УДК 532.517 https://doi.org/10.31713/vt2202628

Труденко Д. В., (1: ORCID: 0009-0001-3720-1952)
аспірант
Онищенко А. М., (1: ORCID: 0000-0002-1040-4530)
професор, д-р техн. наук
Воскобійник В. А. (2: ORCID: 0000-0003-2161-6923)
д-р техн. наук

[1] Національний транспортний університет
[2] Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАЄМОДІЇ ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ З ПРОНИКНОЮ ВЕРТИКАЛЬНОЮ СТІНКОЮ

Об'єктом дослідження є проникні вертикальні стінки, які використовуються як берегозахисні споруди. Ці споруди використовуються для захисту прибережної інфраструктури, в тому числі житлових будинків, курортних комплексів, інженерних споруд, сільгоспугідь, портової інфраструктури, зон відпочинку, що надзвичайно актуально для приморських країн. В останні роки у розвитку берегозахисних споруд намітилася тенденція використання проникних конструкцій, перевага яких полягає в поліпшенні екології захищеної акваторії, економії будівельних матеріалів і фінансових ресурсів. У проточній воді не накопичується сміття і забезпечується вільна міграція для морських мешканців. Метою роботи є визначення статистичних характеристик взаємодії хвильового руху з проникними вертикальними стінками різної проникності за допомогою експериментальних досліджень у хвильовому каналі. Дослідження виконувалися за допомогою експериментальних методів, які було реалізовано в хвильовому каналі на експериментальному стенді в лабораторних умовах. Стенд було обладнано генератором хвиль та хвилегасниками, контрольно-вимірювальною апаратурою, засобами візуальних та інструментальних досліджень. Усередині хвильового каналу на піщаній основі розташовувалися суцільні та проникні вертикальні стінки колового поперечного перерізу діаметром 0,05 м різної проникності від 0 до 60%. Згенероване хвильове поле мало різні параметри гравітаційних хвиль: висоту початкової хвилі від 0,03 м до 0,14 м, період хвилі від 0,9 с до 2,5 с,

 ISSN 2306-5478

довжину початкової хвилі від 1,3 м до 10 м і частоту від 0,4 Гц до 1,1 Гц.. Отже досліди показали, що перед проникними стінками висоти хвиль були вищі, ніж позаду них, особливо для стінок малої проникності. Перед проникними вертикальними стінками висоти хвиль значно перевищують висоту прийдешньої хвилі і ця різниця збільшується зі збільшенням частоти хвильового поля. В результаті найбільші спектральні рівні пульсацій хвильового тиску мали місце безпосередньо перед фронтальною частиною вертикальної стінки, де прийдешня хвиля взаємодіє зі стінкою, утворюючи відбиту хвилю. Спектральні рівні пульсацій тиску перед проникними вертикальними стінками значно нижчі в області низьких частот, ніж перед суцільною стінкою. Спектральні рівні пульсацій тиску позаду проникних стінок нижчі, ніж перед ними, особливо для малої проникності стінок, а зі збільшенням проникності ця різниця зменшується. Для покращення наших знань з виявлення особливостей взаємодії хвильового поля з проникними стінками потрібні подальші наукові та практичні дослідження з визначення ефективних берегозахисних споруд з екологічних та матеріально-фінансових аспектів.

***Ключові слова*: гравітаційна хвиля, проникна вертикальна стінка, хвилелом, берегозахисна споруда, спектральні рівні, пульсації хвильового тиску**

Постановка проблеми

Захист берегової лінії та прибережної інфраструктури – є надзвичайно актуальним і однією із важливих проблем приморських країн. Хвильове навантаження, особливо в умовах штормового моря, викликає значний вплив на споруди у прибережній області та зони відпочинку. В результаті потепління на Землі через парниковий ефект та розтавання льодовиків відбуваються зміни рівня світового океану, що призводить до природних катаклізмів. Так, при збільшені рівня морів в найближчій перспективі може відбутися трансформація берегів, так як посилюються процеси руйнації берегів (абразії), що пов'язано зі зростанням хвильової енергії моря. Наслідком таких процесів є руйнування всієї прибережної інфраструктури (житлових будинків, курортних комплексів, інженерних споруд, сільгоспугідь, портової інфраструктури, зон відпочинку). Це вимагає неустанної модернізації берегозахисних споруд, всебічного підвищення захисту берегової лінії, об'єктів життєдіяльності, гідротехнічних споруд, морської флори та фауни.

Таким чином, Засоби захисту інфраструктури повинні мати високу ефективність, підвищену екологічну безпеку, надійність та довговічність. Згідно до Морської доктрини України на період до 2035 року [1] про розроблення цільової програми берегоукріплення морського узбережжя, насамперед у районах його інтенсивного використання, існує нагальна потреба у проектуванні та будівництві ефективних з морегосподарської, матеріальної та екологічної точок зору берегозахисних споруд в умовах глобальних змін клімату.

Берегозахисні споруди повинні зменшувати дію хвиль на береговий схил та пляжну полосу, а також регулювати переміщення наносів у прибережній зоні моря з метою збереження та відновлення пляжу, як основного елемента захисту берегів. За способами захисту берегів споруди діляться на дві групи: пасивні або активні берегозахисні споруди. Пасивні берегозахисні споруди сприймають на себе дію хвиль та зменшують їх енергію завдяки своїй конструкції. Активні берегозахисні споруди зберігають пляжі [2] або створюють умови для формування пляжів, зменшуючи енергію, висоту та період штормових хвиль. До пасивних берегозахисних споруд відносяться поздовжні берегоукріплювальні стінки і споруди укісного, напівукісного і ступеневого типів, штучні пляжі, хвилегасячі берми, а також берегові дамби. До числа активних способів захисту відносять поперечні буни, надводні і підводні хвилеломи, банкети, підводні рівчаки, штучні миси, поздовжні берегоукріплювальні хвилерізи та інше. На відкритому морському узбережжі найчастіше застосовується активний метод захисту або споруди комбінованого типу.

Вітрові хвилі та хвильові течії є основними факторами, які впливають на динаміку берегів і на існування живих організмів та рослинності у прибережній зоні. Інтенсивні хвильові рухи у шельфовій зоні виникають внаслідок трансформації енергії хвиль під час їх взаємодії з берегами і дном водойми. Зведення гідротехнічних споруд в береговій зоні суттєво впливає на хід сформованих природних процесів і нерідко змінює характер динаміки берега, стан прибережних вод та біоценозів. В практиці морського гідротехнічного будівництва все частіше застосовують хвилеломи для захисту рекреаційних пляжів та в цілому берегів від розмиву. Фізичні процеси, що мають місце під час взаємодії хвиль із хвилеломом, належать до категорії складних і являються результатом відбиття, трансформації і дисипації енергії хвиль. Взаємодія хвильового руху з берегозахисною спорудою і

ISSN 2306-5478

трансформація гравітаційних або вітрових хвиль викликають суттєві нелінійні і нестаціонарні гідродинамічні процеси, які супроводжуються інтенсивними пульсаціями вихрового і струменевого руху. При цьому просторово-часові характеристики гідродинамічних параметрів мають достатньо широкий спектр у частотній та хвильовій області з формуванням тональних компонент, які відповідають субгармонікам і гармонікам вищих порядків до основної гармоніки хвильового поля [3].

В останні роки у розвитку берегозахисних споруд намітилася тенденція використання проникних конструкцій, перевага яких полягає в поліпшенні екології захищеної акваторії, економії будівельних матеріалів і фінансових ресурсів. У проточній воді не накопичується сміття і забезпечується вільна міграція для морських мешканців. Конструкції проникних берегозахисних споруд відрізняються широким розмаїттям. Критерієм їх ефективності є коефіцієнти пропускання, відбиття та дисипації енергії як регулярних, так і одиночних хвиль [4].

Вирішенню проблеми ефективного використання проникних берегозахисних споруд присвячено наукові та практичні роботи, які виконано за допомогою як чисельного, так і фізичного моделювання. В цих роботах досліджувалися споруди з напівзатопленими суцільними і проникними стінками, щілинними і перфорованими хвилоломами, а також різноманітними пальовими конструкціями [5] Різні теоретичні моделі та алгоритми комп'ютерної гідродинаміки (CFD) були використані в роботах [6, 7]. Проникні хвилеломи досліджувалися в експериментальних роботах із застосуванням регулярних хвиль у роботах [8, 9]. У роботах [10, 11] експериментально та теоретично досліджували гідродинамічну ефективність повністю та напівзавантажених вертикальних щілинних хвилеломів.

Мета роботи – визначення статистичних характеристик взаємодії хвильового руху з проникними вертикальними стінками різної проникності за допомогою експериментальних досліджень у хвильовому каналі.

Програма і методика досліджень. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах на експериментальному стенді, основою якої складав хвильовий канал, обладнаний контрольно-вимірювальною апаратурою, засобами розташування та фіксації експериментальних моделей і засобами відео фотореєстрації візуальних та вимірювання інструментальних

даних. Хвильовий канал довжиною близько 50 м, шириною та глибиною 1 м. Рівень води в каналі змінювався від 0,5 м до 0,7 м. Канал був обладнаний щитовим генератором хвиль та щілинним похилим поглиначом хвиль (в кінці каналу). Усередині каналу на відстані близько 40 м від генератора хвиль встановлювався на плоску піщану основу товщиною 0,2 м проникний хвилелом у вигляді вертикальної щілинної стінки. Рівень води в місці розташування досліджуваних проникних хвилеломів змінювався від 0,3 м до 0,5 м. Бічні стінки каналу були виготовлені зі скла для проведення візуальних досліджень.

Експериментальний стенд був обладнаний контрольно-вимірювальною апаратурою, системою обробки та аналізу експериментальних даних. Вздовж поздовжньої осі каналу перед і позаду щілинної стінки розташовувалися п'єзорезистивні датчики висоти хвилі. В експериментах одночасно використовувалися до 8 датчиків висоти хвилі, серед яких застосовувалися традиційні ємнісні датчики, а також спеціально розроблені та виготовлені п'єзорезистивні датчики [12]. Це високочутливі диференціальні вібро- та термокомпенсовані датчики тиску. У цих датчиках чутливі елементи за допомогою технології мікроелектронної техніки наносилися на тонку кварцову мембрану, що під впливом тиску згиналася, а п'єзорезистивні елементи змінювали свій опір. Посилені електричні сигнали подавалися на багатоканальні аналогово-цифрові перетворювачі.

Виміряні аналогові сигнали подавалися на чотирьох канальні вимірювальні магнітофони типу 7005 фірми Брюль і К'єр (Данія) або багатоканальні (8-ми або 16-ти канальні, в залежності від задачі, яка вирішувалася) АЦП, вбудовані у персональний комп'ютер або виносні. За допомогою контрольно-вимірювальної апаратури та апаратури реєстрації експериментальних даних було створено базу даних, яка оброблялася на спеціальних спектроаналізаторах типу 2031 фірми Брюль і К'єр (Данія) або комп'ютерах. Експериментальні дані оброблялися за стандартними та спеціально розробленими програмами та методиками з використанням апарату теорії ймовірності та математичної статистики [13, 14].

Експерименти проводилися з однорядними щілинними стінками різної проникності, які розташовувалися всередині хвильового каналу паралельно до фронту регулярних хвиль. Стінки були виготовлені із вертикальних циліндрів діаметром 0,05 м. Для співставлення результатів і визначення ефективності проникних

ISSN 2306-5478

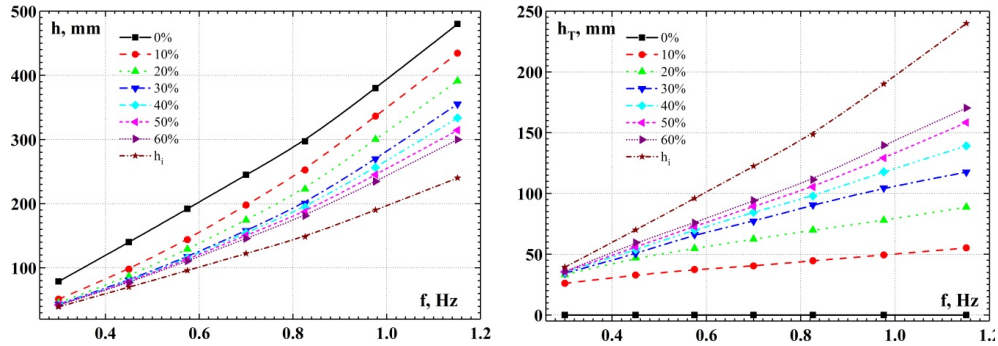
хвилеломів було використано суцільні циліндричні моделі хвилеломів. Вони були зроблені вертикальних циліндрів діаметром 50 мм, які установлювались один повз один без щілин і представляли собою суцільну конструкцію моделі вертикального хвилелому. Всі дослідження у хвильовому каналі були проведені для різних параметрів гравітаційних хвиль висотою початкової хвилі від 0,03 м до 0,14 м, періодом хвилі від 0,9 с до 2,5 с, довжиною початкової хвилі від 1,3 м до 10 м і частотою від 0,4 Гц до 1,1 Гц.

Разом з проведенням інструментальних досліджень за допомогою датчиків висоти хвиль та датчиків хвильового навантаження на досліджувані моделі проникних вертикальних стінок були проведені роботи з візуальних досліджень хвильового руху за допомогою відео та фотоапаратури. Відео- та фотоматеріал подавався на спеціально створену комп'ютерну графічну станцію, де за спеціальними програмами оброблявся та аналізувався.

Результати досліджень. Результати візуальних досліджень гравітаційних хвиль з моделями вертикальних стінок різної проникності стінок показали, що висота хвилі перед проникною стінкою значно більша, ніж висота хвилі позаду проникної стінки, що вказує на захисну спроможність такої стінки від дії хвильового руху, коли така стінка використовується в якості хвилелому під час захисту берега і прибережної інфраструктури. Зі збільшенням проникності стінки висоти відбитих хвиль зменшувалися, а висоти проникних хвиль через вертикальну стінку навпаки збільшувалися, що обумовлено значно меншим гідравлічним опором проникної стінки великої проникністю.

Результати візуальних досліджень дали можливість оцінити особливості хвильового руху, його взаємодії з проникними хвилеломами та оцінити просторово-часові характеристики зворотно-поступального руху рідини між циліндрами щілинної стінки. Дослідження показали, що залежно від режимів хвильового руху, конструкції та проникності хвилеломів перед щілинними стінками формується інтенсивний хвильовий рух, а за стінками висоти хвиль значно менші, ніж перед ними. При цьому на хвильовій поверхні в різні часові інтервали спостерігалися набігаючі, відбиті, стоячі хвилі та хвилі, що проходили через щілинні стінки. Хвилі, які взаємодіяли з проникною стінкою, генерували хвильові тиски на обтічній поверхні хвилелому і знакозмінні навантаження на вертикальну стінку.

Якісні результати досліджень, які отримані з візуальних спостережень, відео-фотозйомок, 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 діаметру палі висоти хвиль суттєво відрізняються від висоти прийдешньої хвилі.



а б

Рис. 1. Залежності висот хвиль перед (а) та позаду стінок (б) від частоти

Так, на рис. 1 наведені результати вимірювання висот хвиль перед вертикальною стінкою різної проникності в залежності від частоти хвиль. 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 – результати для прийдешньої хвилі. Результати досліджень показали, що перед вертикальною стінкою (рис. 1а) висоти хвиль значно перевищують висоту прийдешньої хвилі і ця різниця збільшується зі збільшенням частоти хвильового поля. Зменшення проникності вертикальної стінки призводить до збільшення різниці висоти перед стінкою відносно висоти прийдешньої хвилі. Результати досліджень показали, що висота проникної хвилі (рис. 1б) навпаки збільшується зі збільшенням проникності стінки особливо зі збільшенням частоти хвилі.

Спектральні густини потужності пульсацій хвильового тиску перед суцільною та проникними вертикальними стінками приведені на рис. 2. Досліди проводилися для наступних умов хвильового поля:

ISSN 2306-5478

період хвиль – T =1.14 с; висота прийдешньої хвилі – h_i =0.165 м; довжина хвилі – λ =2.03 м; швидкість хвилі – U_w =1.78 м/с. Так, результати досліджень спектрів пульсацій тиску хвильового поля в околі суцільної вертикальної стінки показані на рис. 2а. 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.

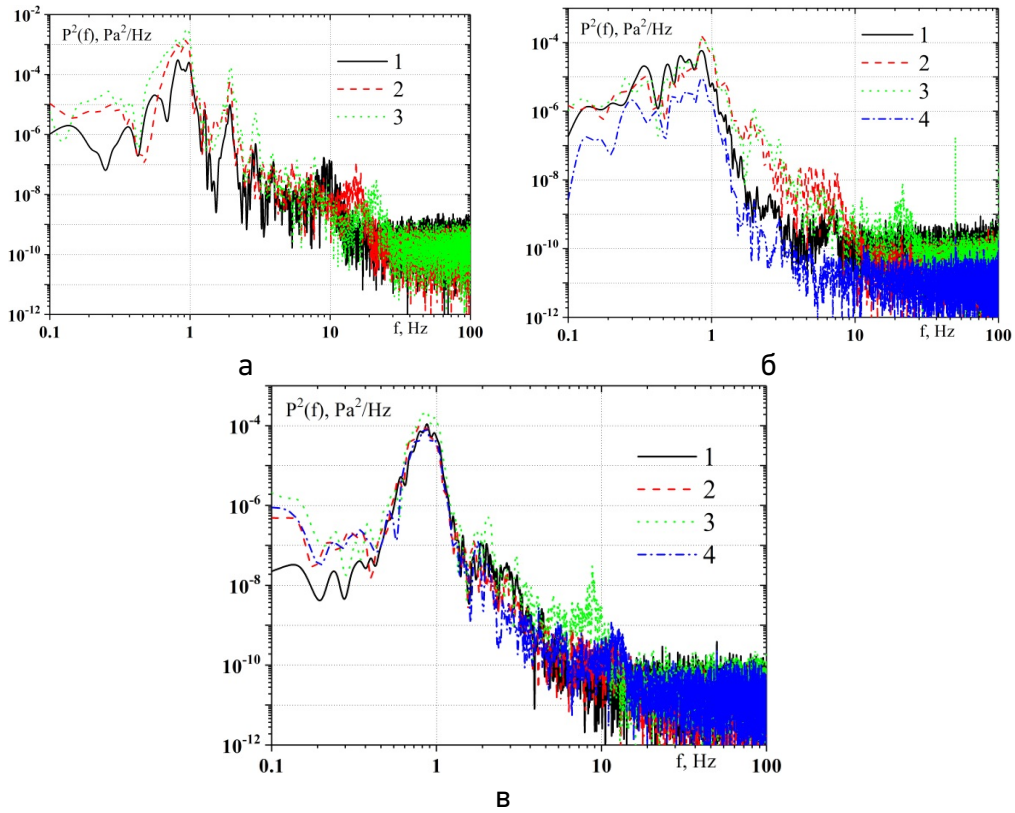


Рис. 2. Спектри пульсацій тиску біля суцільної стінки (а), проникністю 20% (б) та 50% (в).

Дослідження показали, що найбільші спектральні рівні пульсацій хвильового тиску спостерігалися безпосередньо перед фронтальною частиною суцільної стінки (крива 3 на рис. 2а), де прийдешня хвиля взаємодіє зі стінкою, утворюючи відбиту хвилю. Найменші спектральні 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 високочастотних дрібномасштабних джерел тиску, якими є дрібномасштабні складові хвильового руху, що генеруються взаємодією прийдешньої хвилі з суцільною стінкою.

Результати досліджень спектральних характеристик поля пульсацій хвильового тиску вертикальної стінки проникністю 20% та 50% показані на рис. 2б та рис. 2в. Тут 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 – для вимірювань позаду проникної стінки на відстані 1.0λ.

Дослідження показали, що спектральні рівні пульсацій хвильового тиску перед проникними вертикальними стінками значно нижчі в області низьких частот, які відповідають частоті хвильового поля, що генерує хвилегенератор, ніж перед суцільною стінкою. Спектральні рівні пульсацій тиску позаду проникних стінок нижчі, ніж перед ними, особливо для проникності 20% (див. криву 4 на рис. 2б), зі збільшенням проникності ця різниця зменшується.

Висновки

1. Установлено, що висоти хвиль перед проникними вертикальними стінками значно вищі, ніж позаду цих стінок. Причому різниця між висотами хвиль перед проникними стінками та позаду них збільшується зі зменшенням проникності вертикальних стінок.

2. Визначено, що перед проникною вертикальною стінкою висоти хвиль значно перевищують висоту прийдешньої хвилі і ця різниця збільшується зі збільшенням частоти хвильового поля. При цьому, висота проникної хвилі збільшується зі збільшенням проникності стінки особливо зі збільшенням частоти хвилі.

3. Знайдено, що найбільші спектральні рівні пульсацій хвильового тиску спостерігалися безпосередньо перед фронтальною частиною суцільної стінки, де прийдешня хвиля взаємодіє зі стінкою, утворюючи відбиту хвилю. Найменші спектральні рівні пульсацій тиску мали місце на відстані однієї довжини хвилі перед суцільною вертикальною стінкою. З наближенням до фронтальної стінки інтенсивність поля пульсацій тиску збільшується в області високих частот. Цей діапазон спектральних рівнів обумовлений дією високочастотних дрібномасштабних джерел тиску, якими є дрібномасштабні складові хвильового руху, що генеруються взаємодією прийдешньої хвилі з суцільною стінкою.

 ISSN 2306-5478

4. Перспективи подальших досліджень. Для визначення найбільше ефективних з точки зору захисту берегової інфраструктури та матеріально-фінансових витрат потрібне дослідження різних форм поперечного перерізу проникних стінок вертикального чи горизонтального розташування у морській акваторії, особливостей дифракції та інтерференції гравітаційних хвиль, дисипації хвильової енергії та хвильового навантаження на проникні стінки, як у теоретичних, чисельних, так і експериментальних методах досліджень.

1. Морська доктрина України на період до 2035. (2020). Постанова Кабінету Міністрів України від 18 грудня 2018 р. № 1108 (Із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 1023 від 28.10.2020) 2. Хомицький, В.В., Воскобійник, В.А., Харченко, А.Г., Воскобойник, О.А., Терещенко, Л.М., Воскобійник, А.В., Нікітін, І.А. (2019). Захист пляжу активними берегозахисними спорудами. Екологічна безпека та природокористування, 32, 60-77. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.4.60-77 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. Saengsupavanich, C., Ferren, V., Magdalena, I., Ariffin, E.H. & Ayutthaya, S.S.-N. (2024). Using piles for wave reduction and coastal protection: A review. Regional Studies Marine Sci., 77, 103638. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103638 5. Li, A.-J., Liu, Y. & Li H.-J. A review of pressure loss characteristics during water waves passaging through perforated plates // Applied Ocean Res. – 2024. – Vol. 153. – P. 104300. https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104300 6. Fatimah E., Fauzi M., Abdullah, Nasaiy, Q.A.B. (2025). Numerical investigation of extreme wave diffraction on porous pile cone breakwaters // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 1479, 012013. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1479/1/012013 7. Khaldirian, M.F., Tahalele, M. & Satiti I.T.R.W. (2025). Numerical study of wave reflection by the curtain wall-pile breakwater using the SPH model. J. Civil Eng. Forum., 11(2), 113-124. https://doi.org/10.22146/jcef.15085 8. Воскобійник, В.А., Воскобойник, О.А., Харченко, А.Г., Воскобійник, А.В. (2024). Трансформація хвильового поля проникною вертикальною стінкою. Екологічна безпека та природокористування, 52(4), 106-121. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.106-121 9. Kriebel, D.L. (1992). Vertical wave barriers: Wave transmission and wave forces. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, 2, 1313-1326. 10. Nurzaman, L., Juwono, P.T., Dermawan, V. & Wijatmiko I. (2024). Wave transmission coefficient of inclined pile breakwater based on a physical model. J. Law Sustainable Develop., 12(2), 1-15. https://doi.org/10.55908/sdgs.v12i2.2911 11. Sathyanarayana, A.H., Suvarna,

P.S., Umesh, P. & Shirlal, K.G. (2024). Investigation on innovative pile head breakwater for coastal protection. Proc IMechE Part M: J Engineering for the Maritime Environment, 238(1), 27-56. https://doi.org/10.1177/14750902231155677 12. 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 13. Bendat, Ju.S. & Piersol, A.G. (2010). Random Data: Analysis and Measurement Procedure. NY: Wiley, 613. https://doi.org/10.1002/9781118032428 14. 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

REFERENCES

1. Maritime Doctrine of Ukraine for the period until 2035. (2020). Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainu vid 18 grudnia 2018 r. N 1108 (Iz zminamy, vnesenymy zgidno z Postanovoiu KM N 1023 vid 28.10.2020) [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December 18, 2018 No. 1108 (As amended by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1023 dated October 28, 2020)] [in Ukrainian]. 2. Khomytsky, V.V., Voskoboinick, V.A., Kharchenko, A.G., Voskoboinyk, O.A., Tereshchenko, L.M., Voskobiinyk, A.V. & Nikitin, I.A. (2019). Zakhyst pliazu aktyvnymy beregozakhycnymy sporudamy [Beach protection with active shore protection structures]. Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia - Ecological Safety and Nature Management, 32, 60-77 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.4.60-77 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. Saengsupavanich, C., Ferren, V., Magdalena, I., Ariffin, E.H. & Ayutthaya, S.S.-N. (2024). Using piles for wave reduction and coastal protection: A review. Regional Studies Marine Sci., 77, 103638. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103638 5. Li, A.-J., Liu, Y. & Li H.-J. A review of pressure loss characteristics during water waves passaging through perforated plates // Applied Ocean Res. – 2024. – Vol. 153. – P. 104300. https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104300 6. Fatimah E., Fauzi M., Abdullah, Nasaiy, Q.A.B. (2025). Numerical investigation of extreme wave diffraction on porous pile cone breakwaters // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 1479, 012013. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1479/1/012013 7. Khaldirian, M.F., Tahalele, M. & Satiti I.T.R.W. (2025). Numerical study of wave reflection by the curtain wall-pile breakwater using the SPH model. J. Civil Eng. Forum., 11(2), 113-124.

 ISSN 2306-5478

https://doi.org/10.22146/jcef.15085 8. Voskoboinick, V.A., Voskoboinyk, O.A., Kharchenko, A.G. & Voskobiinyk, A.V. (2024). Transformacia khvylovogo polia pronyknoiu vertykalnoiu stinkoiu [Wave field transformation by a permeable vertical wall]. Ekologichna bezpeka ta pyrodokorystuvannia – Ecological Safety and Environmental Management, 52(4), 106-121 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.106-121 9. Kriebel, D.L. (1992). Vertical wave barriers: Wave transmission and wave forces. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, 2, 1313-1326. 10. Nurzaman, L., Juwono, P.T., Dermawan, V. & Wijatmiko I. (2024). Wave transmission coefficient of inclined pile breakwater based on a physical model. J. Law Sustainable Develop., 12(2), 1-15. https://doi.org/10.55908/sdgs.v12i2.2911 11. Sathyanarayana, A.H., Suvarna, P.S., Umesh, P. & Shirlal, K.G. (2024). Investigation on innovative pile head breakwater for coastal protection. Proc IMechE Part M: J Engineering for the Maritime Environment, 238(1), 27-56. https://doi.org/10.1177/14750902231155677 12. 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 13. Bendat, Ju.S. & Piersol, A.G. (2010). Random Data: Analysis and Measurement Procedure. NY: Wiley, 613. https://doi.org/10.1002/9781118032428 14. 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

Trudenko D.V., ([1]: ORCID: 0009-0001-3720-1952)
PhD student
Onyshchenko A.M., ([1]: ORCID: 0000-0002-1040-4530)
Professor, Doctor of Technical Sciences
Voskobiinyk V.A., ([2]: ORCID: 0000-0003-2161-6923)
Doctor of Technical Sciences

[1] National Transport University, Kyiv
[2] Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE INTERACTION OF A WAVE FIELD WITH A PERMEABLE VERTICAL WALL

The object of the study is permeable vertical walls, which are used as coastal protection structures. These structures are used to

protect coastal infrastructure, including residential buildings, resort complexes, engineering structures, agricultural land, port infrastructure, recreation areas, which is extremely relevant for coastal countries. In recent years, the development of coastal protection structures has seen a trend towards the use of permeable structures, the advantage of which is to improve the ecology of the protected water area, save building materials and financial resources. Garbage does not accumulate in flowing water and free migration is ensured for marine life. The aim of the work is to determine the statistical characteristics of the interaction of wave motion with permeable vertical walls of different permeability using experimental studies in a wave channel. The studies were carried out using experimental methods that were implemented in a wave channel on an experimental stand in laboratory conditions. The stand was equipped with a wave generator and wave absorbers, control and measuring equipment, means of visual and instrumental research. Inside the wave channel on a sandy base were solid and permeable vertical walls of a circular cross-section with a diameter of 0.05 m with different permeability from 0 to 60%. The generated wave field had different parameters of gravity waves: the height of the initial wave from 0.03 m to 0.14 m, the wave period from 0.9 s to 2.5 s, the length of the initial wave from 1.3 m to 10 m and the frequency from 0.4 Hz to 1.1 Hz. Thus, the experiments showed that in front of the permeable walls the wave heights were higher than behind them, especially for walls of low permeability. In front of the permeable vertical walls the wave heights significantly exceed the height of the incoming wave and this difference increases with increasing frequency of the wave field. As a result, the largest spectral levels of wave pressure fluctuations occurred directly in front of the frontal part of the vertical wall, where the incoming wave interacts with the wall, forming a reflected wave. The spectral levels of pressure fluctuations in front of permeable vertical walls are significantly lower in the low-frequency region than in front of a solid wall. The spectral levels of pressure fluctuations behind permeable walls are lower than in front of them, especially for low wall permeability, and with increasing permeability this difference decreases. To improve our knowledge of identifying the features of the interaction of the wave field with permeable walls, further scientific and practical researches are needed to determine effective coastal protection structures from environmental and material and financial aspects.

ISSN 2306-5478

Keywords: gravity wave, permeable vertical wall, waterbreak, coast protection structure, spectral levels, wave pressure fluctuations

---

Отримано: 30 березня 2026 року
Прорецензовано: 29 квітня 2026 року
Прийнято до друку: 29 травня 2026 року

© 2026 [Trudenko D.V., Onyshchenko A.M., Voskobiinyk V.A.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license (creativecommons.org).