

УДК 627.5

ВЗАЄМОДІЯ ПОВЕРХНЕВИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ ІЗ ВЕРТИКАЛЬНИМИ ПРОНИКНИМИ ХВИЛЕЛОМАМИ

В. А. Воскобійник[†], О. А. Воскобойник, А. Г. Харченко,
А. В. Воскобійник, А. С. Корольова, І. А. Нікітін

Інститут гідромеханіки НАН України
вул. Марії Капніст, 8/4, 03057, Київ, Україна
[†]E-mail: vlad.vsk@gmail.com

Отримано 05.12.2023

Захист берегової лінії, об'єктів життєдіяльності, гідротехнічних споруд, морської флори та фауни вимагають модернізації берегозахисних споруд, потребу в якій обумовлено кліматичними змінами та збільшенням хвильової енергії моря. Протягом останніх років у розвитку берегозахисних споруд намітилася тенденція використання проникних конструкцій, перевага яких полягає в поліпшенні екології захищеної акваторії та економії будівельних матеріалів. У статті наведено результати експериментальних досліджень щодо вивчення особливостей взаємодії поверхневих гравітаційних хвиль з берегозахисними спорудами у вигляді проникних вертикальних хвилеломів. Дослідження проводилося в лабораторних умовах на моделях однорядних проникних хвилеломів, які розташовувались у хвильовому лотку. Зокрема, візуально спостерігалася взаємодія хвильового руху з моделями хвилеломів, інструментально досліджувалося хвильове поле. Параметри хвильового руху реєструвалися спеціально розробленими датчиками висоти хвиль, які було виготовлено на базі п'єзорезистивних чутливих елементів тиску. Фото та відеокадри дозволили оцінити особливості взаємодії хвильового поля з досліджуваними моделями хвилеломів різної проникності. Особливість експериментів полягала в тому, що вертикальні проникні хвилеломі закривали непроникними щитами в їхній верхній частині в області урізу води. Ці щити встановлювались на різну глибину відносно рівня води. Гідродинамічні параметри хвильового поля в околі хвилеломів – висоти, періоди й довжини хвиль, коефіцієнти відбиття, проходження хвилі та дисипації хвильової енергії – вимірювались групою датчиків висоти хвиль, які розташовувались у різних місцях перед і позаду моделей хвилеломів. Отримано інтегральні та спектральні характеристики хвильового поля, визначено закономірності зміни його гідродинамічних параметрів залежно від проникності хвилелому, відносної глибини води у хвильовому лотку й довжини гравітаційної хвилі. Визначено ступінь захисту берегової лінії проникними однорядними вертикальними хвилеломами, отримано максимальні значення дисипації хвильової енергії залежно від форми, розміру й проникності їхніх досліджуваних моделей.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: гравітаційна хвиля, проникний хвилелом, вертикальна стінка, датчик висоти хвилі, хвильовий лоток

1. ВСТУП

Вітрові хвилі та хвильові течії є основними факторами, які впливають на динаміку берегів та існування живих організмів і рослинності в прибережній зоні. Інтенсивні хвильові рухи в шельфовій зоні виникають унаслідок трансформації енергії хвиль під час їхньої взаємодії з берегами й дном водойми. Зведення гідротехнічних споруд у береговій зоні суттєво впливає на хід сформованих природних процесів, нерідко змінюючи характер динаміки берега, стан прибережних вод і біоценозів. Техногенне втручання викликає порушення кінематичних і динамічних характеристик хвильових процесів і призводить до суттєвих змін у природному функціонуванні берегової зони [1–3].

У практиці морського гідротехнічного будівництва для захисту рекреаційних пляжів та берегів у цілому від розмиву дедалі частіше застосовують хвилеломи. На додачу, такі споруди часто застосовують як превентивні й локальні засоби задля зменшення хвильового навантаження на основний захисний пояс кріплень і прибережної інфраструктури за екстремальних хвильових умов, наприклад, під час дії жорстких штормів або хвиль цунамі.

Хвилеломи застосовують в основному при фронтальному підході хвиль до берега, а найбільш ефективна їхня робота спостерігається при сталому горизонті води у водоймі. зазвичай переріз хвилелому роблять скошеним з пологим напірним і вертикальним береговим укосами. Часто для запобігання розмиву берегової лінії хвилелом з'єднують з берегом траверсами.

Фізичні процеси, що спостерігаються під час взаємодії хвиль із хвилеломом, належать до категорії складних і є результатом відбиття, трансформації та дисипації енергії хвиль [2]. Взаємодія хвильового руху з берегозахисною спорудою, а також трансформація гравітаційних або вітрових хвиль викликають суттєві нелінійні та нестационарні гідродинамічні процеси, які супроводжуються інтенсивними пульсаціями вихрового та струменевого руху. При цьому просторово-часові характеристики гідродинамічних параметрів мають достатньо широкий спектр у частотній та хвильовій областях із формуванням тональних компонент, які відповідають субгармонікам і гармонікам вищих порядків до основної гармоніки хвильового поля [4, 5].

За способами захисту берегів споруди діляться на дві групи: пасивні чи активні [1, 2]. Пасивні берегозахисні споруди сприймають на себе дію хвиль і зменшують їхню енергію завдяки своїй конструкції. Споруди пасивного способу дії безпосередньо захищають береговий укіс від впливу хвилювання й течії. Таким чином вони виконують лише завдання збереження ділянки берега, який існував до їх зведення. Сюди відносяться поздовжні берегоукріплювальні стінки та споруди укісного, напівукісного й ступеневого типів, штучні пляжі, хвилегасячі берми, а також берегові дамби.

Активні берегозахисні споруди зберігають пляжі або створюють умови для формування пляжів, зменшуючи енергію, висоту та період штормових хвиль. Значною мірою енергія хвиль гаситься на підході до берега. Берег зміцнюється спорудами, які затримують наноси, в результаті чого перед цією ділянкою берега утворюється захисна смуга пляжу [6]. До числа активних способів захисту відносять поперечні буни, надводні та підводні хвилеломи, банкетти, підводні рівчаки, штучні миси, поздовжні берегоукріплювальні хвилерізи та ін.

Протягом останніх років у розвитку берегозахисних споруд намітилася тенденція

використання проникних конструкцій, перевага яких полягає в поліпшенні екології захищеної акваторії, економії будівельних матеріалів і трудових ресурсів [7, 8]. У протоchnій воді не накопичується сміття й забезпечується вільна міграція морських мешканців. Конструкції проникних берегозахисних споруд відрізняються широким розмаїттям. Це можуть бути близько розташовані кругові палі, проникні стінки, що складаються з горизонтальних або вертикальних щілин, розташованих на певній глибині [9, 10]. За критерії їхньої ефективності правлять оцінки коефіцієнтів пропускання, відбиття та дисипації енергії як регулярних, так і поодиноких хвиль [3, 8].

Проектування проникних берегозахисних споруд вимагає розрахунку та експериментального дослідження хвильових та ударних гідродинамічних навантажень на їхні елементи [1, 2, 11, 12]. Більшість розроблених до теперішнього часу математичних моделей ґрунтується на лінійній теорії хвиль та їхньої взаємодії з перешкодами [13–16]. Сюди слід віднести методи розкладу за власними функціями, квазілінійні методи, які враховують нелінійні характеристики локальних областей проникної стінки [7, 16–20]. Оскільки наявні математичні моделі використовують суттєві спрощення, першочергової ваги набуває їхня експериментальна перевірка [21–23]. Такі дослідження проводяться в лабораторних, напівнатурних і натурних умовах з використанням сучасного високоточного обладнання, засобів обробки й аналізу даних, включаючи статистичні методи теорії ймовірності та математичної статистики [4, 24, 25].

Таким чином, мета цієї роботи полягає у визначенні особливостей гідродинамічної взаємодії морських хвиль і берегозахисних споруд проникного типу на основі експериментальних досліджень.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД, МЕТОДИКА ТА ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для проведення експериментальних досліджень з визначення методів створення та використання берегозахисних споруд в умовах глобальних змін навколишнього середовища було створено експериментальний стенд на базі хвильового лотка Інституту гідромеханіки НАН України. У лотку, який мав довжину близько 60 м, ширину та глибину 1 м, на відстані близько 50 м було влаштовано вимірювальну ділянку, де на піщаній основі розташовувалися моделі суцільного (Рис. 11а) чи проникного (Рис. 1б) хвилелому. Скляні стінки лотка забезпечували проведення візуальних досліджень, а щитовий генератор хвиль надавав можливість змінювати період, висоту й довжину хвиль. У кінці лотка знаходився укiсний хвилегасник.

За модель берегозахисної споруди правили проникні хвилеломи, широко використовувані на практиці для захисту берегової лінії, гідротехнічних і причальних конструкцій. Наразі вони вважаються дуже перспективними з економічної та екологічної точок зору [1, 9, 11]. Моделі з різною проникністю являли собою однорядні системи вертикальних циліндричних паль, розташованих у хвильовому лотку. Палі діаметром 50 мм занурювались у піщаний ґрунт і розміщувались перпендикулярно до напрямку хвиль.

Дослідження проводилися як з проникними хвилеломами (Рис. 2а), так і з непрокiсними щитами у верхній частині пальових конструкцій. Для того, щоб забезпечити можливість зіставлення результатів і визначення ефективності проникних хвилеломів, було також використано суцільну циліндричну модель хвилелому (див. Рис. 1а).

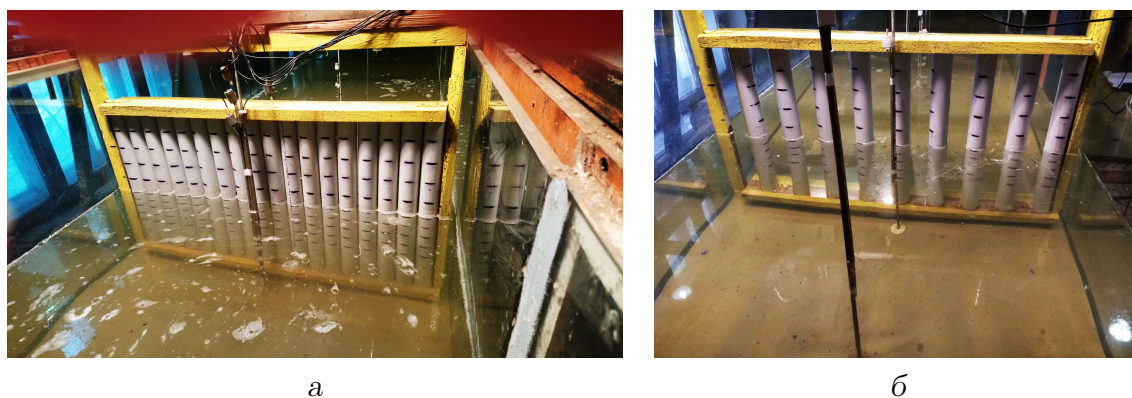


Рис. 1. Розташування моделі циліндричного хвилелому:
а — суцільний хвилелом; б — проникний хвилелом з проникністю 50%

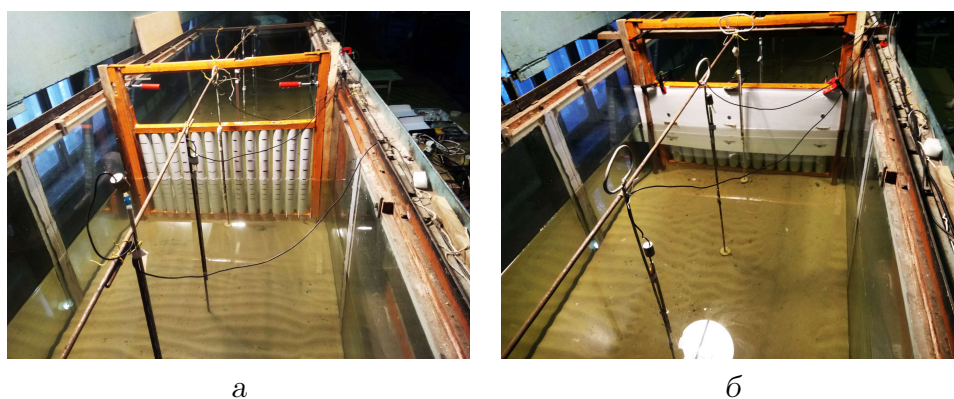


Рис. 2. Розташування моделі однорядного вертикального
циліндричного хвилелому з проникністю 20%:
а — без щита; б — зі щитом

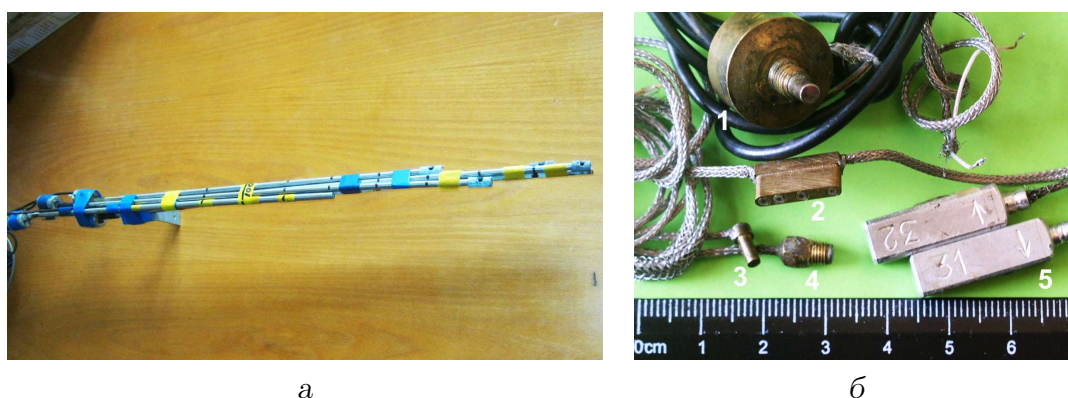


Рис. 3. П'єзореzистивні датчики висоти хвилі (а),
п'єзокерамічні датчики пульсацій тиску та акселерометри (б)

Експериментальний стенд було обладнано системою засобів вимірювання параметрів хвиль, хвильового та пристінного тиску, вібрацій, розмиву піщаного ґрунту, координатними пристосуваннями для переміщення засобів візуалізації та датчиків, апаратурою реєстрації, обробки й аналізу експериментальних даних. За датчики висоти хвилі працювали спеціально розроблені та виготовлені диференційні датчики динамічного тиску (Рис. 3а). П'єзорезистивні датчики з чутливістю 2 Па вимірювали тиск у тонкостінних трубках, занурених під поверхню води. Під дією хвильового поля тиск у трубках змінювався відповідно до параметрів хвиль, які підлягали реєстрації [26–28].

Параметри хвильового тиску на обтічних поверхнях моделей проникних хвилеломів реєструвалися за допомогою п'єзокерамічних датчиків пульсацій пристінного тиску (позиції 1–4 на Рис. 3б). Спеціально розроблені та виготовлені мініатюрні (діаметр чутливої поверхні 1.3 мм) п'єзокерамічні датчики встановлювались урівень з обтічною поверхнею хвилелому й реєстрували пульсації пристінного тиску, не порушуючи хвильовий потік [5, 28]. Датчики пульсацій тиску через свою невисоку чутливість – близько (4...6) мкВ/Па – забезпечувались малошумними попередніми підсилювачами. Останні розташовувались на мінімально можливих відстанях від датчиків чи монтувались в одному корпусі (позиція 1 на Рис. 3б). Підсилення генерованого датчиками електричного сигналу в окремих випадках досягало 30 дБ.

Вібрації експериментального стенда, а також засобів вимірювання та реєстрації даних знімалися за допомогою п'єзокерамічних акселерометрів (позиція 5 на Рис. 3б). Параметри вібрацій реєструвалися контрольно-вимірювальною апаратурою одночасно з висотами хвиль і хвильовим тиском і враховувались при вібраційній компенсації отриманих значень гідродинамічних параметрів [5, 29]. Задля зменшення похибки експерименту й урахування віброкомпенсації датчиків тиску на магнітофон чи аналого-цифровий перетворювач (АЦП) одночасно реєструвалися сигнали від акселерометрів, які підсилювались та, за необхідності, фільтрувались. Усі електричні лінії зв'язку були ретельно екрановані, а використані кабелі й провідники підв'язувались до опорних конструкцій, щоб зменшити вібраційні паразитні реактивні опори, які є однією зі складових перешкод під час вимірювань.

Виміряні аналогові сигнали подавались на чотириканальні вимірювальні магнітофони типу 7005 фірми Брюль і К'єр (Данія) чи 8-ми або 16-ти каналні АЦП, вбудовані в персональний комп'ютер або виносні. За допомогою контрольно-вимірювальної апаратури й апаратури реєстрації експериментальних даних було створено базу даних, яка оброблялася на спеціальних спектроаналізаторах типу 2031 фірми Брюль і К'єр або комп'ютерах. Експериментальні дані оброблялися за стандартними та спеціально розробленими програмами й методиками з використанням апарату теорії ймовірності й математичної статистики [24, 25, 30].

Відповідно до програми та методики проведення експериментальних досліджень течію візуалізували за допомогою кольорових барвників, які подавались через мініатюрні поліуретанові трубочки перед хвилеломом. Кольорова водорозчинна рідина з окремих для кожного кольору резервуарів подавалася в отвори на обтічній поверхні. Швидкість подачі кольорових барвників підбиралася такою, щоб вона була близькою до місцевої швидкості потоку в місці розташування кожного з отворів. Це досягалося завдяки підйому резервуарів з барвником на відповідну висоту над рівнем обтічної поверхні, що забезпечувало відповідний перепад тиску рідини. Обробка та аналіз відеоматеріалу з

результатами візуальних досліджень на спеціально створеній комп'ютерній графічній станції дозволили визначити напрямок і швидкість течії кольорових барвників поблизу моделі проникного хвилелому [31–33].

Під час проведення експериментальних досліджень використовувалися стандартні та спеціально виготовлені засоби вимірювань тиску, швидкості та прискорення. Стандартні перетворювачі мали паспортні характеристики, які представлялися підприємствами та фірмами виготовлювачами, із зазначенням їхньої чутливості, діапазонів зміни фізичних величин і параметрів, похибок вимірювання та умов експлуатації. Спеціально розроблені та виготовлені засоби вимірювань проходили атестацію або градування в перевірних лабораторіях і на калібрувальних стендах. При цьому на всі засоби вимірювань оформлювалися характеристики градування з зазначенням чутливості (коефіцієнтів підсилення), діапазону зміни фізичних величин, похибок вимірювання та умов експлуатації за аналогією до паспортних даних стандартних засобів вимірювання. У ході проведення досліджень проводилося калібрування засобів вимірювань, тобто, встановлювалась відповідність характеристик вимірювального тракту або перетворювачів своїм номінальним параметрам чи паспортним даним. Зазвичай градування проводилося під час комплектування вимірювального тракту, перед початком досліджень або при закінченні терміну дії повірки відповідно. Водночас для того, щоб отримати достовірні результати, калібрування здійснювалося досить часто – перед вимірюваннями, в ході та після закінчення дослідів). Градування та калібрування вимагали певного часу проведення робіт з залученням відповідних засобів вимірювань [34, 35].

Датчики пульсацій тиску та повного тиску калібрували абсолютним методом на спеціально виготовленому стенді з імпульсною подачею заданого перепаду тиску, а також при зануренні датчика повного тиску в рідину на задану глибину. Окрім того, датчики калібрували за спеціально розробленою методикою у водоймі, де генерувалися задані по висоті й періоду коливаний гравітаційні хвилі. Датчики пульсацій тиску та динамічного тиску калібрували у пістонфоні типу 4228 фірми Брюль і К'єр на фіксованих амплітудах і частотах осциляцій. Датчики тиску калібрували відносними методами у порівнянні з еталонними мікрофонами та гідрофонами в ближньому та дальньому акустичних полях, які створювалися гармонічними випромінювачами, а також випромінювачами білого та рожевого шумів [34, 35]. При цьому відносні вимірювання проводилися періодично у ході проведення експериментальних досліджень для контролю чутливості первинних перетворювачів швидкості та тиску.

Усі датчики на вібростенді для калібрування акселерометрів типу 4808 фірми Брюль і К'єр були повірені на віброчутливість у трьох взаємно перпендикулярних площинах. Наявність вібраційних характеристик, занесених у паспортні дані датчиків і їх конструктивних елементів, дозволила проводити заходи з віброкомпенсації під час установки датчиків, а також при обробці й аналізі даних вимірювань.

3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

За допомогою візуальних досліджень та проведення фото і відео зйомки були проведені оціночні дослідження взаємодії хвильового руху з моделями проникних хвилеломів та визначені форми й висоти хвиль перед спорудами та позаду них (див. Рис. 4).

Результати дослідження висот хвиль перед фронтальною поверхнею моделі одно-

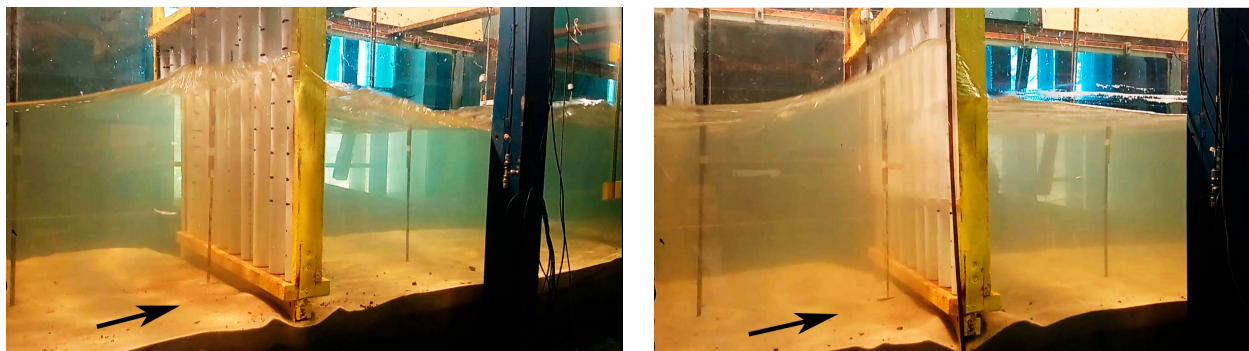


Рис. 4. Фотографії хвиль перед фронтальною поверхнею моделі хвилелому з проникністю 50% та за ним (стрілкою вказано напрям руху хвиль)

рядного проникного хвилелому з проникністю 20% в залежності від довжини хвилі представлені на Рис. 5а. Висоти хвиль, що пройшли цей проникний хвилелом наведені на Рис. 5б. На графіках криві 1 відповідають вимірюванням висот хвиль для непроникного хвилелому, криві 2 заміряні для хвилелому з суцільним щитом на фронтальній поверхні, який заглиблений на глибину H_1 близько 0.74 висоти змоченої поверхні або заглиблення проникного хвилелому, криві 3 отримані для $H_1 = 0.6$, криві 4 – для $H_1 = 0.5$, криві 5 – для $H_1 = 0.24$, криві 6 – для моделі проникного хвилелому без щита (див. Рис. 2а). На Рис. 5а криву 7 отримано для дослідів у хвильовому лотку в умовах відсутності моделей хвилеломів та перетворювачів хвильової енергії (висота набігаючих або початкових хвиль).

На Рис. 6 наведено результати вимірювання висот хвиль для хвилелому з проникністю 50%. Тут умови проведення досліджень та номери кривих відповідають наведеним для Рис. 5.

Результати дослідження показали, що висоти хвиль перед фронтальними поверхнями проникних хвилеломів зменшуються зі збільшенням довжини хвилі, а висоти хвиль у захищеній акваторії за проникними хвилеломами, навпаки, збільшуються. Проникні хвилеломми, які мають більші суцільні або непроникні щити на фронтальній поверхні, обумовлюють генерацію більших за висотою хвиль на мористій стороні хвилелому і менші амплітуди хвиль у захищеній акваторії. Проникні хвилеломми, які не мають захисних суцільних щитів, обумовлюють генерацію відбитих хвиль незначної амплітуди та хвиль, що проходять через проникний хвилелом найбільшої амплітуди (див. криві 6 на Рис. 5 та Рис. 6). При цьому хвилеломми з проникністю 20% генерують відбиті хвилі більшої амплітуди, а хвилі, що пройшли через хвилелом, – меншої амплітуди, у порівнянні з хвилеломом з проникністю 50%.

Таким чином, вимірювання особливостей хвильового поля та вихрового тиску поблизу проникного хвилелому та моделі перетворювача хвильової енергії показали, що проникний хвилелом зменшує висоту хвилі у захищеній хвилеломом акваторії в залежності від параметрів хвиль і конструкції хвилелому та перетворювача хвильової енергії. Приклад форми хвилі та її висоти наведено на Рис. 7а для чотирьох точок вимірювання, які знаходилися на відстані 4 м (крива 1), 1 м (крива 2) і 4 мм (крива 3) перед моделлю однорядного циліндричного хвилелому з проникністю 20%, також 4 м за

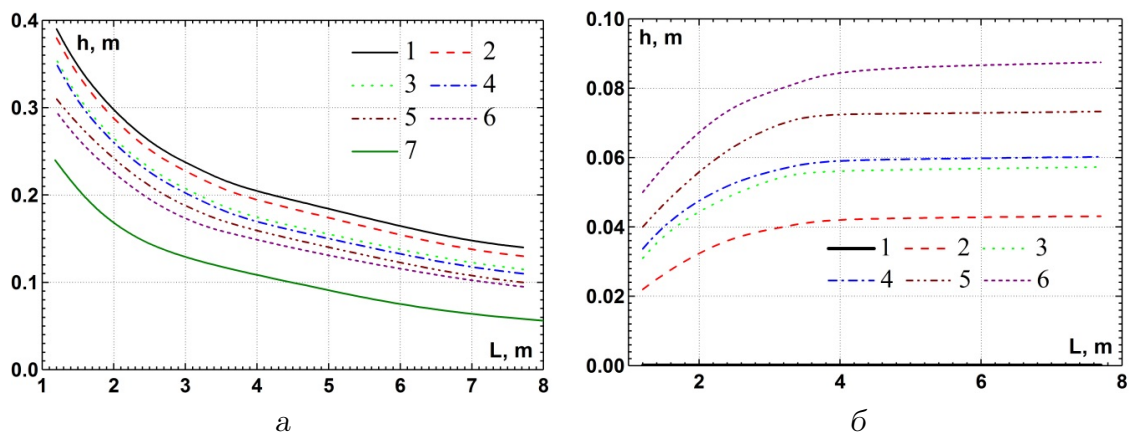


Рис. 5. Висоти хвиль для моделі хвилелому з проникністю 20%:
 а — перед фронтальною поверхнею; б — за хвилеломом

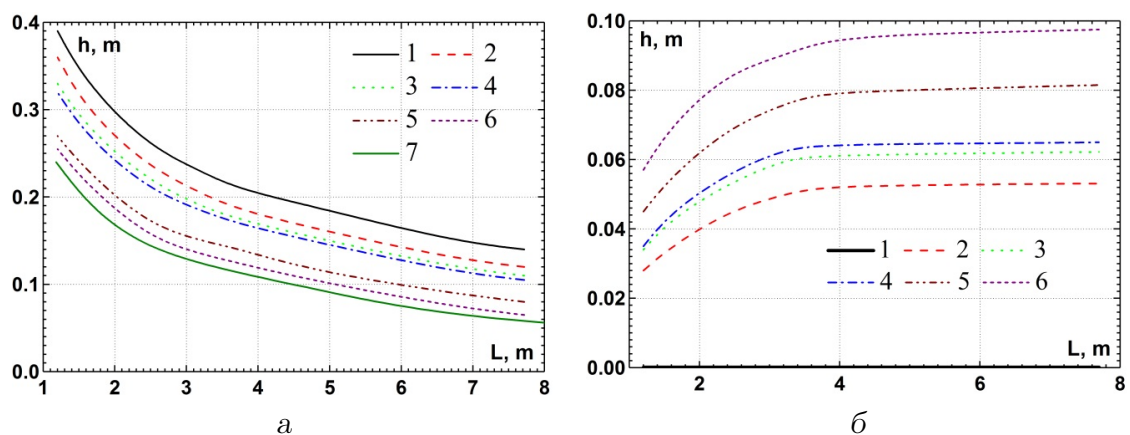


Рис. 6. Висоти хвиль для моделі хвилелому з проникністю 50%:
 а — перед фронтальною поверхнею; б — за хвилеломом

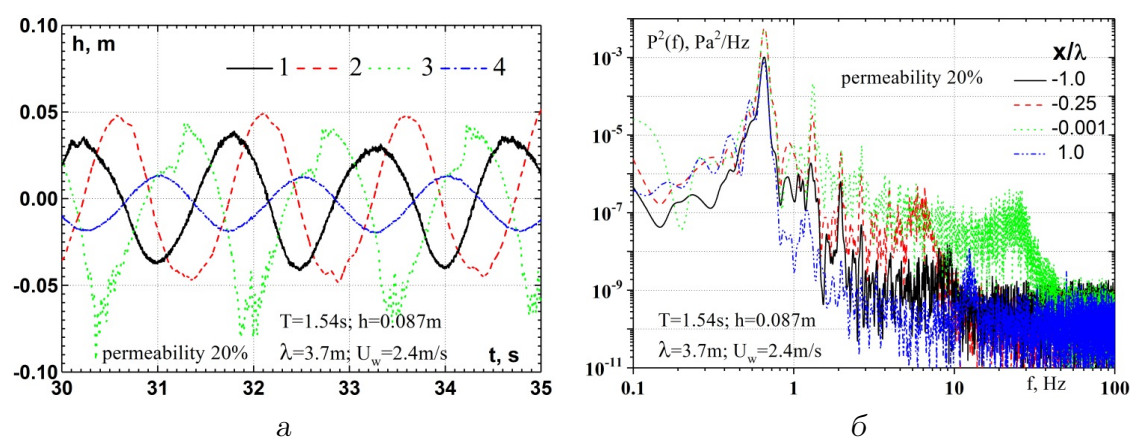


Рис. 7. Характеристики хвиль у точках поблизу моделі
 проникного хвилелому з проникністю 20%:

а — форми й висоти хвиль; б — спектральні щільності потужності пульсацій хвильового тиску

хвилеломом (крива 4). Виявилось, що висота хвилі перед проникним хвилеломом вища, ніж за хвилеломом. Це підтверджує ефективність роботи такої конструкції.

Результати досліджень показали, що моделі однорядних вертикальних циліндричних проникних хвилеломів, обладнаних суцільними щитами на фронтальній поверхні, значно зменшують висоти проникних хвиль, які створюють хвилеве поле у захищеній акваторії – до 70% відносно набігаючих або початкових хвиль, утворених хвилегенератором.

Розподіл енергії хвильового тиску за частотним наповненням було отримано за допомогою спектрального аналізу пульсацій тиску [5, 25, 28, 29]. На Рис. 7б представлені спектральні щільності потужності пульсацій хвильового тиску в околі проникного хвилелому. Тут позначення кривих відповідають відношенням місця розташування датчиків до довжини набігаючої хвилі.

Результати дослідження показали, що в спектрах пульсацій хвильового тиску спостерігалися тональні компоненти на основній частоті хвильового руху та на її вищих гармоніках. Зі збільшенням частоти спектральна енергія хвильового руху зменшується, а основними її джерелами стають низькочастотні осциляції, кратні основній частоті хвильового руху. Позаду проникного хвилелому спектральні рівні хвильового тиску найменші й також мають тональну складову, яка відповідає періоду набігаючої хвилі від хвилегенератора. Поблизу фронтальної поверхні проникного хвилелому набігаюча хвиля розбивається й формується відбита хвиля. Цей процес відбувається дуже інтенсивно, й спектр пульсацій тиску, обумовленого хвильовим рухом, наповнюється високочастотними компонентами. Останні генеруються дрібномасштабними складовими хвильового поля, сформованого в області взаємодії хвильового руху з фронтальною поверхнею моделі циліндричного проникного хвилелому.

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 інтенсивне хвилеве поле, 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 й знакозмінні навантаження на вертикальну стінку.

Відомо, що ефективність хвилеломів або вертикальних стінок, що експлуатуються як берегозахисні споруди, визначається особливостями формування відбитих хвиль і хвиль, що проходять крізь хвилелом, а також здатністю поглинання чи дисипації енергії хвиль хвилеломом. Ефективність таких споруд визначається коефіцієнтами відбиття хвиль (k_r), проходження хвиль (k_t) та дисипації хвильової енергії (k_e). Визначення цих коефіцієнтів у дослідженнях проводилося шляхом вимірювання висот хвиль перед проникним хвилеломом і за ним.

Висота відбитої хвилі визначалася двома способами. Перший з них – визначення висоти відбитої хвилі за допомогою двох датчиків висоти хвилі, один з яких знаходився на відстані довжини хвилі λ від хвилелому, а інший – на відстані 1.25λ від нього. Перший датчик вимірював висоту хвилі h_{an} в пучності стоячої хвилі, яка формувалася в

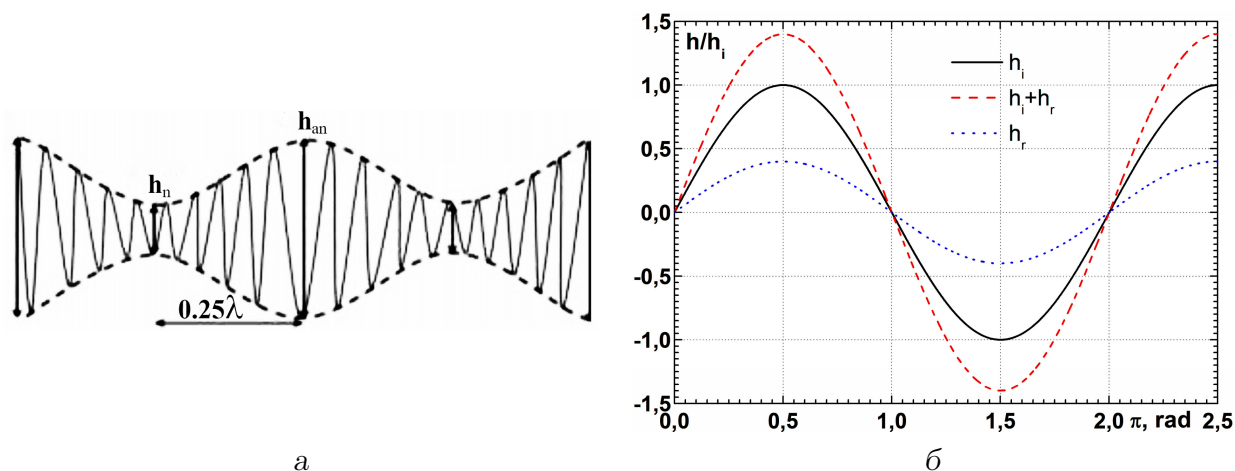


Рис. 8. Схеми визначення висот хвиль:
 а — двоточковим методом; б — одноточковим методом

результаті інтерференції набігаючої хвилі та відбитої хвилі. Другий датчик вимірював висоту хвилі h_n у вузлі стоячої хвилі (Рис. 8а).

Висота набігаючої хвилі визначалася як

$$h_i = \frac{h_{an} + h_n}{2}, \quad (1)$$

а висота відбитої хвилі –

$$h_r = \frac{h_{an} - h_n}{2}. \quad (2)$$

Ці дані дозволяли обчислити коефіцієнт відбиття:

$$k_r = \frac{h_r}{h_i} = \frac{h_{an} - h_n}{h_{an} + h_n}. \quad (3)$$

Окрім двоточкового методу, застосовувався метод визначення висоти відбитої хвилі у результаті вимірювання висоти стоячої хвилі датчиком висоти хвилі, розташованим на осі хвильового каналу перед хвилеломом на віддаленні більше однієї довжини набігаючої хвилі. Висоту набігаючої хвилі було попередньо визначено в тестових дослідженнях роботи генератора хвиль за відсутності хвилелому й абсорбції хвиль. Висота відбитої хвилі визначалася як різниця висот стоячої й набігаючої хвиль, як схематично показано на Рис. 8б. Таке представлення можливе, коли стояча хвиля є суперпозицією набігаючої й відбитої хвиль, з однаковими періодами й абсолютними значеннями швидкостей переносу (останні спрямовані протилежно). Результуюча стояча хвиля здійснює лише тільки вертикальні коливання, оскільки її швидкість переміщення дорівнює нулю. При застосування цього методу визначення висоти відбитої хвилі коефіцієнт відбиття визначався як

$$k_r = \frac{h_r}{h_i}. \quad (4)$$

На значення коефіцієнтів відбиття й проходження хвилі, а також на співвідношення між ними величезний вплив мають фізичні процеси, що відбуваються під час взаємодії хвиль з проникними берегозахисними спорудами. Коли хвилелом встановлюється у

морському середовищі, відбуваються суттєві зміни хвильового поля. Спостерігаються інтерференція, дифракція й трансформація хвиль, з'являються відбиті, стоячі та прохідні хвилі, може виникати обвалення хвиль [13]. Орбітальні швидкості хвильового руху зазнають змін, збільшується турбулентність, перед хвилеломом і опорними палями генеруються підковоподібні і слідні вихори, а також струменеві течії між палями, що призводить до збільшення тертя між поверхнею хвилелому й рідиною, а також розсіювання чи дисипації їхньої енергії.

Закон збереження енергії вихідної гравітаційної хвилі при взаємодії з проникним хвилеломом, виражається так:

$$E_i = E_r + E_t + E_d. \quad (5)$$

Тут E_i – енергія набігаючої хвилі ($E_i = \rho gh_i^2/8$); E_r – енергія відбитої хвилі ($E_r = \rho gh_r^2/8$); E_t – енергія хвилі, прониклої через хвилелом ($E_t = \rho gh_t^2/8$); E_d – енергія дисипації хвилі. Підставивши в рівняння (5) перераховані вирази та розділивши складові цього рівняння на E_i , отримаємо

$$1 = \left(\frac{h_r}{h_i}\right)^2 + \left(\frac{h_t}{h_i}\right)^2 + \frac{E_d}{E_i} \quad (6)$$

або

$$k_e = 1 - (k_r^2 + k_t^2). \quad (7)$$

Коефіцієнти відбиття й проникнення хвиль, а також коефіцієнти дисипації хвильової енергії залежно від проникності щільних стінок представлені на Рис. 9. Результати вимірювання цих коефіцієнтів наведено для різних глибин, віднесених до довжини хвилі (H/λ). Крива 1 відповідає глибини $H/\lambda = 0.03$; крива 2 – $H/\lambda = 0.06$; крива 3 – $H/\lambda = 0.11$; крива 4 – $H/\lambda = 0.16$; крива 5 – $H/\lambda = 0.22$; крива 6 – $H/\lambda = 0.30$, а крива 7 – $H/\lambda = 0.42$. Зі збільшенням проникності щільної стінки коефіцієнти відбиття хвилі монотонно зменшуються. При цьому темп зменшення коефіцієнтів вищий для стінок малої проникності. Суцільний хвилелом повністю відбиває набігаючу хвилю, тобто коефіцієнт відбиття хвилі для нього буде $k_r = 1$. Зі збільшенням безрозмірної глибини H/λ коефіцієнти відбиття хвилі збільшуються, як показано на Рис. 9а.

Як показали результати дослідження проникної хвилі позаду щільного хвилелому, характер зміни коефіцієнта проникної хвилі k_t має протилежну тенденцію відносно зміни коефіцієнта відбиття хвилі (див., Рис. 9а та Рис. 9б). Зі збільшенням проникності та зменшенням глибини або збільшенням довжини хвилі коефіцієнт проходження хвилі збільшується.

Як показали результати дослідження (Рис. 9в), максимальна дисипація хвильової енергії спостерігалася при більшій проникності хвилелому тоді, коли відносна глибина збільшувалася або коли довжина хвилі ставала меншою.

Таким чином, вимірювання особливостей хвильового поля та вихрового тиску поблизу проникного хвилелому показали, що проникний хвилелом зменшує висоту хвилі у захищеній хвилеломом акваторії залежно від параметрів хвиль та конструкції хвилелому. Висота хвилі перед хвилеломом вища, ніж за хвилеломом, що підтверджує ефективність роботи такого проникного хвилелому.

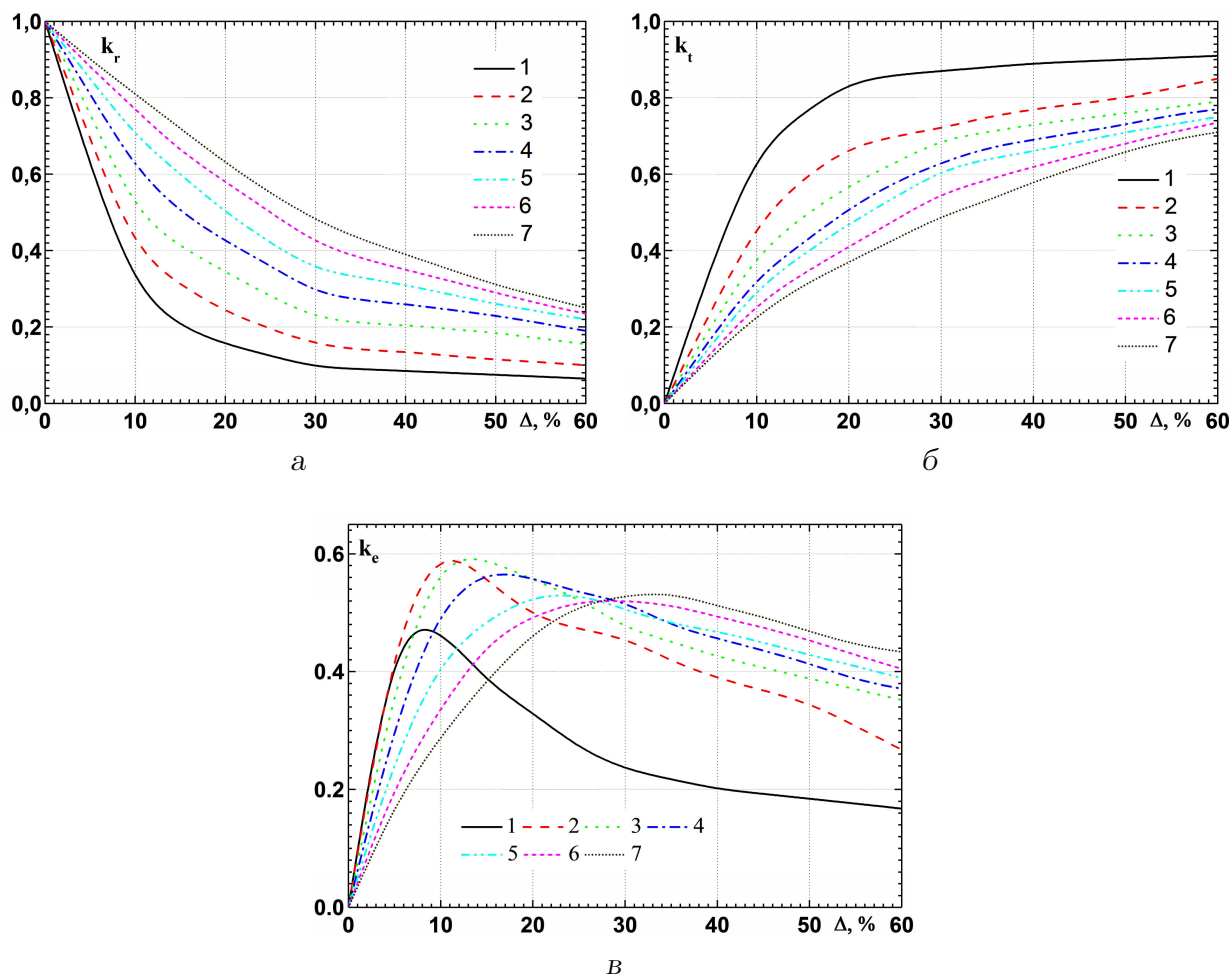


Рис. 9. Коефіцієнти відбиття й проникнення хвиль і дисипації хвильової енергії в залежності від проникності хвилелому:

$a - k_r$; $b - k_t$; $v - k_e$

Результати вимірювань коефіцієнтів відбиття хвилі вертикальною проникною стінкою в залежності від відносної глибини наведено на Рис. 10а. Тут і далі крива 1 відповідає суцільній стінці (проникність $\Delta = 0\%$); крива 2 – стінці з проникністю $\Delta = 10\%$; крива 3 – $\Delta = 20\%$; крива 4 – $\Delta = 30\%$; крива 5 – $\Delta = 40\%$; крива 6 – $\Delta = 50\%$, а крива 7 – $\Delta = 60\%$. Як видно з графіків, для мілководдя або дуже довгих хвиль коефіцієнт відбиття хвилі прагне до нуля. Зі збільшенням глибини або зі зменшенням довжини хвилі він зростає. Швидкість збільшення цього коефіцієнта буде вищою для стінок з низькою проникністю. На глибині $H/\lambda > 0.3$ висоти відбитих хвиль відносно падаючої хвилі вищі, для хвилі, яка рухається на мілководді. Очевидно, що від хвилелому для непроникної стіни $\Delta = 0\%$ хвилі відбиваються повністю, а $k_r = 1$ незалежно від глибини або довжини хвилі.

Зміни коефіцієнта проникнення хвилі показані на Рис. 10б в залежності від відносної глибини для різної проникності стінки. Цей коефіцієнт зменшується зі збільшенням відносної глибини та збільшенням проникності. Для суцільного вертикального хвилелому

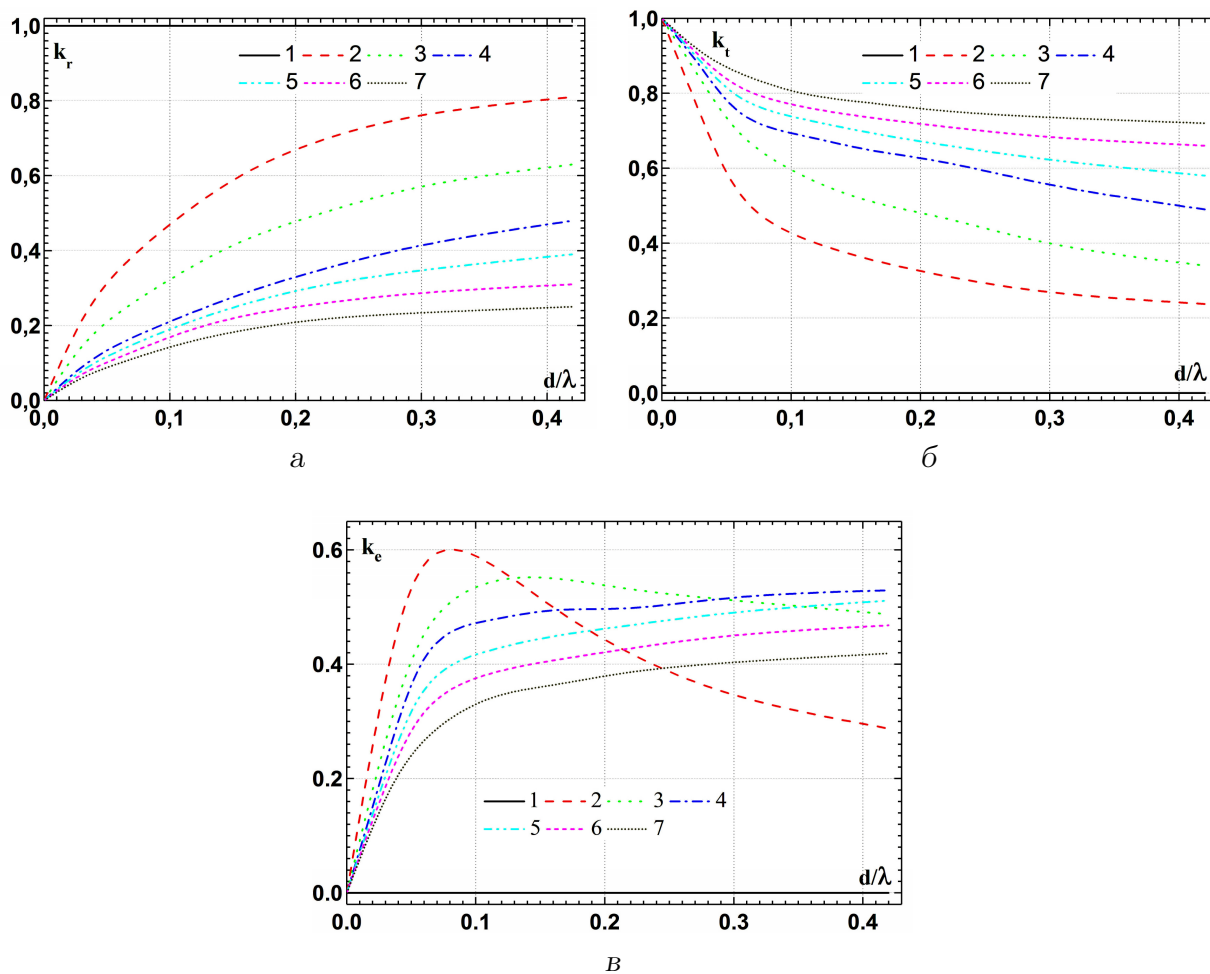


Рис. 10. Коефіцієнти відбиття й проникнення хвиль і дисипації хвильової енергії в залежності від відносної глибини води у хвильовому лотку:

а – k_r ; б – k_t ; в – k_e

($\Delta = 0\%$) хвиля не передається в акваторію, яка захищається – $k_t = 0$.

Значення коефіцієнтів дисипації енергії хвилі в залежності від проникності хвилелому та відносної глибини наведені на Рис. 10в. Як показали дослідження, максимальна дисипація енергії хвилі спостерігалася при більшій проникності хвилелому при збільшенні відносної глибини або при зменшенні довжини хвилі.

4. ВИСНОВКИ

1. Вимірювання особливостей хвильового поля та вихрового тиску поблизу проникного хвилелому та моделі перетворювача хвильової енергії показали, що проникний хвилелом зменшує висоту хвилі у захищеній хвилеломом акваторії в залежності від параметрів хвиль і конструкції хвилелому та перетворювача хвильової енергії. Установлено, що моделі однорядних циліндричних проникних хвилеломів, які обладнано суцільними щитами на їх фронтальній поверхні, а також моделі дворядних проникних хвилеломів значно зменшують висоти проникних хвиль (до

70% відносно набігаючих або початкових хвиль, які генерує хвилегенератор), які створюють хвилеве поле у захищеній акваторії.

2. Результати експериментальних досліджень показали, що висоти хвиль перед фронтальними поверхнями проникних хвилеломів зменшуються зі збільшенням довжини хвилі, а висоти хвиль у захищеній акваторії за проникними хвилеломами навпаки збільшуються. Проникні хвилеломи, які мають більші суцільні щити на фронтальній поверхні, обумовлюють генерацію більших за висотою хвиль на мористій стороні хвилелому і менші амплітуди хвиль у захищеній акваторії. Проникні хвилеломи, які не мають захисних суцільних щитів перед їх фронтальною поверхнею, обумовлюють генерацію відбитих хвиль незначної амплітуди та хвиль, що проходять через проникний хвилелом найбільшої амплітуди. При цьому хвилеломи з проникністю 20% генерують відбиті хвилі більшої амплітуди, а хвилі, що пройшли через хвилелом, навпаки меншої амплітуди, ніж хвилелом з проникністю 50%.
3. Визначено, що в спектрах пульсацій хвильового тиску спостерігалися тональні компоненти на основній частоті хвильового руху та на її вищих гармоніках. Зі збільшенням частоти спектральна енергія хвильового руху зменшується і основними джерелами цієї енергії є низькочастотні осциляції кратні основній частоті хвильового руху. Позаду проникного хвилелому спектральні рівні хвильового тиску найменші та також мають тональну складову, яка відповідає періоду набігаючої хвилі, що генерує хвилегенератор. Поблизу фронтальної поверхні проникного хвилелому має місце розбивання набігаючої хвилі та формування відбитої хвилі. Цей процес відбувається дуже інтенсивно і хвильовий тиск, який обумовлений хвильовим рухом, наповнюється високочастотними компонентами. Ці компоненти генеруються дрібномасштабними складовими хвильового поля, що формуються в області взаємодії хвильового руху з фронтальною поверхнею моделі циліндричного проникного хвилелому. Встановлено, що вертикальні щільні стінки залежно від проникності суттєво впливають на хвильове поле, генерують відбиті хвилі та хвилі, що проходять хвилелом, а також призводять до значної дисипації хвильової енергії. Представлені залежності коефіцієнтів відбиття та проходження хвилі, а також коефіцієнта дисипації хвильової енергії залежно від проникності щільного хвилелому та відносної глибини акваторії.
4. Показано, що зі збільшенням проникності хвилелому коефіцієнт відбиття хвилі зменшувався, а коефіцієнт проходження хвилі навпаки збільшувався. Виявлено, що коефіцієнт відбиття хвилі збільшувався зі збільшенням відносної глибини, а коефіцієнт проходження хвилі навпаки зменшувався. Коефіцієнт дисипації хвильової енергії мав максимальне значення, яке спостерігалось для більшої проникності, коли відносна глибина в порівнянні з довжиною хвилі збільшувалася.

REFERENCES

- [1] M. Han and C. Wang, “Potential flow theory-based analytical and numerical modelling of porous and perforated breakwaters: A review,” *Ocean Engineering*, vol. 249, p. 110897, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110897>
- [2] E. Repousis, I. Roupas, and C. Memos, “Wave transmission over rubble-mound submerged breakwaters,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 7, pp. 1346 (1–19), 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11071346>
- [3] V. Voskoboinick, V. Khomitsky, O. Voskoboinyk, L. Tereshchenko, and A. Voskoboinick, “Wave loads on protective dam of the marine channel of the Danube–Black Sea,” *Journal of Hydro-Environment Research*, vol. 35, pp. 1–12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.003>
- [4] V. A. Voskoboinick, V. N. Turick, O. A. Voskoboinyk, A. V. Voskoboinick, and I. A. Tereshchenko, *Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer*. Cham, Germany: Springer International Publishing, 2018, pp. 23–32. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_3
- [5] V. A. Voskoboinik, A. A. Voskoboinik, V. N. Turik, and A. V. Voskoboinik, “Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices,” *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 93, no. 5, pp. 1205–1220, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>
- [6] I.-A. Anton and D. Dinu, “Wave simulation with different type of coast protection structure – a comparative approach,” *International Journal of Environmental Science*, vol. 2, pp. 171–176, 2017.
- [7] V. Sundar, S. A. Sannasiraj, V. Sriram, and M. D. Nowbuth, Eds., *Proceedings of the Fifth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2019)*, ser. Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2021, vol. 106. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8506-7>
- [8] M. Alkhalidi, N. Alanjari, and S. Neelamani, “Wave interaction with single and twin vertical and sloped slotted walls,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 8, pp. 589 (1–23), 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse8080589>
- [9] J. Peng, K. Li, S. Gu, and Y. Cong, “Numerical simulation of the interaction between waves and pile breakwater with horizontal slotted plates,” *Ocean Engineering*, vol. 287, p. 115777, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115777>
- [10] M. Yin, X. Zhao, M. Luo, Y. Miao, and M. Li, “Prediction of the wave run-up on pile breakwaters,” *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 149, no. 1, p. 04022026, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1061/jwped5.wweng-1902>
- [11] A. Chanda and S. Pramanik, “Effects of a thin vertical porous barrier on the water wave scattering by a porous breakwater,” *Physics of Fluids*, vol. 35, no. 6, pp. 062120 (1–23), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0153109>

- [12] P. Wang, K. Fang, G. Wang, Z. Liu, and J. Sun, “Experimental and numerical study of the nonlinear evolution of regular waves over a permeable submerged breakwater,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 8, pp. 1610 (1–21), 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11081610>
- [13] I. T. Selezov, Y. G. Kryvonos, and I. S. Gandzha, *Wave propagation and diffraction: mathematical methods and applications*. Singapore: Springer Singapore, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4923-1>
- [14] A. N. Khimich, I. T. Selezov, and V. A. Sydoruk, “Simulation of elastic wave diffraction by a sphere in semibounded region,” *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 10, pp. 22–27, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.10.022>
- [15] W. Zhou, Y. Cheng, and Z. Lin, “Numerical simulation of long-wave wave dissipation in near-water flat-plate array breakwaters,” *Ocean Engineering*, vol. 268, pp. 113 377 (1–8), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113377>
- [16] T. Zhou, Y. Yin, Z. Ma, J. Chen, and G. Zhai, “Numerical investigation of breaking waves impact on vertical breakwater with impermeable and porous foundation,” *Ocean Engineering*, vol. 280, p. 114477, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114477>
- [17] S. K. Poguluri and I. H. Cho, “Wave dissipation over a horizontal slotted plate with a lee-side vertical seawall: analytical and numerical approaches,” *Coastal Engineering Journal*, vol. 63, no. 1, pp. 52–67, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1850396>
- [18] E.-H. Min, W. Koo, and M.-H. Kim, “Wave characteristics over a dual porous submerged breakwater using a fully nonlinear numerical wave tank with a porous domain,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 9, pp. 1648 (1–18), 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11091648>
- [19] N. N. Peng and K. W. Chow, “A numerical wave tank with large eddy simulation for wave breaking,” *Ocean Engineering*, vol. 266, pp. 112 555 (1–15), 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112555>
- [20] N. N. Peng, W. K. Lau, O. W. H. Wai, and K. W. Chow, “Computational and experimental studies of wave-structure interaction: wave attenuation by a floating breakwater,” *Physics of Fluids*, vol. 35, no. 4, pp. 045 112 (1–12), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0142991>
- [21] M. J. Choopanizade, M. Bakhtiari, and M. Rostami, “Wave transmission through the perforated half-depth block-made wall breakwater: An experimental study,” *Ocean Engineering*, vol. 215, pp. 107 895 (1–9), 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107895>
- [22] I. Magdalena, I. Marcela, N. Karima, G. Jonathan, D. Harlan, and M. B. Adityawan, “Two layer shallow water equations for wave attenuation of a submerged porous breakwater,” *Applied Mathematics and Computation*, vol. 454, pp. 128 096 (1–21), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2023.128096>

- [23] Y. C. Guo, S. C. Mohapatra, and C. Guedes Soares, “Experimental performance of multi-layered membrane breakwaters,” *Ocean Engineering*, vol. 281, pp. 114716 (1–14), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114716>
- [24] J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Random data: analysis and measurement procedures*. New York: Wiley, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118032428>
- [25] G. P. Vinogradnyi, V. A. Voskoboinik, V. T. Grinchenko, and A. P. Makarenkov, “Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder,” *Fluid Dynamics*, vol. 24, no. 5, pp. 695–700, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01051721>
- [26] V. A. Voskoboinick, V. T. Grinchenko, and A. P. Makarenkov, “Pseudo-sound behind an obstacle on a cylinder in axial flow,” *International Journal of Fluid Mechanics Research*, vol. 32, no. 4, pp. 488–510, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1615/interjfluidmechres.v32.i4.60>
- [27] V. Voskoboinick, A. Voskoboinick, O. Areshkovych, and O. Voskoboinyk, “Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier,” in *Scour and Erosion*. Boca Raton: CRC Press, 2016, pp. 905–910. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
- [28] V. Voskoboinick, N. Kornev, and J. Turnow, “Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements,” *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 90, no. 4, pp. 709–722, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9433-9>
- [29] V. A. Voskoboinick and A. P. Makarenkov, “Spectral characteristics of the pseudosonic component of hydrodynamical noise in a longitudinal flow around a flexible cylinder,” *International Journal of Fluid Mechanics Research*, vol. 31, no. 1, pp. 87–100, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1615/interjfluidmechres.v31.i1.70>
- [30] E. S. Ventzel and L. A. Ovcharov, *Theory of random processes and its engineering applications*. Moscow: Vysshaya Shkola, 2000.
- [31] V. Voskoboinick, A. Onyshchenko, O. Voskoboinyk, A. Makarenkova, and A. Voskobiinyk, “Junction flow inside and around three-row cylindrical group on rigid flat surface,” *Heliyon*, vol. 8, no. 12, pp. e12595 (1–12), 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12595>
- [32] V. A. Voskoboinick, I. M. Gorban, A. A. Voskoboinick, L. N. Tereshchenko, and A. V. Voskoboinick, *Junction flow around cylinder group on flat plate*. Cham, Germany: Springer International Publishing, 2020, pp. 35–50. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4_3
- [33] A. Voskoboinick, V. Voskoboinick, V. Turick, O. Voskoboinyk, D. Cherny, and L. Tereshchenko, *Interaction of group of bridge piers on scour*. Cham, Germany: Springer International Publishing, 2020, pp. 3–17. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_1

- [34] A. E. Kolesnikov, *Acoustic measurements*. Leningrad: Sudostroenie, 1983.
- [35] O. N. Kassandrova and V. V. Lebedev, *Processing of observation results*. Moscow: Nauka, 1970.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Han M. M., Wang C. M. Potential flow theory-based analytical and numerical modelling of porous and perforated breakwaters: A review // *Ocean Engineering*. — 2022. — Vol. 249. — P. 110897 (1–21).
- [2] Repousis E., Roupas I., Memos C. Wave transmission over rubble-mound submerged breakwaters // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 11, no. 7. — P. 1346 (1–19).
- [3] Wave loads on protective dam of the marine channel of the Danube–Black Sea / Voskoboinick V., Khomitsky V., Voskoboinyk O., Tereshchenko L., and Voskoboinick A. // *Journal of Hydro-Environment Research*. — 2021. — Vol. 35. — P. 1–12.
- [4] Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer / Voskoboinick V. A., Turick V. N., Voskoboinyk O. A., Voskoboinick A. V., and Tereshchenko I. A. // *Advances in Computer Science for Engineering and Education*. — Cham, Germany : Springer International Publishing, 2018. — P. 23–32.
- [5] Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices / Voskoboinik V. A., Voskoboinik A. A., Turik V. N., and Voskoboinik A. V. // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2020. — Vol. 93, no. 5. — P. 1205–1220.
- [6] Anton I.-A., Dinu D. Wave simulation with different type of coast protection structure – a comparative approach // *International Journal of Environmental Science*. — 2017. — Vol. 2. — P. 171–176.
- [7] *Proceedings of the Fifth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2019)* / ed. by Sundar V., Sannasiraj S. A., Sriram V., Nowbuth M. D. — Singapore : Springer Singapore, 2021. — Vol. 106 of *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 551 p.
- [8] Alkhalidi M., Alanjari N., Neelamani S. Wave interaction with single and twin vertical and sloped slotted walls // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 8, no. 8. — P. 589 (1–23).
- [9] Numerical simulation of the interaction between waves and pile breakwater with horizontal slotted plates / Peng J., Li K., Gu S., and Cong Y. // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 287. — P. 115777 (1–10).
- [10] Prediction of the wave run-up on pile breakwaters / Yin M., Zhao X., Luo M., Miao Y., and Li M. // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 149, no. 1. — P. 04022026.

- [11] Chanda A., Pramanik S. Effects of a thin vertical porous barrier on the water wave scattering by a porous breakwater // *Physics of Fluids*. — 2023. — Vol. 35, no. 6. — P. 062120 (1–23).
- [12] Experimental and numerical study of the nonlinear evolution of regular waves over a permeable submerged breakwater / Wang P., Fang K., Wang G., Liu Z., and Sun J. // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 11, no. 8. — P. 1610 (1–21).
- [13] Selezov I. T., Kryvonos Y. G., Gandzha I. S. *Wave propagation and diffraction: mathematical methods and applications*. — Singapore : Springer Singapore, 2018. — 241 p.
- [14] Khimich A. N., Selezov I. T., Sydoruk V. A. Simulation of elastic wave diffraction by a sphere in semibounded region // *Доповіді Національної академії наук України*. — 2020. — № 10. — С. 22–27.
- [15] Zhou W., Cheng Y., Lin Z. Numerical simulation of long-wave wave dissipation in near-water flat-plate array breakwaters // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 268. — P. 113377 (1–8).
- [16] Numerical investigation of breaking waves impact on vertical breakwater with impermeable and porous foundation / Zhou T., Yin Y., Ma Z., Chen J., and Zhai G. // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 280. — P. 114477 (1–16).
- [17] Poguluri S. K., Cho I. H. Wave dissipation over a horizontal slotted plate with a leeside vertical seawall: analytical and numerical approaches // *Coastal Engineering Journal*. — 2020. — Vol. 63, no. 1. — P. 52–67.
- [18] Min E.-H., Koo W., Kim M.-H. Wave characteristics over a dual porous submerged breakwater using a fully nonlinear numerical wave tank with a porous domain // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 11, no. 9. — P. 1648 (1–18).
- [19] Peng N. N., Chow K. W. A numerical wave tank with large eddy simulation for wave breaking // *Ocean Engineering*. — 2022. — Vol. 266. — P. 112555 (1–15).
- [20] Computational and experimental studies of wave–structure interaction: wave attenuation by a floating breakwater / Peng N. N., Lau W. K., Wai O. W. H., and Chow K. W. // *Physics of Fluids*. — 2023. — Vol. 35, no. 4. — P. 045112 (1–12).
- [21] Choopanizade M. J., Bakhtiari M., Rostami M. Wave transmission through the perforated half-depth block-made wall breakwater: An experimental study // *Ocean Engineering*. — 2020. — Vol. 215. — P. 107895 (1–9).
- [22] Two layer shallow water equations for wave attenuation of a submerged porous breakwater / Magdalena I., Marcela I., Karima N., Jonathan G., Harlan D., and Adityawan M. B. // *Applied Mathematics and Computation*. — 2023. — Vol. 454. — P. 128096 (1–21).
- [23] Guo Y. C., Mohapatra S. C., Guedes Soares C. Experimental performance of multi-layered membrane breakwaters // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 281. — P. 114716 (1–14).

- [24] Bendat J. S., Piersol A. G. Random data: analysis and measurement procedures. — New York : Wiley, 2010.
- [25] Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder / Vinogradnyi G. P., Voskoboinik V. A., Grinchenko V. T., and Makarenkov A. P. // Fluid Dynamics. — 1990. — Vol. 24, no. 5. — P. 695–700.
- [26] Voskoboinick V. A., Grinchenko V. T., Makarenkov A. P. Pseudo-sound behind an obstacle on a cylinder in axial flow // International Journal of Fluid Mechanics Research. — 2005. — Vol. 32, no. 4. — P. 488–510.
- [27] Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier / Voskoboinick V., Voskoboinick A., Areshkovych O., and Voskoboinyk O. // Scour and Erosion. — Boca Raton : CRC Press. — 2016. — P. 905–910.
- [28] Voskoboinick V., Kornev N., Turnow J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // Flow, Turbulence and Combustion. — 2012. — Vol. 90, no. 4. — P. 709–722.
- [29] Voskoboinick V. A., Makarenkov A. P. Spectral characteristics of the pseudosonic component of hydrodynamical noise in a longitudinal flow around a flexible cylinder // International Journal of Fluid Mechanics Research. — 2004. — Vol. 31, no. 1. — P. 87–100.
- [30] Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. — Москва : Высшая школа, 2000. — 383 с.
- [31] Junction flow inside and around three-row cylindrical group on rigid flat surface / Voskoboinick V., Onyshchenko A., Voskoboinyk O., Makarenkova A., and Voskoboinyk A. // Heliyon. — 2022. — Vol. 8, no. 12. — P. e12595 (1–12).
- [32] Junction flow around cylinder group on flat plate / Voskoboinick V. A., Gorban I. M., Voskoboinick A. A., Tereshchenko L. N., and Voskoboinick A. V. // Understanding Complex Systems. — Cham, Germany : Springer International Publishing, 2020. — P. 35–50.
- [33] Interaction of group of bridge piers on scour / Voskoboinick A., Voskoboinick V., Turick V., Voskoboinyk O., Cherny D., and Tereshchenko L. // Advances in Intelligent Systems and Computing. — Cham, Germany : Springer International Publishing, 2020. — P. 3–17.
- [34] Колесников А. Е. Акустические измерения. — Ленинград : Судостроение, 1983. — 256 с.
- [35] Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. — Москва : Наука, 1970. — 104 с.

**V. A. Voskoboinick, O. A. Voskoboinick, A. G. Kharchenko,
A. V. Voskoboinick, A. S. Korolyova, I. A. Nikitin**

Interaction of surface gravity waves with vertical permeable breakwaters

The protection of the coastline, objects of vital activity, hydrotechnical structures, marine flora and fauna require constant modernization of coastal protection structures, which is due to climate changes and an increase in wave energy of the sea. In recent years, in the development of coastal protection structures, a trend has emerged to use permeable structures, the advantage of which is to improve the ecology of the protected water area, saving construction materials. The article presents the results of experimental researches on the study of the characteristics of the interaction of surface gravity waves with coastal defense structures in the form of permeable vertical breakwaters. The research was conducted in laboratory conditions on models of single-row penetrating breakwaters, which were located in a wave tray. Visual studies were conducted to record the interaction of wave motion with breakwater models, and instrumental studies of the wave field were also conducted. Parameters of wave movement were recorded by specially developed wave height sensors, which were made on the basis of piezoresistive pressure sensitive elements. Photos and video footage allowed us to evaluate the features of the interaction of the wave field with the studied models of permeable breakwaters. Permeable breakwaters of different permeability were used in the experiments. In addition, the vertical permeable breakwaters were closed by impermeable shields at the top of the breakwaters in the area of the water cut. At the same time, impermeable shields were installed at different depths relative to the water level. Hydrodynamic parameters of the wave field in the vicinity of permeable breakwaters (wave heights, periods and lengths, reflection and transformation coefficients, dissipation coefficient of the wave energy) were measured by a group of wave height sensors, which were located in different places in front of the breakwater models, as well as behind them. Integral and spectral characteristics of the wave field were obtained, the dependences of changes in the hydrodynamic parameters of the wave field were determined, depending on the permeability of the breakwater, the relative depth of the water in the wave tray, and the length of the gravitational wave. The degree of protection of the coastline by permeable vertical breakwaters was determined and the maximum values of wave energy dissipation were obtained depending on the shape, size and permeability of the studied models of vertical single-row breakwaters.

KEY WORDS: gravity wave, permeable breakwater, vertical wall, wave height sensor, wave tray