

УДК 532.593.5

Volodymyr Voskoboinick, 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

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

Anatolii Kharchenko, Senior engineer electrician of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5832-7714> **e-mail:** kharchenko62@gmail.com

Andrii Voskobiinyk, PhD, Associate professor of the Department of Hydrobionics and Boundary Layer Control of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8045-8625> **e-mail:** andrew.vsk@gmail.com

Institute of Hydromechanics of the National Academy Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

TRANSFORMATION OF WAVE FIELD BY PERMEABLE VERTICAL WALL

Abstract. Laboratory experimental studies were conducted to study the interaction of gravity waves with models of permeable vertical walls, which are formed by piles of circular cross-section. Experiments were conducted in a wave channel, where waves of different height, period and wavelength were generated. Visual studies using video and photo equipment and instrumental studies using piezoresistive wave height sensors and wave pressure fluctuation sensors were performed. The use of a group of sensors made it possible to determine the spatio-temporal characteristics of the wave field and the features of the transformation of waves during their interaction with continuous and permeable vertical walls. Statistical methods of processing and analyzing experimental data made it possible to obtain integral and spectral characteristics of wave motion both in front of the vertical wall and behind it. It was established that the heights of waves in front of the permeable vertical wall and the heights of reflected waves increase with a decrease in wall permeability and wavelength and an increase in the frequency of the wave field. It was determined that the power spectral densities of wave pressure fluctuations have the highest values immediately in front of the frontal part of the vertical wall, and these levels decrease as the permeability of the wall increases. A particularly significant increase in the levels of pressure fluctuations was observed in the high-frequency region, which is due to the action of high-frequency small-scale pressure sources, which are small-scale components of the wave motion generated during the interaction of the incoming wave with the vertical wall. The results of research showed that a permeable vertical wall with piles of a circular cross section is a sufficiently effective protective structure that significantly reduces the penetration of storm waves into the protected water area, especially in conditions of low permeability, this design also allows improving environmental conditions and significantly saving material resources during construction coastal protection structure.

Key words: gravitational wave, permeable breakwater, experimental research, high wave sensors, reflection and transmission waves, spectral levels.

В.А. Воскобійник, О.А. Воскобойник, А.Г. Харченко, А.В. Воскобійник

Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

ТРАНСФОРМАЦІЯ ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ ПРОНИКНОЮ ВЕРТИКАЛЬНОЮ СТІНКОЮ

Анотація. Проведено лабораторні експериментальні дослідження з метою вивчення взаємодії гравітаційних хвиль з моделями проникних вертикальних стінок, які утворені палями кругового поперечного перерізу. Досліди проводилися у хвильовому каналі, де генерувалися хвилі різної висоти, періоду та довжини хвилі. Були виконані візуальні дослідження із застосуванням відео- і фотоапаратури та інструментальні дослідження з використанням п'єзореzystивних датчиків висоти хвиль та датчиків пульсацій хвильового тиску. Використання групи датчиків дозволило визначити просторово-часові характеристики хвильового поля та особливості трансформації хвиль під час їх взаємодії з суцільними та проникними вертикальними стінками. Статистичні методи обробки і аналізу експериментальних даних дали можливість отримати інтегральні та спектральні характеристики хвильового руху як перед вертикальною стінкою, так і позаду неї. Установлено, що висоти хвиль перед проникною вертикальною стінкою та висоти відбитих хвиль збільшуються зі зменшенням проникності стінки і довжини хвиль та збільшенням частоти хвильового поля. Визначено, що спектральні густини потужності пульсацій хвильового тиску мають найбільші значення безпосередньо перед фронтальною частиною вертикальної стінки і зі збільшенням проникності стінки ці рівні зменшуються. Особливо значне збільшення рівнів пульсацій тиску спостерігалось в області високих частот, що обумовлено дією високочастотних дрібномасштабних джерел тиску, якими є дрібномасштабні складові хвильового руху, що генеруються під час взаємодії прийдешньої хвилі з вертикальною стінкою. Результати досліджень показали, що проникна вертикальна стінка з палями кругового поперечного перетину є достатньо ефективною захисною спорудою, що суттєво зменшує проникнення штормових хвиль у захищену акваторію, особливо в умовах незначної проникності, також ця конструкція дозволяє поліпшити екологічні умови та значно зекономити матеріальні ресурси під час будівництва берегозахисної споруди.

Ключові слова: гравітаційна хвиля, проникний хвилелом, експериментальні дослідження, датчики висоти хвиль, відбиті та проникні хвилі, спектральні рівні.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.106-121>

Вступ

У прибережних областях здійснюється будівництво та експлуатація великої кількості гідротехнічних споруд, причалів, зон та баз відпочинку. Основна проблема розвитку цих областей та прибережних акваторій – це захист берегів, гаваней та морської інфраструктури. Засоби захисту повинні мати високу ефективність, підвищену екологічну безпеку і бути найбільш надійними і, по можливості, дешевими. Існує багато типів прибережних захисних споруд. Це греблі, буни, берми, хвилеломи та штучні пляжі, бухти, гавані. Захисні споруди активного, пасивного чи комплексного типу дії повністю або частково

захищають прибережні споруди та берегову зону. Ці споруди будуються у вигляді суцільних, переривчастих і проникних стін, похилих дамб і хвилеломів, заглиблених, плавучих і конструкцій, що виступають над поверхнею моря.

Залежно від виду споруди, її розташування в морській акваторії, принципу і механізму дії хвильове поле частково або повністю відбивається від споруди, трансформується і проникає через неї, зменшуючи хвильові навантаження на об'єкти, що захищаються. Берегозахисні споруди впливають на переміщення донних відкладень, змінюють циркуляцію прибережної течії та екологічну обстановку в акваторії, що захищається. Хвилі і дамби є найбільш широко використовуваними берегозахисними спорудами. Хвилеломи встановлюються паралельно або перпендикулярно до берега для забезпечення безпечного плавання в гавані та захисту берегової лінії від ерозії. Дамби споруджуються вздовж берегової лінії для захисту берега, зменшення ерозії берегової лінії та впливу нагонів та хвиль на прибережну інфраструктуру.

Дія гідродинамічного тиску на стінку хвилелому приводить до появи значних навантажень на споруду. Щоб витримати такі навантаження, споруди робляться масивними та міцними із застосуванням великих капітальних вкладень [1, 2]. Екологічні обмеження та зростаючі витрати на будівництво берегозахисних споруд, наприклад, вертикальних або похилих хвилеломів, вимагають розгляду альтернативних рішень традиційним повністю захисним спорудам. Для подолання вищезазначених проблем застосовуються проникні хвилеломи. Такий хвилелом зменшує відбиття хвиль, що набігають, відносно суцільної вертикальної стінки, забезпечує часткове проходження хвиль прийнятного рівня в акваторію, що захищається, а також дозволяє обмінюватися рідиною між відкритим морем і захищеною областю. Крім того, проникна стінка дає можливість безперешкодно переміщатися морській фауні та формує течії, які впливають на переміщення донних відкладень та забруднень на поверхні захищеної акваторії [3-5].

На висоту хвиль, що проникають через хвилелом, діаметр палі мало впливає, а більший вплив робить ширина зазору. Так, наприклад, зменшення ширини зазору з 20% до 10% знизило значення коефіцієнта пропускання або трансформації хвилі (C_T) на 30% [6, 7]. Крім того, коефіцієнт пропускання хвилі зменшується зі збільшенням крутизни хвилі (h_i / λ), де h_i – висота прийдешньої хвилі, λ – довжина хвилі. У роботі [8] показано, що пористість стінки близько 20% забезпечує мінімальне відбиття хвилі. У роботі [9] встановлено, що коефіцієнт пропускання хвилі виявився функцією кількості щільних стінок, пористості, орієнтації, крутизни хвилі, відносної глибини та зазору між стінками. У роботі [10] показано, що хвилелом із квадратними палями на 20-25% ефективніше, ніж із круглими палями. У роботі [11] досліджували зигзагоподібний хвилелом і показали, що значно зменшилося хвильове навантаження та коефіцієнт відбиття хвилі (C_R).

Результати розрахунків та вимірювань коефіцієнтів трансформації хвилі [12-14] показали, що зі збільшенням kH , де $k = 2\pi / \lambda$ – хвильове число та H – глибина води, коефіцієнт відбиття хвилі збільшується, а коефіцієнт проходження хвилі навпаки зменшується. Це вказує на те, що довгі хвилі мало трансформуються таким хвилеломом. Збільшення пористості призводить до

збільшення течії через хвилелом, а також зменшення C_R та збільшення C_T . Збільшення крутизни хвилі призводить до зниження коефіцієнта проходження хвилі та збільшення коефіцієнта відбиття хвилі [15, 16]. Це пов'язано зі збільшенням дисипації енергії всередині хвилелому при вищій крутизні хвилі і узгоджується з тенденціями, описаними [17-19] для повністю зануреного хвилелому.

Під час проходження хвиль через щілини виникають великі градієнти тиску між навітряною та підвітряною сторонами хвилелому та утворюються течії з високими горизонтальними швидкостями. Максимальні градієнти тиску та, відповідно, максимальні швидкості течії спостерігаються під час підходу хвильового гребня та западини хвилі.

У роботі [20] показали, що пропускання хвилі зменшується практично лінійно зі збільшенням висоти хвилі і трохи вище для похилих щілинних стінок, ніж для вертикальних щілинних стінок. У роботі [21] показали, що похилі пористі стінки розсіюють більше енергії хвиль і зменшують коефіцієнт відбиття більш ефективно, ніж вертикальні щілинні стінки [22].

Існує дві точки зору на оцінку взаємодії хвиль з вертикальними суцільними та проникними хвилеломами. Першим є метод потенційної течії, який ґрунтується на розрахунку потенційної функції для відповідних граничних умов [1, 23-25]. Цей метод ґрунтується на рівняннях збереження енергії, кількості руху та маси. У цій теорії хвильове навантаження на конструкцію визначається максимальною горизонтальною швидкістю течії рідини через щілини та пори споруди з найбільшим градієнтом тиску. Другий метод заснований на принципі втрати напору в процесі протікання рідини через конструкцію [26-29].

Мета роботи – вивчення особливостей взаємодії морських хвиль з моделями берегозахисних споруд проникного типу у вигляді вертикальних стінок.

Програма та методика досліджень

Визначення особливостей трансформації гравітаційних хвиль поблизу проникних вертикальних стінок 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 [30-32]. Для виконання цих наукових робіт було створено експериментальний стенд на базі хвильового каналу і досліди проводилися в лабораторних умовах.

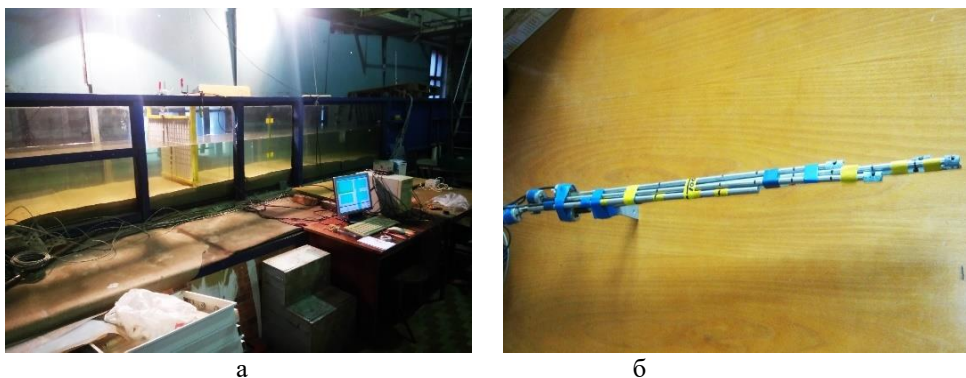


Рис. 1. Експериментальний стенд (а) та п'єзорезистивні датчики висоти хвиль (б)

Експерименти проводилися в хвильовому каналі довжиною близько 50 м, де на відстані близько 40 м від щитового генератора хвиль було зроблено вимірювальну ділянку. 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 в залежності від виконуваних дослідних робіт. Бокові стінки каналу були виготовлені з протиударного скла для проведення візуальних досліджень та відеофотозйомки. Ширина каналу складала 1,0 м і висота каналу була також 1,0 м.

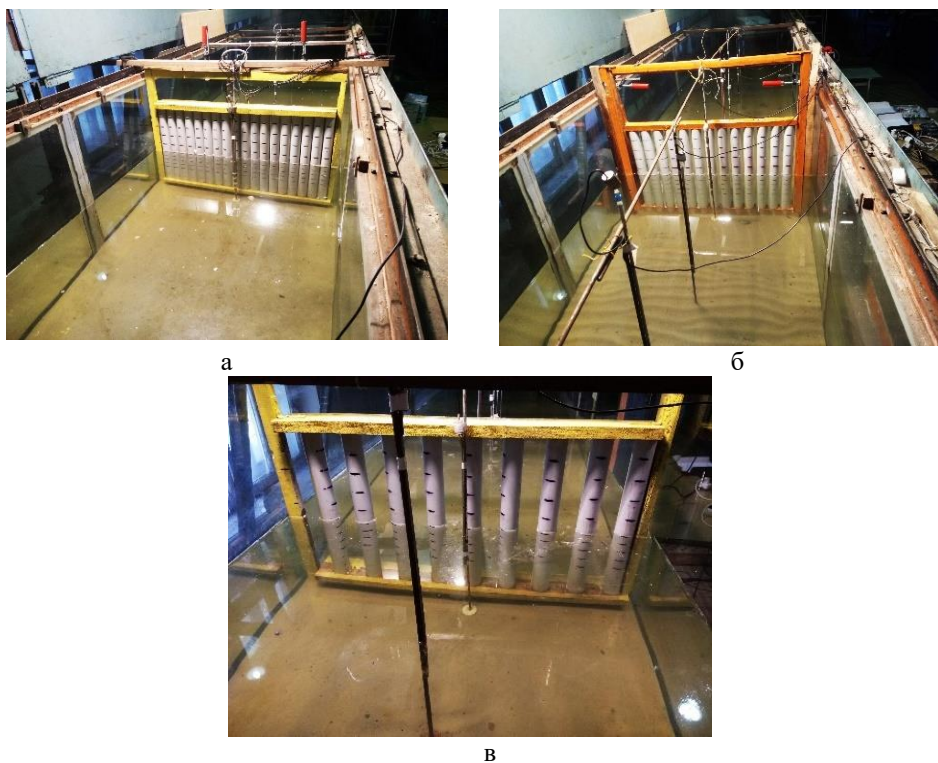


Рис. 2. Фотографії моделей пальових проникних вертикальних стінок: суцільна стінка (а), стінка проникністю 20% (б) та проникністю 50% (в)

Експериментальний стенд було обладнано контрольно-вимірною апаратурою, датчиками, координатними пристроями, системами фіксації датчиків, апаратурою реєстрації даних, комп'ютерною технікою [33, 34]. Вимірювання висоти хвиль, а також хвильового тиску було здійснено за допомогою п'єзореzystивних датчиків динамічного тиску, фотографію яких наведено на рис. 16. П'єзореzystивні датчики динамічного тиску вимірювали тиск у тонкостінних трубках, які було занурено під поверхню води. Під дією хвильового поля тиск в трубках змінювався у відповідності до параметрів хвиль і реєструвався цими високочотними (чутливість 2 Па) датчиками [35, 36].

Експериментальні дослідження впливу проникних вертикальних стінок на трансформацію гравітаційних хвиль проводилися в лабораторних умовах у хвильовому каналі з вертикальними стінками пальового типу з палями кругового поперечного перерізу. Моделі пальових конструкцій мали різну проникність і розташовувалися перпендикулярно напрямку руху хвиль від генератора хвиль щитової конструкції. Приклади проникних вертикальних стінок наведені на рис. 2.

На цих фотографіях разом з моделями суцільної вертикальної стінки (рис. 2а) та проникних вертикальних стінок проникністю 20% (рис. 2б) і проникністю 50% (рис. 2в) показані п'єзореzystивні датчики висоти хвиль, які розташовані як перед вертикальними спорудами, вимірюючи висоти прийдешньої та відбитої хвилі, так і позаду них, вимірюючи висоти проникної хвилі.

Результати візуальних досліджень, фото- та відеоматеріал оброблявся за допомогою спеціально створеної графічної комп'ютерної станції, де матеріали візуальних досліджень оброблялися та аналізувалися за допомогою спеціальних програм і алгоритмів, які дозволяли як прискорити, так і загальмувати зареєстровані відеокадри або зробити покадровий аналіз [37, 38].

Відфільтровані та підсилені електричні сигнали датчиків висоти хвиль і пульсації тиску (в досліді одночасно було задіяно 8 датчиків) поступали на 16-канальний аналогово-цифровий перетворювач, який було підключено до комп'ютера. Результати досліджень реєструвалися на стаціонарному (див., рис. 1а) або персональному комп'ютері з використанням вбудованого або виносного АЦП. 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 виконувалися 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.

Результати досліджень

Візуальні дослідження та результати відеофотозйомок дозволили визначити якісні характеристики поведінки хвильового поля в околі досліджуваних моделей вертикальних стінок. Приклади взаємодії гравітаційних хвиль з проникними вертикальними стінками наведено на рис. 3 та на рис. 4. На рис. 3 наведені фотографії проходження гребня гравітаційної хвилі (рис. 3а) та її підшви (рис. 3б) через проникну вертикальну стінку проникністю 20%.

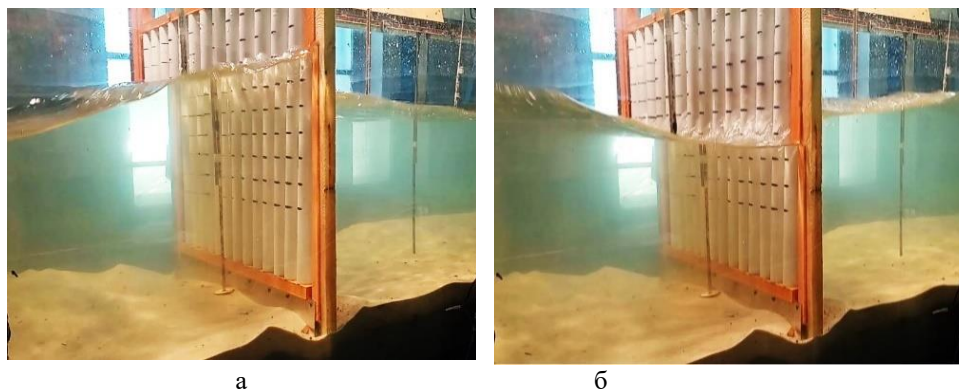


Рис. 3. Проходження гребня (а) та впадини (б) гравітаційної хвилі через проникну вертикальну стінку проникністю 20%

Результати досліджень показали, що для такої проникної стінки висоти гребня перед стінкою та позаду неї суттєво відрізняються, що обумовлено дією стінки як вертикального однорядного проникного хвилелому.

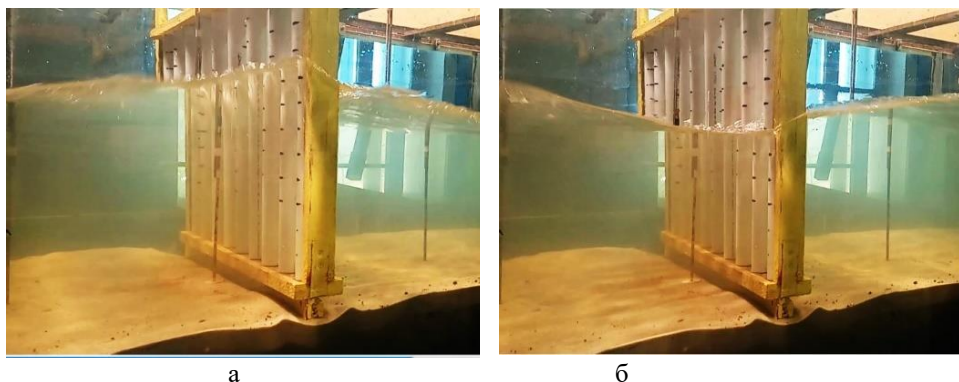


Рис. 4. Проходження гребня (а) та впадини (б) гравітаційної хвилі через проникну вертикальну стінку проникністю 50%

В момент взаємодії підосви прийдешньої хвилі з проникною стінкою спостерігалось значне перетікання рідини з кормової частини стінки в її фронтальну частину, як показано на рис. 3б. Треба зауважити, що значне перетікання рідини через щілини проникної стінки також спостерігалось під час взаємодії гребня хвилі зі стінкою, але в протилежному напрямку. Як показано на цих фотографіях, висоти хвиль перед проникною стінкою значно перевищують висоти проникних хвиль через досліджувану модель вертикальної стінки.

На рис. 4 наведені фотографії трансформації гравітаційної хвилі під час її взаємодії з проникною вертикальною стінкою проникністю 50%. Механізм взаємодії хвиль з такою стінкою подібний тому, що спостерігався для вертикальної стінки проникністю 20%. Але різниця у висотах хвиль перед фронтальною частиною стінки і її кормовою частиною значно зменшилася. Така стінка має менший хвильовий або гідравлічний опір і вона менше захищає прибережну зону від дії хвильового руху.

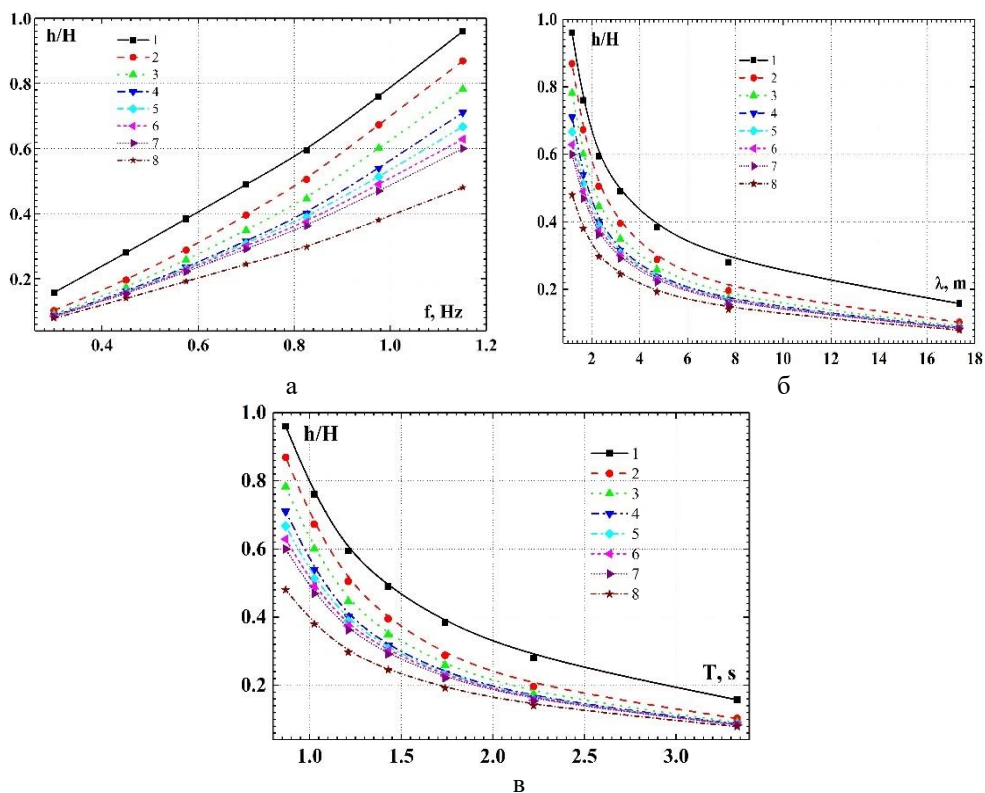


Рис. 5. Висоти хвиль перед проникними вертикальними стінками різної проникності в залежності від частоти прийдешньої хвилі (а), довжини хвиль (б) та їх періоду (в)

Якісні результати досліджень, які отримані з візуальних спостережень, відеофотозйомок, були підтверджені в результаті кількісних вимірювань хвильового поля за допомогою датчиків висоти хвиль та хвильового тиску, що розташовувалися вздовж поздовжньої осі хвильового каналу в околі досліджуваних моделей вертикальних стінок.

Результати вимірювання висоти хвилі поблизу суцільної та проникної вертикальної стінки, яку було утворено за допомогою циліндричних паль кругового поперечного перерізу показали, що перед стінкою та позаду неї на відстані близько діаметра палі висоти хвиль суттєво відрізняються від висоти прийдешньої хвилі. Так, на рис. 5 наведені результати вимірювання висот хвиль, нормованих глибиною каналу (h/H), перед вертикальною стінкою різної проникності в залежності від частоти хвиль, їх довжини та періоду. Тут крива 1 виміряна для суцільної вертикальної стінки (проникність 0%), крива 2 – для стінки проникністю 10%, крива 3 – 20%, крива 4 – 30%, крива 5 – 40%, крива 6 – 50%, крива 7 – 60% і крива 8 наводить результати вимірювання висоти для прийдешньої хвилі.

Рис. 5а – це висоти хвиль в залежності від частоти хвилі. Результати досліджень показали, що перед вертикальною стінкою висоти хвиль значно перевищують висоту прийдешньої хвилі і ця різниця збільшується зі збільшенням частоти хвильового поля. Зменшення проникності вертикальної стінки призводить до збільшення різниці перед стінкою відносно висоти прийдешньої хвилі.

Рис. 5б – це висоти хвиль в залежності від довжини хвилі. Зі збільшенням довжини прийдешньої хвилі висоти хвиль перед вертикальною стінкою зменшуються, особливо для стінок великої проникності. Подібна тенденція спостерігається і для висоти хвиль перед вертикальною стінкою в залежності від періоду хвиль (див., рис. 5в).

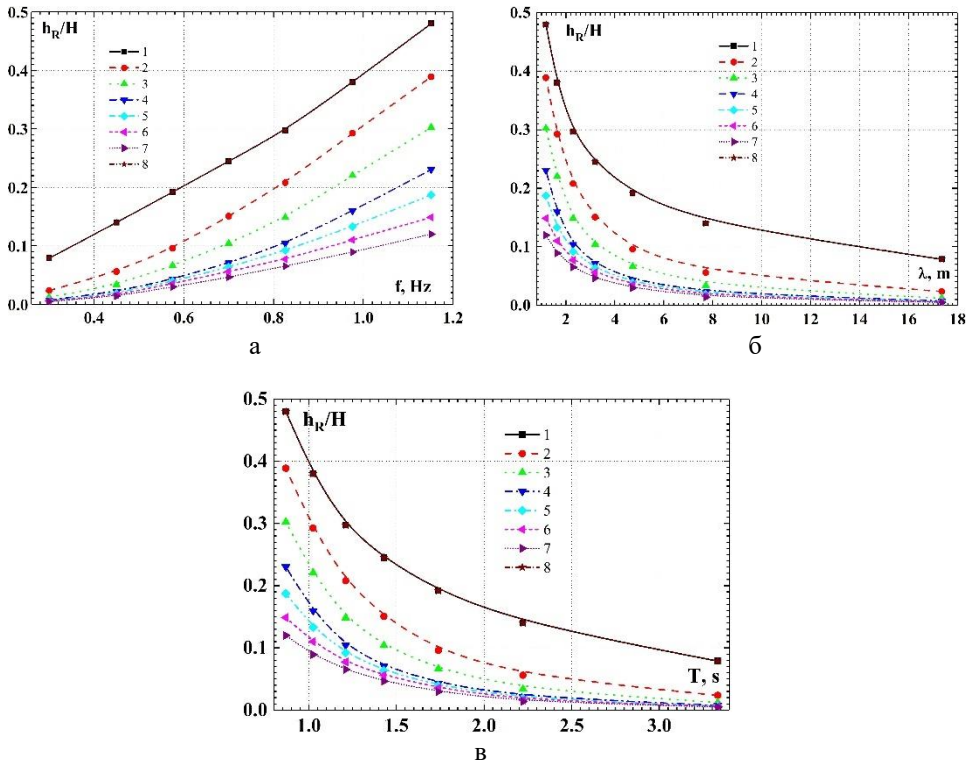


Рис. 6. Висоти відбитих хвиль перед проникними вертикальними стінками різної проникності в залежності від частоти прийдешньої хвилі (а), довжини хвиль (б) та їх періоду (в)

Залежності висоти відбитої хвилі на відстані довжини хвилі від вертикальної стінки, які визначалися як $h_R = h - h_i$ та нормованої глибиною каналу (h_R / H), представлені на рис. 6 в залежності від частоти хвиль, їх довжини та періоду. Тут крива 1 виміряна для суцільної вертикальної стінки (проникність 0%), крива 2 – для стінки проникністю 10%, крива 3 – 20%, крива 4 – 30%, крива 5 – 40%, крива 6 – 50%, крива 7 – 60% і крива 8 наводить результати вимірювання висоти для прийдешньої хвилі.

Результати досліджень показали, що висоти відбитих хвиль практично дорівнюють висотам прийдешніх хвиль на відстані однієї довжини хвилі перед вертикальною суцільною стінкою, що витікає із співставлення кривих 1 та 8 на рис. 6. Зі збільшенням проникності вертикальної стінки висоти відбитих хвиль суттєво стають меншими, ніж висоти прийдешніх хвиль. При цьому зі збільшенням частоти хвиль або зменшенням її довжини та періоду різниця висот відбитої та прийдешньої хвилі збільшується (див., рис. 6а, рис. 6б та рис. 6в, відповідно).

Оцінку впливу проникності вертикальних стінок на висоти проникних хвиль, нормованих глибиною каналу (h_T / H), можна отримати під час аналізу результатів вимірювання висот проникних хвиль позаду вертикальних стінок в залежності від частоти, довжини та періоду прийдешньої хвилі, що показано на рис. 7.

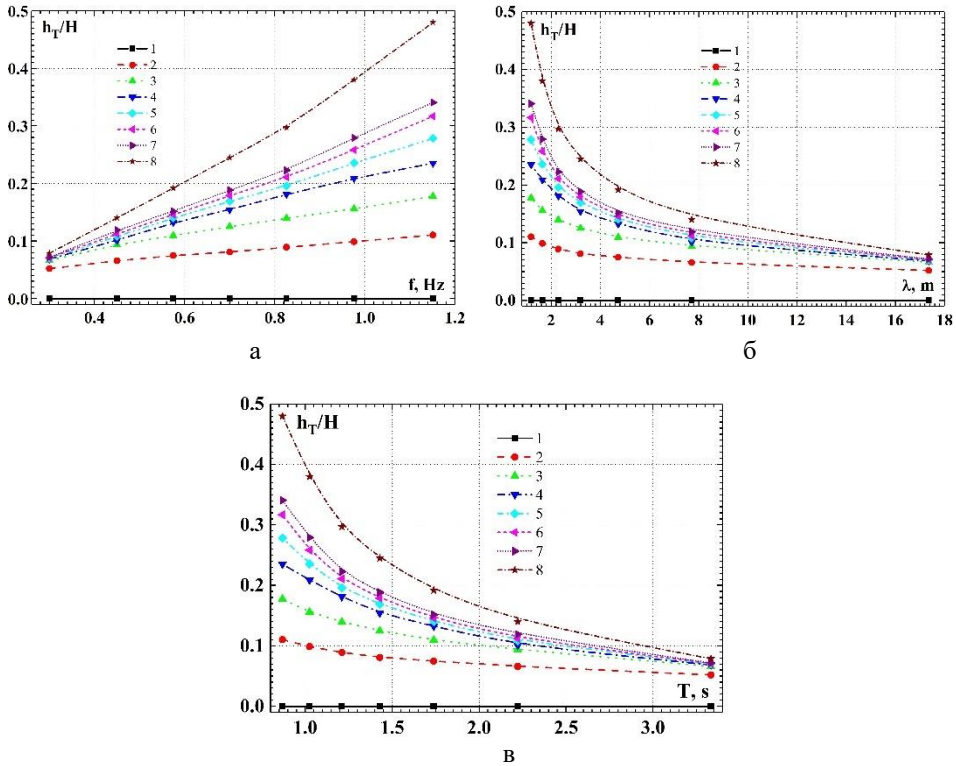


Рис. 7. Висоти проникних хвиль позаду проникних вертикальних стінок різної проникності в залежності від частоти прийдешньої хвилі (а), довжини хвиль (б) та їх періоду (в)

Результати досліджень показали, що висота проникної хвилі збільшується зі збільшенням проникності стінки, особливо зі збільшенням частоти хвилі або зменшенням її довжини чи періоду, як показано на рис. 7а, рис. 7б та рис. 7в, що корелює з результатами спостережень [39-42].

Результати досліджень висот хвильового поля, нормованих глибиною каналу (h/H), в околі суцільної вертикальної стінки (див., рис. 2а) та поля пульсацій хвильового тиску перед такою стінкою показані на рис. 8. Досліди проводилися для наступних умов хвильового поля: період хвиль – $T = 1.05$ с; довжина прийдешньої хвилі – $h_i = 0.192$ м; довжина хвилі – $\lambda = 1.73$ м; швидкість хвилі – $U_w = 1.64$ м/с. Крива 1 виміряна на відстані -1.0λ перед суцільною стінкою, крива 2 отримана для відстані -0.25λ , крива 3 для відстані -0.001λ також перед стінкою.

Під час накочування гравітаційної хвилі на суцільну вертикальну стінку найбільша висота хвилі спостерігалася поблизу фронтальної поверхні стінки і складала близько 0,4 м, що майже вдвічі більше, ніж висота прийдешньої хвилі (див., рис. 8а).

Спектральні густини потужності пульсацій хвильового тиску перед суцільною вертикальною стінкою наведені на рис. 8б. Дослідження показали, що найбільші рівні пульсацій хвильового тиску спостерігалися безпосередньо перед фронтальною частиною суцільної стінки (крива 3 на рис. 8б), де прийдешня хвиля взаємодіє зі стінкою, утворюючи відбиту хвилю. Найменші рівні пульсацій тиску мали місце на відстані однієї довжини хвилі перед суцільною вертикальною стінкою (крива 1). З наближенням до фронтальної стінки інтенсивність поля пульсацій тиску збільшується в області високих частот. Цей діапазон спектральних рівнів обумовлений дією височастотних дрібномасштабних джерел тиску, якими є дрібномасштабні складові хвильового руху, що генеруються взаємодією прийдешньої хвилі з суцільною стінкою.

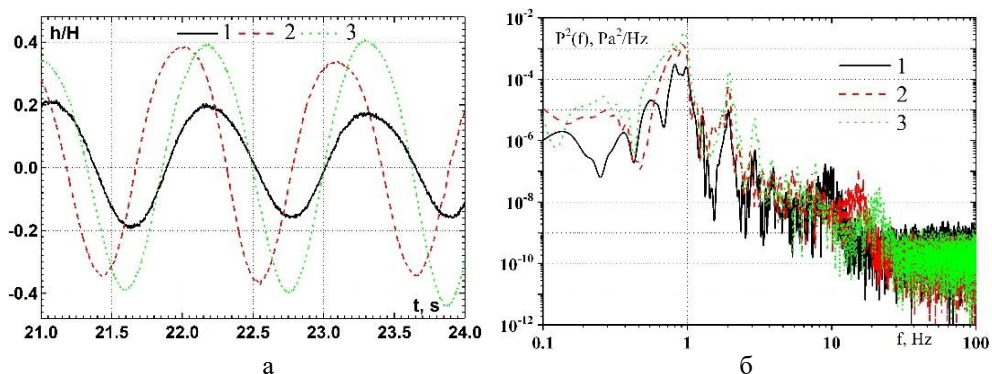


Рис. 8. Форма гравітаційних хвиль (а) та спектральні щільності потужності пульсацій хвильового тиску (б) в околі суцільної вертикальної стінки

Результати досліджень висот хвильового поля, нормованих глибиною каналу (h/H), в околі проникних вертикальних стінок та поля пульсацій хвильового тиску вертикальної стінки проникністю 20% показані на рис. 9. Досліди проводилися для наступних умов хвильового поля: період хвиль – $T = 1.14$ с; довжина прийдешньої хвилі – $h_i = 0.165$ м; довжина хвилі – $\lambda = 2.03$ м; швидкість хвилі – $U_w = 1.78$ м/с. Крива 1 виміряна на відстані -1.0λ перед проникною стінкою, крива 2 отримана для відстані -0.25λ , крива 3 для відстані -0.001λ також перед стінкою і крива 4 отримана для вимірювань позаду проникної стінки на відстані 1.0λ .

Як показано на рис. 9а, найбільші висоти хвиль (близько 0,25 м) спостерігалися поблизу фронтальної стінки (крива 3), що майже у 1,5 раза більше, ніж висота прийдешньої хвилі. Позаду проникної вертикальної стінки висота проникної хвилі менша майже в (6-7) разів, ніж висота відбитої хвилі поблизу фронтальної стінки, що вказує на ефективність використання конструкції такого хвилелому в якості берегозахисної споруди.

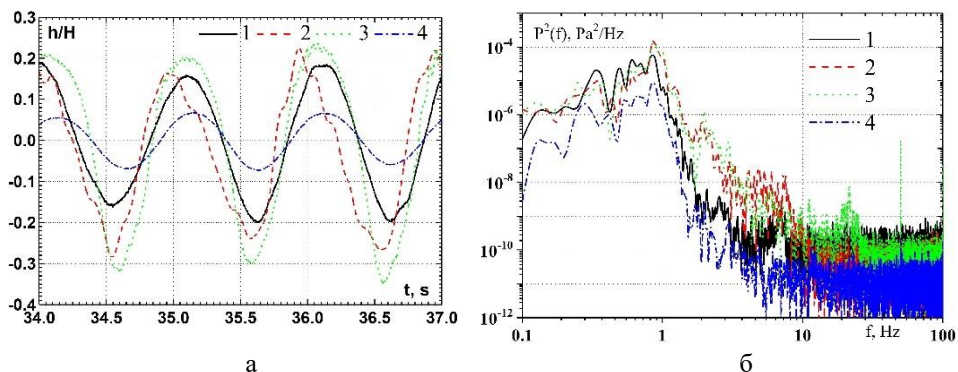


Рис. 9. Форма гравітаційних хвиль (а) та спектральні щільності потужності пульсацій хвильового тиску (б) в околі вертикальної стінки проникністю 20%

Результати досліджень поблизу проникної вертикальної стінки проникністю 50% показані на рис. 10. Досліди проводилися для наступних умов хвильового поля: період хвиль – $T = 1.18$ с; висота прийдешньої хвилі – $h_i = 0.157$ м; довжина хвилі – $\lambda = 2.18$ м; швидкість хвилі – $U_w = 1.85$ м/с. Крива 1 виміряна на відстані -1.0λ перед проникною стінкою, крива 2 отримана для відстані -0.25λ , крива 3 для відстані -0.001λ також перед стінкою і крива 4 отримана для вимірювань позаду проникної стінки на відстані 1.0λ .

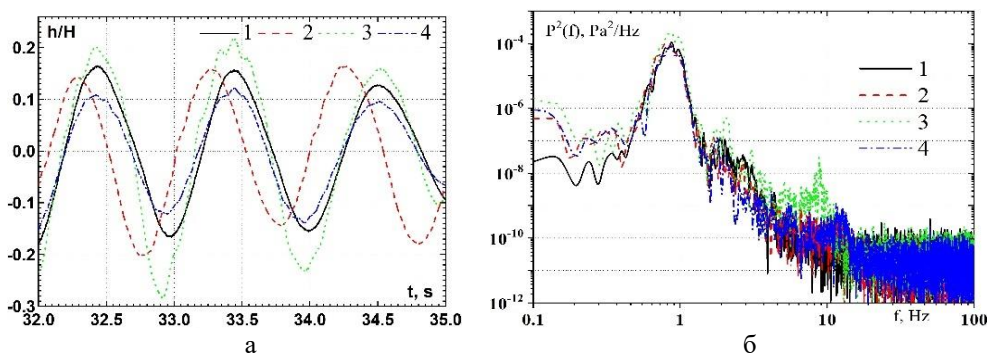


Рис. 10. Форма гравітаційних хвиль (а) та спектральні щільності потужності пульсацій хвильового тиску (б) в околі вертикальної стінки проникністю 50%

Як показано на рис. 10а, найбільші висоти хвиль (близько 0,2 м) спостерігалися поблизу фронтальної стінки (крива 3), що майже у 1,3 раза більше, ніж висота прийдешньої хвилі. Але для такої конструкції висота проникної хвилі достатньо значна і така проникна вертикальна стінка не значно захистить берегові споруди від дії хвильового руху.

Результати досліджень показали, що незалежно від проникності вертикальної стінки з наближенням до фронтальної частини стінки інтенсивність поля пульсацій тиску збільшується в області високих частот, де відбувається взаємодія прийдешньої хвилі зі стінкою та генерація інтенсивних дрібномасштабних хвильових структур.

Висновки

Результати експериментальних досліджень показали, що:

1. Проникна вертикальна стінка з палями кругового поперечного перетину є достатньо ефективною захисною спорудою, що суттєво зменшує проникнення штормових хвиль у захищену акваторію, особливо в умовах незначної проникності, також ця конструкція дозволяє поліпшити екологічні умови та значно зекономити матеріальні ресурси під час будівництва берегозахисної споруди.

2. Установлено, що висоти хвиль перед проникною вертикальною стінкою та висоти відбитих хвиль збільшуються зі зменшенням проникності стінки та збільшенням частоти хвильового поля. Зі збільшенням довжини прийдешніх хвиль ці висоти навпаки зменшуються.

3. Показано, що залежності проникних через вертикальну стінку хвиль навпаки зменшуються зі зменшенням проникності стінки та збільшуються з ростом частоти хвиль і зменшуються зі збільшенням довжини прийдешніх хвиль.

4. Визначено, що спектральні густини потужності пульсацій хвильового тиску мають найбільші значення безпосередньо перед фронтальною частиною суцільної стінки і зі збільшенням проникності стінки ці рівні зменшуються. Особливо значне збільшення рівнів пульсацій тиску спостерігалось в області високих частот, що обумовлено дією високочастотних дрібномасштабних джерел тиску, якими є дрібномасштабні складові хвильового руху, що генеруються під час взаємодії прийдешньої хвилі з вертикальною стінкою.

REFERENCES

1. Choopanizade, M. J., Bakhtiari, M., & Rostami, M. (2020). Wave transmission through the perforated half-depth block-made wall breakwater: An experimental study. *Ocean Engineering*, 215, 107895-1-9. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107895>
2. 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>
3. Selezov, I. T., Kryvonos, Yu. G., & Gandzha, I. S. (Eds.) (2018). Wave propagation and diffraction. Mathematical methods and applications. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4923-1>
4. Sathyanarayana, A. H., Suvama, P. S., Banagani, V. K. Y., Umesh, P., & Shirlal, K. G. (2024). Investigating the wave attenuation capabilities of rectangular pile head breakwater: A physical modelling approach. *Ocean Eng.*, 298, 117251. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117251>
5. Sundar, V., Sannasiraj, S. A., Sriram, V., & Nowbuth, M. D. (Eds.) (2021). Proceedings of the Fifth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2019), Lecture Notes in Civil Engineering 106. Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8506-7>
6. Herbich, J. B. (1989). Wave transmission through a double-row Pile breakwater. Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, Chapter 165, Torremolinos, Spain.
7. Nurzaman, L., Juwono, P. T., Dermawan, V., & Wijatmiko, I. (2024). Wave transmission coefficient of inclined pile breakwater based on a physical model. *J. Law and Sustainable Develop.*, 12(2), e02911. <https://doi.org/10.55908/sdgs.v12i2.2911>
8. Cox, R. J., Horton, P. R., & Bettington, S. H. (1998). Double walled low reflection wave barriers. Proc. International conference on Coastal Engineering, Copenhagen, June 22-26, 2221-2234.

9. Hall, K., & Thomson, G. (2001). Prediction of wave transmission through single and multiple wave screens. *Proceedings of International Conference on Breakwaters, coastal structures and coastlines*, ICE, Thomas Telford Publishers, London, 421-432.
10. Koraim, A. S. (2005). Suggested model for the protection of shores and marina. Ph.D. thesis in Civil Eng., Zagazig University, Zagazig, Egypt.
11. Mani, J. S. (2009). Experimental and numerical investigations on zigzag porous screen breakwater. *J. Natural Hazards*, Springer Netherlands, 49(2), 401-409.
12. Ahmed, H. (2011). Wave Interaction with Vertical Slotted Walls as a Permeable Breakwater. PhD Thesis.
13. Alturfi, U. A. S. M., & Shukur, A.-H. K. (2024). Investigation of energy dissipation for different breakwater based on computational fluid. *CFD Letters*, 16(1), 22-24. <https://doi.org/10.37934/cfdl.16.1.2242>
14. Sun, H., Bai, J., Ding, W., Zhao, X., & Fan, Y. (2024). Numerical simulation on hydrodynamic performance of perforated caisson breakwater with slotted shoreward wall. *Ocean Eng.*, 299, 117294. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117294>
15. Isaacson, M., Premasiri, S., & Yang, G. (1998). Wave interactions with vertical slotted barrier. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 124, 118-126. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1998\)124:3\(118\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1998)124:3(118))
16. Poguluri, S. K., & Cho, I. H. (2021). Wave dissipation over a horizontal slotted plate with a leeside vertical seawall: analytical and numerical approaches. *Coastal Eng.*, 63(1), 52-67. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1850396>
17. Grone, J., & Kohlhasse, S. (1974). Wave transmission through vertical slotted walls. *Proc., 14th Coast. Eng. Conf., ASCE*, 3, 1906-1923.
18. Urashima, S., Ishizuka, K., & Kondo, H. (1986). Energy dissipation and wave force at slotted wall. *Proc., 20th Coast. Eng. Conf., ASCE*, 3, 2344-2352.
19. Kriebel, D. L. (1992). Vertical wave barriers: Wave transmission and wave forces. *23rd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE*, 2, 1313-1326.
20. Muttray, M., & Oumeraci, H. (2002). Wave transformation at sloping perforated walls. In *Solving Coastal Conundrums*; Institution of Civil Engineers: London, UK, 247.
21. Mallayachari, V., & Sundar, V. (1994). Reflection characteristics of permeable seawalls. *Coast. Eng.*, 23, 135-150. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(94\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0378-3839(94)90019-1)
22. Alkhalidi, M., Alanjari, N., & Neelamani, S. (2020). Wave Interaction with single and twin vertical and sloped slotted walls. *J. Mar. Sci. Eng.*, 8, 589-1-23. <https://doi.org/10.3390/jmse8080589>
23. Jun, L., Gao, L., & Jianbo, L. (2012). Short-crested waves interaction with a concentric cylindrical structure with double-layered perforated walls. *Ocean Eng.*, 40, 76-90. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.12.011>
24. Mohammadbagheri, J., Salimi, F., & Rahbani, M. (2019). Applying finite difference method to simulate the performance of a perforated breakwater under regular waves. *J. Mar. Sci. Appl.*, 3, 314-324. <https://doi.org/10.1007/s11804-019-00095-5>
25. Venkateswarlu, V., & Karmakar, D. (2019). Numerical investigation on the wave dissipating performance due to multiple porous structures. *ISH J. Hydraul. Eng.*, 3, 314-324. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1615393>
26. Liu, P. L., & Abbaspour, M. (1982). Wave scattering by a rigid thin barrier. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Div.*, 108(4), 479-491. <https://doi.org/10.1061/JWPCDX.0000319>
27. Lopez, I., Rosa-Santos, P., Moreira, C. & Taveira-Pinto, F. (2018). RANS-VOF modelling of the hydraulic performance of the LOWREB caisson. *Coastal Eng.*, 140, 161-174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.07.006>
28. Jalon, M. L., Lira-Loarca, A., Baquerizo, A., & Losada M. A. (2019). An analytical model for oblique wave interaction with a partially reflective harbor structure. *Coastal Eng.*, 143, 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.10.015>
29. Qiao, W., Wang, K.-H., Duan, W., & Sun, Y. (2018). Analytical model of wave loads and motion responses for a floating breakwater system with attached dual porous side walls. *J. Math. Prob. Eng.*, 14, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2018/1295986>

30. 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
31. Voskoboinick, V., Kornev, N., & Turnow, 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>
32. 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>
33. 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>
34. Voskoboinick, V. A., Voskoboinick, A. V., Areshkovych, O. O., & Voskoboinyk, O. A. (2016). Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. *Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016)* 12-15 September 2016. Oxford, UK, 905-910. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
35. Voskoboinick, V., Onyshchenko, A., Voskoboinyk, O., Makarenkova, A., & Voskoboinyk, 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>
36. 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
37. Voskoboinyk, A. V., Voskoboinick, V. A., Voskoboinyk, O. A., Tereshchenko, L. M., & Khizha, I. A. (2016). Feature of the vortex and the jet flows around and inside the three-row pile group. *Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016)* 12-15 September 2016. Oxford, UK, 897-903. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-114>
38. 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. ICCSEE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1247. Springer, 3-17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_1
39. 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>
40. Pan, X., Wu, D., Liang, B., & Wu, G. (2024). A sectional method to estimate the transmission coefficients of a new type pile-supported permeable breakwater. *Phys. Fluids*, 36, 032127. <https://doi.org/10.1063/5.0200111>
41. Sathyanarayana, A. H., Suvana, P. S., Umesh P., & Shirlal, K. G. (2024). Investigation on innovative pile head breakwater for coastal protection. *Proc IMechE Part M: J Eng. for the Maritime Environ.*, 238(1), 37-56. <https://doi.org/10.1177/14750902231155677>
42. Reddy, M. S., & Neelamani, S. (1992). Wave transmission and reflection characteristics of a partially immersed rigid vertical barrier. *Ocean Eng.*, 19(3), 313-325. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(92\)90032-Y](https://doi.org/10.1016/0029-8018(92)90032-Y)

Стаття надійшла до редакції 15.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 09.09.2024

The article was received 15.05.2024 and was accepted after revision 09.09.2024

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

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

Харченко Анатолій Григорович

головний інженер-електрик 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/0000-0002-5832-7714> **e-mail:** kharchenko62@gmail.com

Воскобійник Андрій Володимирович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу гідробіоніки та керування примезовим шаром Інституту гідромеханіки НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8045-8625> **e-mail:** andrew.vsk@gmail.com