного поперечного перерізу проникних хвилеломів висота відбитої та проникної поверхневих хвиль збільшувалася і коефіцієнт збільшення наростав зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі. Визначено, що висота відбитої хвилі значно перевищувала висоту проникної хвилі. Зі збільшенням проникності вертикального однорядного пального хвилелому крутизна відбитої хвилі зменшувалася, а крутизна проникної хвилі навпаки збільшувалася.

2. Установлено, що коефіцієнти відбиття поверхневих хвиль збільшувалися зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі, а коефіцієнти проникнення хвиль навпаки зменшувалися зі збільшенням крутизни хвилі. Наряду з цим коефіцієнт відбиття хвилі був вищим в умовах проведення досліджень з проникністю хвилелому 20%, ніж з проникністю 50%. Коефіцієнт проникнення хвилі навпаки був вищим для хвилелому проникністю 50%, ніж проникністю 20%.

3. Показано, що коефіцієнти дисипації енергії хвиль в області малої крутизни прийдешньої хвилі в діапазоні $h_i / \lambda \approx (0.3 - 0.5)$ мали максимальні значення, а зі збільшенням крутизни хвилі коефіцієнт дисипації енергії хвилі зменшувався, але темп зменшення цього коефіцієнта був вищий для хвилелому меншої проникності.

4. Визначено, що на хвилеломах з палями квадратної форми, в яких сторона квадрату направлена назустріч хвилі, мали вищі значення висоти відбитих хвиль, ніж на палях, де ребро палі було направлено назустріч хвилі, в усьому діапазоні зміни значень крутизни прийдешньої хвилі. Різниця між висотами відбитих хвиль для досліджених форм палі була вищою для проникного хвилелому проникністю 20%. Різниця між висотами відбитих хвиль та висотою прийдешньої хвилі збільшувалася зі збільшенням крутизни хвилі та зменшенням проникності пального хвилелому.

5. Установлено, що найвищі відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від крутизни прийдешньої хвилі спостерігалися для хвилеломів проникністю 50%, які склалися з паль квадратного поперечного перерізу, де ребро палі було спрямоване назустріч хвилі. Найменші значення відношення між висотами відбитої та проникної хвилі мали місце для квадратних паль, в яких сторона квадрату була направлена назустріч хвилі, та для однорядного проникного хвилелому проникністю 20%.

6. Показано, що найвищі відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від нормованого хвильового числа реєструвалися для хвилеломів проникністю 20%, які склалися з паль квадратного поперечного перерізу, де сторона квадрату була направлена назустріч прийдешній хвилі. Найменші відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від хвильового числа спостерігалися для хвилеломів проникністю 50%, які склалися з паль квадратного поперечного перерізу, де ребро палі було спрямоване назустріч хвилі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Alturfi, U. A. & Shukur, A. H. K. (2024). Investigation of energy dissipation for different breakwater based on computational fluid dynamic model. *CFD Lett.*, 16(1), 22–42. <https://doi.org/10.37934/cfdl.16.1.2242>
2. Hoagland, S. W., Jeffries C.R., Irish J.L., et al. (2023). Advances in morphodynamic modeling of coastal barriers: A review. *J. Waterway Port Coast. Ocean Eng.*, 149(5), 03123001. <https://doi.org/10.1061/JWPED5.WWENG-1825>
3. Voskoboinick, V., Khomitsky, V., Voskoboinyk, O., Tereshchenko, L., & Voskoboinick, A. (2021). Wave loads on protective dam of the Marine channel of the Danube-Black sea. *Hydro-environment Research*, 35(3), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.003>
4. Voskoboinick, V., Onyshchenko, A., Voskoboinyk, O., Makarenkova, A., & Voskobiinyk, A. (2022). Junction flow about cylindrical group on rigid flat surface. *Heliyon*, e12595-1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12595>
5. Li, Z., Wang, Z., Liang, B., & Wang, X. (2024). Experimental study on hydrodynamic performance and structural forces of curved and vertical front face pile-supported permeable breakwaters. *Phys. Fluids*, 36(11), 117134. <https://doi.org/10.1063/5.0237833>
6. Huang, J., Lowe, R.J., Ghisalberti, M., & Hansen, J.E. (2024). Wave transformation across impermeable and porous artificial reefs. *Coast. Eng.*, 189, 104488. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104488>
7. Voskoboinick, A., Voskoboinick, V., Turick, V., Voskoboinyk, O., Cherny, D., & Tereshchenko, L. (2021). Interaction of group of bridge piers on scour. In Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He (Eds.), *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1247. Springer, 3-17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_1
8. Neelamani, S. & Al-Anjari, N. (2021). Experimental investigations on wave induced dynamic pressures over slotted vertical barriers in random wave fields. *Ocean Eng.*, 220, 108482. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108482>
9. Li, Z., Liang, B., Wang, Z., Pan, X., & Shi, L. (2025). An experimental study on the hydrodynamic performance of pile-supported caisson-type breakwaters with inclined porous plates under regular waves. *Phys. Fluids*, 37(4), 047115 <https://doi.org/10.1063/5.0260788>
10. Hu, Y. (2025). Wave dissipation performance of breakwater. *E3S Web of Conferences*, 606, 05005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560605005>
11. George, A. & Cho, I. H. (2020). Hydrodynamic performance of a vertical slotted breakwater. *Intern. J. Naval Architect. and Ocean Eng.*, 12, 468-478. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2019.12.001>

12. Somervell, L., Thampi, S., & Shashikala A. P. (2018) Estimation of friction coefficient for double walled permeable vertical breakwater. *Ocean Eng.*, 156, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.050>
13. Francis, V., Rudman, M., Ramakrishnan, B., Loh, S., & Valizadeh, A. (2023) Solitary wave interaction with upright thin porous barriers. *Ocean Eng.*, 268, 113394. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113394>
14. Hussein, K. B., Ibrahim, M., Awaad, A. S., & Abd El Ghany, S. H. (2024). Hydrodynamic performance of half pipe breakwaters experimentally and numerically. *Transact. Maritime Sci.*, 13(2), TOMS. <https://doi.org/10.7225/toms.v13.n02.002>
15. Voskoboinick, V. A., Turick, V. N., Voskoboinyk, O. A., Voskoboinick, A. V., & Tereshchenko I. A. (2019). Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., & He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 754. Springer, Cham., 23-32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_3
16. Voskoboinick, V., Kornev, N., & Turnov, J. (2013). Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. *Flow Turbulence Combust.*, 90(4), 709-722. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9433-9>
17. Voskoboinick, V. A., Voskoboinick, A. A., Turick, V. N., & Voskoboinick, A. V. (2020). Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices. *J. Eng. Physics and Thermophysics*, 93(5), 1205-1220. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>
18. Voskoboinick, V. A., Gorban, I. M., Voskoboinick, A. A., Tereshchenko, L. N., & Voskoboinick, A. V. (2021). Junction flow around cylinder group on flat plate. In V. A. Sadovnichiy, M. Z. Zgurovsky (Eds.), *Contemporary Approaches and Methods in Fundamental Mathematics and Mechanics. Understanding Complex Systems*. Springer, 35-50. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4_3
19. Onyshchenko, A., Kovalchuk, V., Voskoboinick, V., Voskoboinyk, A., Aksonov, S., Trudenko, D., & Hrevtsov S. (2024). Establishing patterns of change in the coefficients of reflection, transmission and dissipation of wave energy depending on parameters of a permeable vertical wall. *Eastern-European J. Enterprise Technologies.*, 4/5(130), 46-56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061-2024.309969>
20. Vinogradnyi, G. P., Voskoboinick, V. A., Grinchenko, V. T., & Makarenkov, A. P. (1989). Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder. *J. Fluid Dyn.*, 24(5), 695-700. <https://doi.org/10.1007/BF01051721>

Стаття надійшла до редакції 29.01.2026, надійшла після рецензування 13.03.2026, прийнята 31.03.2026

The article was received 29.01.2026, received after revision 13.03.2026, accepted 31.03.2026

Воскобійник Володимир Анатолійович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України
Адреса робоча: 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2161-6923> **e-mail:** vlad.vsk@gmail.com

Лебідь Олексій Григорович

доктор технічних наук, заступник директора з наукової роботи Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Адреса робоча: 03186, Україна, Київ, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4003-8068> **e-mail:** o.g.lebid@gmail.com

Воскобойник Олександр Анатолійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-4433> **e-mail:** alexandr.vsk@gmail.com

Меренгер Юрій Петрович

аспірант відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-8595-6622> **e-mail:** YuriMer@gmail.com

Воскобойник Софія Ігорівна

студент кафедри інформаційних технологій, штучного інтелекту і кібербезпеки Національного університету харчових технологій

Адреса робоча: 03033, Україна, Київ, вул. Володимирська, 68

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-8829-7588> **e-mail:** ivosk3@gmail.com