

УДК 532.593.5

**Igor T. Selezov**, DSci, Leading Scientist of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine  
*e-mail*: igor.selezov@gmail.com

**Volodymyr A. Voskoboinick**, DSci, Head of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine  
ORCID ID: 0000-0003-2161-6923 *e-mail*: vlad.vsk@gmail.com

**Oleksandr A. Voskoboinyk**, PhD, Associate professor of the Department of Technical Hydromechanics of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine  
ORCID ID: 0000-0001-8114-4433 *e-mail*: alexandr.vsk@gmail.com

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

**Andrey V. Voskoboinick**, PhD, Associate professor of the Department of Hydrobionics and Boundary Layer Control of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine  
ORCID ID: 0000-0001-8045-8625 *e-mail*: andrew.vsk@gmail.com

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

## **INTERACTION OF GRAVITATIONAL WAVES WITH PERMEABLE BREAKWATER**

***Abstract.** A method for calculating the parameters of gravitational waves that interact with vertical permeable breakwaters, based on potential theory, has been developed and presented. The wave motion of a fluid was described by the velocity potential that satisfies the Laplace equation. The shape of the wave surface and the components of the velocity vector were determined. Numerical analysis of the influence of permeability of the vertical wall on wave energy adsorption was carried out. The propagation of surface gravitational waves in the linear formulation of problems in a channel with a vertical permeable obstacle was analyzed. The dependence of the wave reflection coefficient as a function of the wave transmission coefficient in accordance with the law of energy conservation was given. Experimental studies have been conducted to determine the features of the hydrodynamic interaction of sea waves and coastal protection structures of the permeable type. The experiments were performed in the laboratory in a wave channel with models of vertical slotted walls of different permeability. Visual and instrumental studies have shown the features of the interaction of the wave field with permeable breakwaters, the formation of reflection and transmission waves through the breakwater. It is established that vertical slotted walls, depending on the permeability, significantly affect the wave field, generate reflected waves and waves passing through the breakwater, as well as lead to a significant dissipation of wave energy. The dependences of the reflection and transmission coefficients of the wave, as well as the dissipation coefficient of the wave energy depending on the permeability of the slotted breakwater and the relative depth of the water area were given. It is shown that with increasing permeability of the breakwater the wave reflection coefficient decreased, and the wave transmission coefficient on the*

*contrary increased. It was found that the reflection coefficient of the wave was increased with increasing relative depth, and the coefficient of wave propagation was decreased. The dissipation coefficient of the wave energy had the maximum value, which was observed for greater permeability of the breakwater, when the relative depth compared to the wavelength was increased.*

**Key words:** *gravitational wave; permeable breakwater; numerical simulation; experimental research; high wave sensors; reflection and transmission waves; wave energy dissipation*

**І.Т. Селезов, В.А. Воскобійник, О.А. Воскобойник,  
А.Г. Харченко, А.В. Воскобійник**

Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

## **ВЗАЄМОДІЯ ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ З ПРОНИКНИМ ХВИЛЕЛОМОМ**

**Анотація.** *Розроблена та викладена методика розрахунку параметрів гравітаційних хвиль, які взаємодіють з вертикальними проникними хвилеломами, на базі потенційної теорії. Хвильовий рух рідини описується потенціалом швидкостей, який задовольняє рівнянню Лапласа. Визначена форма хвильової поверхні та компоненти вектора швидкості. Проведено чисельний аналіз впливу проникності вертикальної стінки на адсорбцію хвильової енергії. Проаналізовано розповсюдження поверхневих гравітаційних хвиль у лінійній постановці задач у каналі з вертикальною проникною перешкодою. Наведено залежність коефіцієнта відбиття хвилі як функцію коефіцієнта проходження хвилі у відповідності до закону збереження енергії. Проведено експериментальні дослідження з визначення особливостей гідродинамічної взаємодії морських хвиль і берегозахисних споруд проникного типу. Експерименти проводилися в лабораторних умовах в хвильовому каналі з моделями вертикальних щільних стінок різної проникливості. Візуальні та інструментальні дослідження показали особливості взаємодії хвильового поля з проникними хвилеломами, формування відбитих та проникних через хвилелом хвиль. Встановлено, що вертикальні щільні стінки залежно від проникності суттєво впливають на хвильове поле, генерують відбиті хвилі та хвилі, що проходять хвилеломом, а також призводять до значної дисипації хвильової енергії. Наведені залежності коефіцієнтів відбиття та проходження хвилі, а також коефіцієнта дисипації хвильової енергії залежно від проникності щільного хвилелому та відносної глибини акваторії. 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 хвилелому, коли відносна глибина в порівнянні з довжиною хвилі збільшувалася.*

**Ключові слова:** *гравітаційна хвиля; проникний хвилелом; чисельне моделювання; експериментальні дослідження; датчики висоти хвиль; відбиті та проникні хвилі; дисипація хвильової енергії*

**DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.96-111>**

## Вступ

Глобальні зміни клімату, потепління, підйом рівня океану зобов'язують людство підвищити вимоги до екологічної безпеки, до охорони навколишнього середовища, зокрема морського узбережжя та суспільно корисної приморської інфраструктури. Захист берегової лінії, об'єктів життєдіяльності, гідротехнічних споруд, морської флори та фауни вимагають неустанної модернізації берегозахисних споруд, що обумовлено кліматичними змінами та збільшенням хвильової енергії моря. Прибережні області відіграють важливу роль в економічному розвитку багатьох країн світу. У цих областях здійснюється будівництво і експлуатація великої кількості житлових, комерційних і промислових будівель, гідротехнічних споруд, причалів, гаваней, які об'єднують внутрішні та зовнішні торгові шляхи країни. Основна проблема розвитку цих територій та прибережних акваторій – це захист від руйнівного впливу хвиль, викликаних штормами і ураганами, повенями, інтенсивність і періодичність яких зростає в зв'язку з кліматичними змінами. Засоби захисту інфраструктури повинні мати високу ефективність, підвищену екологічну безпеку, надійність та довговічність [1]. Згідно з Морською доктриною України на період до 2035 року [2] 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.

Існує багато типів прибережних захисних споруд. Це дамби, буни, берми, хвилеломи та штучні пляжі, бухти, гавані та інші. Сучасні конструкції берегозахисних споруд також поєднують основні функції захисту берега з можливістю їх використання в рекреаційних, транспортних, біотехнологічних та інших цілях. Вибір типу захисної споруди залежить від місцевих фізичних умов, включаючи кліматичні чинники, характер хвильового навантаження, прибережні течії, перенесення твердої фракції прибережними течіями, ерозію берегів [3, 4].

На межі вода – суша неперервно проходять процеси розмиву, переміщення та акумуляції наносів, які в природних умовах приводять до природного перерозподілу твердої речовини. Інженерна діяльність в береговій зоні змінює береги та напрямок руху наносів, може призводити до руйнування природної рівноваги та деформації берега. Тому дуже актуальним є не тільки розробка та удосконалення методів захисту берегової лінії, але й прогноз довготривалого впливу берегозахисної споруди на стійкість берегової лінії та екологію в районі захисту. Перспективні концепції берегозахисних споруд повинні враховувати кліматичні зміни, пов'язані зі зміною рівня моря, яке у свою чергу впливає на прибережні течії, ерозію берегової смуги. Існуючі берегозахисні споруди в деяких місцях втратили свою захисну властивість тому, що були розраховані та збудовані для інших кліматичних умов.

В останні роки у розвитку берегозахисних споруд намітилася тенденція використання проникних конструкцій, перевага яких полягає в поліпшенні екології захищеної акваторії, економії будівельних матеріалів [1, 5]. У проточній воді не накопичується сміття і забезпечується вільна міграція для 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. Критерієм їх ефективності є коефіцієнти пропускання, відбиття та дисипації енергії як регулярних, так і одиночних хвиль [4, 5].

Проектування проникних берегозахисних споруд вимагає розрахунку і експериментального дослідження хвильових і ударних гідродинамічних навантажень на елементи цих споруд. Розроблені до теперішнього часу математичні моделі ґрунтуються, як правило, на лінійній теорії хвиль і їх взаємодії з перешкодами [6, 7]. Сюди відносяться методи розкладання за власними функціями, квазілінійні методи, які враховують нелінійні характеристики локальних областей проникної стінки [1, 8]. Так як існуючі математичні моделі використовують суттєві спрощення, важливою складовою є їх експериментальна перевірка [5, 9]. Експериментальні дослідження проводяться в лабораторних і натурних умовах з використанням сучасного високоточного обладнання та засобів обробки і аналізу даних, включаючи статистичні методи теорії ймовірності та математичної статистики [10–12].

**Мета роботи** – вивчення особливостей гідродинамічної взаємодії морських хвиль і берегозахисних споруд проникного типу на основі розробки чисельних моделей та експериментальних досліджень.

### Постановка задачі та методика досліджень

Розглянемо нестисливу в'язку рідину, яка обмежена вільною поверхнею та дном, як показано на рис. 1. Використаємо прямокутну декартову систему координат  $x, y, z$ . Розв'язок задачі знайдемо у перерізі  $y = 0$ , як показано на схемі. Передбачимо, що на рідину діють масові сили гравітаційного поля  $\vec{F} = \rho g \vec{e}_z$ , де  $\rho$  – щільність рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\vec{e}_z$  – одиничний орт.

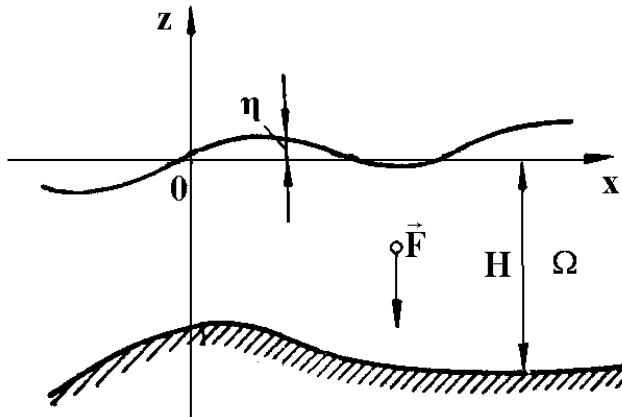


Рис. 1. Геометрія задачі

У незбуреному рівноважному стані вільна поверхня рідини, що покоїться, займає положення  $z = 0$ , а поверхня дна описується рівнянням  $z = -H(x, y)$ . У напрямку координат  $x, y$  рідина може бути безмежною, частково або

повністю обмеженою. Припустимо, що рух рідини безвихровий, а на вільній поверхні не враховуються сили поверхневого натягу. Якщо на поверхні рідини, що спочатку є нерухомою, виникають хвилі, то зі знехтуванням сил в'язкості хвилі можна вважати безвихровими з достатнім ступенем точності. Це впливає з теореми Гельмгольца, а саме, циркуляція вздовж замкненої кривої є постійною в часі.

За зазначеними припущеннями хвильові рухи рідини описуються потенціалом швидкостей, який задовольняє рівнянню Лапласа

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad \vec{v} = \vec{\nabla} \varphi, \quad (1)$$

в області  $\Omega$  маємо  $x^s(y, t) \leq x < \infty, \quad -\infty < y < \infty, \quad -H(x, y) \leq z \leq \eta(x, y, t)$ .

Потенціал швидкостей  $\varphi$  повинен задовольняти наступним граничним умовам на вільній поверхні  $z = \eta(x, y, t)$ :

кінематичній умові

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

динамічній умові

$$g\eta + \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] = F(x, y, t), \quad (3)$$

умові на дні  $z = -H(x, y)$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

початковим умовам

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z, t) \Big|_{t=0} &= f_1(x, y, z), \\ \frac{\partial \varphi(x, y, z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} &= f_2(x, y, z). \end{aligned} \quad (5)$$

Тут  $t$  – час;  $\eta(x, y, t)$  – відхилення вільної поверхні;  $\vec{v}$  – вектор швидкості;  $\vec{\nabla}$  – оператор градієнта  $\vec{\nabla} = \vec{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \vec{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \vec{e}_z \frac{\partial}{\partial z}$ ;  $x^s(y, t)$  – лінія перетину вільної поверхні рідини з берегом;  $F(x, y, t)$ ,  $f_1(x, y, z)$  і  $f_2(x, y, z)$  – задані функції. Функція  $F(x, y, z) = 0$  всюди, крім області  $\Omega$ , де задані поверхневі збурення.

Наведена постановка (1)–(5) відноситься до випадку, коли в момент часу  $t = 0$  виникають збурення на поверхні рідини в області  $D$  і потрібно визначити подальший рух рідини, зокрема, повинні бути визначені форма вільної поверхні  $z = \eta(x, y, t)$  та компоненти вектора швидкості  $\vec{v}$ .

Припустимо тепер, що компоненти вектора швидкості  $\vec{v}$ , відхилення вільної поверхні  $\eta$  та відповідні похідні є малими величинами, квадратами та добутками яких можна знехтувати порівняно з лінійними членами. У цьому випадку рівняння (2) та (3) спрощуються та набувають вигляду

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0; \quad g\eta + \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \quad \text{при } z = 0. \quad (6)$$

Якщо з цих рівнянь виключити  $\eta$ , можна отримати умову

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad \text{при } z = 0. \quad (7)$$

Наведена постановка задачі може бути тільки наближеною відповіддю до реальних хвильових процесів, адже розв'язок конкретних задач у межах моделі (1)–(5) становить великі труднощі.

Розповсюдження хвиль у мілководній частині не розглядається, а застосовуються наближення, які засновано на малості відношення вертикального масштабу глибини  $H = H_{\max}$  до горизонтального масштабу  $l$  (у разі регулярних хвиль це довжина хвилі  $l = \lambda$ ) [13].

Середній потік енергії хвиль на одиницю довжини гребня хвилі, що проходить через фіксовану вертикальну поверхню, паралельну гребню, дорівнює [14]

$$F_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{\eta} \left( \rho \frac{V^2}{2} + p + \rho g z \right) u \, dz \, dt, \quad (8)$$

або з урахуванням рівняння Бернуллі, в якому  $f(t)$  передбачається включеною в похідну  $\partial \varphi / \partial t$ , з (8) отримуємо

$$F_{\text{cp}} = -\rho \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \, dz \, dt. \quad (9)$$

Ця формула придатна для будь-якого безвихрового хвильового руху, лінійного чи нелінійного. У випадку лінійної періодичної прогресивної хвилі маємо

$$\varphi = -\eta \frac{\omega \operatorname{ch} k(d+z)}{k \operatorname{sh} kd} \cos(\omega t - kx). \quad (10)$$

Підставляючи (10) до (9) і нехтуючи деякими членами вищих порядків, отримуємо у разі нескінченно глибокої води

$$F_{cp} |_{d \rightarrow \infty} = \frac{1}{4} \rho g \eta^2 \frac{gT}{2\pi},$$

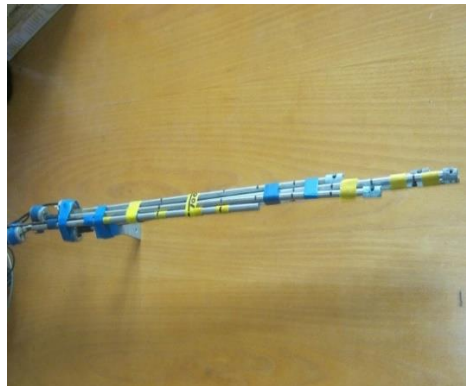
а у випадку мілкої води

$$F_{cp} |_{d \rightarrow 0} = \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \sqrt{gd}.$$

Відповідно до закону збереження енергії, в умовах відсутності дисипації хвильової енергії вертикальною проникною стінкою, енергія набігаючого хвильового поля дорівнює сумі енергії відбитих хвиль і енергії хвиль проходження через проникну стінку. Це характеризується коефіцієнтами відбиття  $k_r$  та проходження  $k_t$  хвилі. Коефіцієнт  $k_r$  представляє собою відношення енергії відбитої хвилі до енергії набігаючої хвилі, а коефіцієнт проходження  $k_t$  являє собою відношення енергії проходження хвилі до енергії набігаючої хвилі. При цьому коефіцієнт проходження хвилі характеризує опір абсорбуючого матеріалу. Із закону збереження енергії випливає, що  $\sqrt{k_r^2 + k_t^2} = 1$  за відповідного нормування.



а



б

Рис. 2. Експериментальний стенд (а) та п'єзорезистивні датчики висоти хвиль (б)

### Програма та методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводилися у хвильовому каналі 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 щільним похилим поглиначем хвиль (в кінці каналу). Усередині каналу на відстані близько 40 м від генератора хвиль встановлювалися на плоску піщану основу товщиною 0,2 м проникні хвилеломні у вигляді вертикальних щільних стінок (рис. 2а). Таким чином, 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 щільної 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 (рис. 2б) [15, 16]. 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. Ці датчики встановлювалися в тонкостінних трубках (рис. 2б), нижні кінці яких поміщалися у воду. Під дією хвильового руху стовп води в трубках змінювався і викликав осциляції тиску всередині трубок, які реєструвалися п'єзорезистивними датчиками. В експериментах застосовувалися датчики, які мали роздільну здатність до 0,2 Па або 0,02 мм водяного стовпа. Ці датчики реєстрували як статичний, так і динамічний тиск. Калібрування та тарування п'єзорезистивних датчиків висоти хвилі проводилося як абсолютними, так і відносними методами.

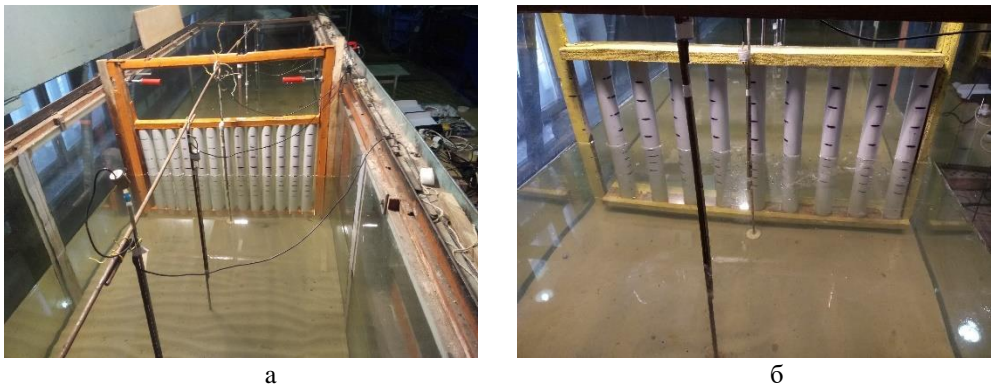


Рис. 3. Однорядні циліндричні моделі хвилеломів проникністю 20% (а) та 50% (б) всередині хвильового каналу

Експерименти проводилися з однорядними щільними стінками різної проникності, які розташовувалися всередині хвильового каналу паралельно до фронту регулярних хвиль (рис. 3). Стінки були виготовлені із вертикальних циліндрів діаметром 0,05 м, між якими залишалися щілини. Проникність таких стінок (відношення площі щілин до площі стінки) змінювалася від 0% (суцільна вертикальна стінка) до 60%.

Візуалізація хвильового руху та особливостей формування струменевої та вихрової течії між циліндрами щільної стінки та в околі самої стінки проводилася за допомогою кольорових барвників та чорнил. Чорнила вводилися в потік за допомогою мініатюрних трубок. Траєкторії руху струмінців чорнил реєструвалися цифровими фотоапаратами та відеокамерами. Відео- та фотоматеріал подавався на спеціально створену комп'ютерну графічну станцію, де за спеціальними програмами оброблявся та аналізувався [17–19].



## Результати дослідження

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.

Відомо, що ефективність хвилеломів або вертикальних стінок, що експлуатуються як берегозахисні споруди, визначається особливостями формування відбитих хвиль та хвиль, що проходять крізь хвилелом, а також здатністю поглинання або 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 за допомогою виміру висот хвиль перед проникним хвилеломом і за ним.

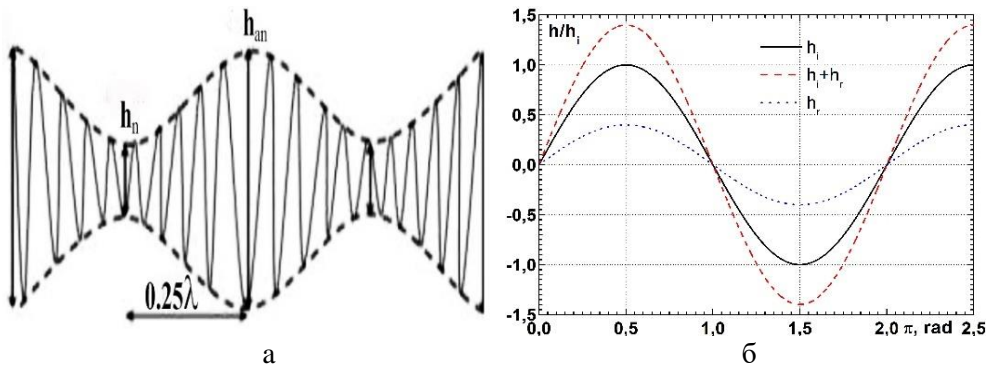


Рис. 4. Схеми визначення висот хвиль двоточковим методом (а) та одноточковим методом (б)

Висота відбитої хвилі визначалася двома способами. Перший метод – це визначення висоти відбитої хвилі за допомогою двох датчиків висоти хвилі, один з яких знаходився на відстані довжини хвилі ( $\lambda$ ) від хвилелому, а інший – на відстані  $1,25\lambda$  від хвилелому. Перший датчик вимірював висоту хвилі ( $h_{an}$ ) в пучності стоячої хвилі, яка формувалася в результаті інтерференції набігаючої хвилі та відбитої хвилі. Другий датчик вимірював висоту хвилі ( $h_n$ ) у вузлі стоячої хвилі (рис. 4а).

Висота набігаючої хвилі визначалася як

$$h_i = \frac{h_{an} + h_n}{2}, \quad (11)$$

а висота відбитої хвилі визначалася як

$$h_r = \frac{h_{an} - h_n}{2}. \quad (12)$$

Звідси коефіцієнт відбиття хвилі визначався як

$$k_r = \frac{h_r}{h_i} = \frac{h_{an} - h_n}{h_{an} + h_n}. \quad (13)$$

Разом з двоточковим методом застосовувався метод визначення висоти відбитої хвилі з вимірюванням висоти стоячої хвилі датчиком висоти хвилі, який розташовувався по осі хвильового каналу перед хвилеломом на віддаленні більше однієї довжини набігаючої хвилі. При цьому висота набігаючої хвилі була виміряна в тестових дослідженнях роботи генератора хвиль в умовах відсутності хвилелому всередині хвильового каналу та абсорбції хвиль. Висота відбитої хвилі визначалася за допомогою віднімання висоти набігаючої хвилі з висоти стоячої хвилі, як схематично показано на рис. 4б. Таке представлення можливе, коли стояча хвиля є суперпозицією набігаючої і відбитої хвилі, які мають однаковий період і швидкість переносу (швидкості протилежно спрямовані). В результаті швидкість переміщення стоячої хвилі в поздовжньому напрямку дорівнює нулю і стояча хвиля робить тільки вертикальні коливання. Для даного методу визначення висоти відбитої хвилі коефіцієнт відбиття хвилі визначався як

$$k_r = \frac{h_r}{h_i}. \quad (14)$$

На значення коефіцієнтів відбиття та 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, то відбуваються суттєві зміни хвильового поля. Спостерігається інтерференція, дифракція та трансформація хвиль, з'являються відбиті, стоячі та проникні хвилі, виникає обвалення хвиль [20, 21]. 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 і рідиною, що рухається, а також розсіювання або дисипації енергії хвилі.

Закон збереження енергії вихідної гравітаційної хвилі, що взаємодіє з проникним хвилеломом, виражається так:

$$E_i = E_r + E_t + E_d, \quad (15)$$

де  $E_i$  – енергія набігаючої хвилі ( $E_i = \rho g h_i^2 / 8$ );  $E_r$  – енергія відбитої хвилі ( $E_r = \rho g h_r^2 / 8$ );  $E_t$  – енергія проникної хвилелом хвилі ( $E_t = \rho g h_t^2 / 8$ );  $E_d$  – енергія дисипації хвилі. Підставляючи в рівняння (15) значення  $E_r$ ,  $E_t$  і  $E_d$ , а також розділивши складові цього рівняння на  $E_i$ , отримуємо:

$$1 = (h_r / h_i)^2 + (h_t / h_i)^2 + E_d / E_i \quad (16)$$

або

$$k_e = 1 - (k_r^2 + k_t^2). \quad (17)$$

Коефіцієнти відбиття і проникнення хвиль, а також коефіцієнти дисипації хвильової енергії залежно від проникності щілинних стінок та відносної глибини представлені на рис. 5. Результати вимірювання цих коефіцієнтів наведено для різних глибин, які нормовані довжиною хвилі ( $H / \lambda$ ). Крива 1 виміряна для відносної глибини  $H / \lambda = 0,03$ ; крива 2 виміряна для  $H / \lambda = 0,06$ ; крива 3 –  $H / \lambda = 0,11$ ; крива 4 –  $H / \lambda = 0,16$ ; крива 5 –  $H / \lambda = 0,22$ ; крива 6 –  $H / \lambda = 0,30$  і крива 7 –  $H / \lambda = 0,42$ . Результати дослідження, які наведено на рис. 5а, показують, що зі збільшенням проникності щілинної стінки коефіцієнти відбиття хвилі монотонно зменшуються. При цьому темп зменшення коефіцієнтів вищий для стінок малої проникності. Суцільний хвилелом повністю відбиває набігаючу хвилю і коефіцієнт відбиття хвилі для такого хвилелому  $k_r = 1$ . Зі збільшенням безрозмірної глибини ( $H / \lambda$ ) коефіцієнти відбиття хвилі збільшуються, як показано на рис. 5а.

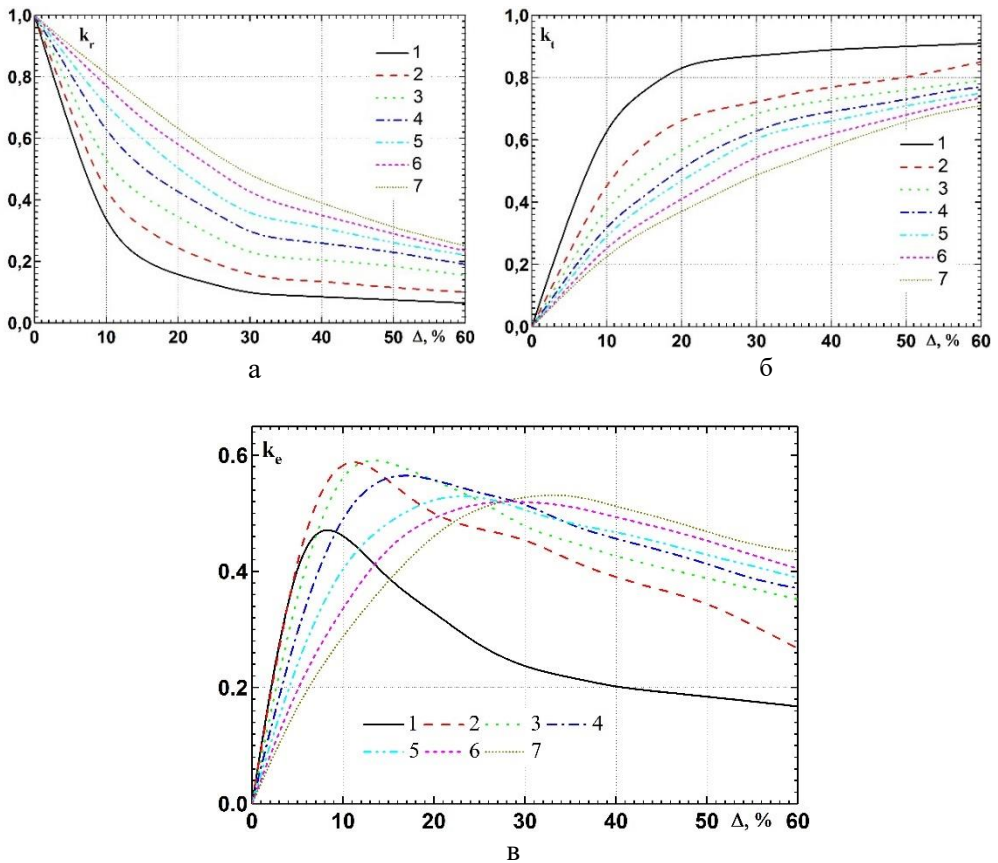


Рис. 5. Коефіцієнти відбиття (а) і проникнення (б) хвиль та дисипації хвильової енергії (в) в залежності від проникності хвилелому

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. 5а та рис. 5б). Зі збільшенням проникності та зменшенням глибини або збільшенням довжини хвилі коефіцієнт проходження хвилі збільшується.

Як показали результати дослідження (рис. 5в), 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.

## Висновки

Проведено чисельний аналіз впливу проникності вертикальної стінки на адсорбцію хвильової енергії. Проаналізовано розповсюдження поверхневих гравітаційних хвиль у лінійній постановці задач у каналі з вертикальною проникною перешкодою. Наведено залежність коефіцієнта відбиття хвилі як функцію коефіцієнта проходження хвилі у відповідності до закону збереження енергії.

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.

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 спостерігалася для більшої проникності, коли відносна глибина в порівнянні з довжиною хвилі збільшувалася.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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>
2. 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)*.
3. Eaton, M.J., Johnson, F.A., Mikels-Carrasco, J., et al. (2021). *Cape Romain Partnership for Coastal Protection*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1021. <https://doi.org/10.3133/ofr20211021>

4. 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>
5. 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>
6. 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>
7. Khimich, A.N., Selezov, I.T., & Sydoruk, V.A. (2020). Simulation of elastic wave diffraction by a sphere in semibounded region. *Reports (Dohovidi) of NAS of Ukraine*, 10, 22-27. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.10.022>
8. Poguluri, S.K., & Cho, I.H. (2021). Wave dissipation over a horizontal slotted plate with a leeside vertical seawall: analytical and numerical approaches. *Coastal Engineering J.*, 63(1), 52-67. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1850396>
9. Chooanizade, 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>
10. Bendat, Ju.S., & Piersol, A.G. (2010). *Random Data: Analysis and Measurement Procedure*, Wiley.
11. 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>
12. 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. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93(5), 1205-1220. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>
13. Whitham, G.B. (1999). *Linear and nonlinear waves*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118032954>
14. Le Mehaute, B. (1976). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-85567-2>
15. 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>
16. Voskoboinick, V.A., Voskoboinick, A.V., Areshkovych, O.O., & Voskoboinyk, O.A. (2016). Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. *Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016*. (pp. 905-910). Oxford, UK. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
17. Voskobijnyk, 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. 8<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016*. (pp. 897-903). Oxford, UK. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-114>
18. Voskoboinick, A., Voskoboinick, V., Turick, V., Voskoboinyk, O., Cherny, D., & Tereshchenko, L. (2021). Interaction of group of bridge piers on scour. In Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He (Eds.), *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1247*. (pp. 3-17). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_1)
19. 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*. (pp. 35-50). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4_3)

20. Koraim, A.S. (2014). Hydraulic characteristics of pile-supported L-shaped bars used as a screen breakwater. *Ocean Engineering*, 83, 36-51. <https://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.03.016>
21. Reddy, M.S., & Neelamani, S. (1992). Wave transmission and reflection characteristics of a partially immersed rigid vertical barrier. *Ocean Engineering*, 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 17.02.2022 і прийнята до друку після рецензування 26.05.2022

## REFERENCES

1. 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. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8506-7>
2. Mors'ka doktryna Ukraine na period do 2035. (2020). *Postanova Kabinety Ministriv Ukraine vid 18 grudnya 2018 r. № 1108 (Iz zminamy, vnesenyму zgidno z Postanovoyu KM № 1023 vid 28.10.2020)* [In Ukrainian].
3. Eaton, M.J., Johnson, F.A., Mikels-Carrasco, J., et al. (2021). *Cape Romain Partnership for Coastal Protection*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1021. doi: <https://doi.org/10.3133/ofr20211021>
4. 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.003>
5. 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. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse8080589>
6. Selezov, I.T., Kryvonos, Yu.G., & Gandzha, I.S. (Eds.) (2018). *Wave propagation and diffraction. Mathematical methods and applications*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4923-1>
7. Khimich, A.N., Selezov, I.T., & Sydoruk, V.A. (2020). Simulation of elastic wave diffraction by a sphere in semibounded region. *Reports (Dohovidi) of NAS of Ukraine*, 10, 22-27. doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.10.022>
8. Poguluri, S.K., & Cho, I.H. (2021). Wave dissipation over a horizontal slotted plate with a leeside vertical seawall: analytical and numerical approaches. *Coastal Engineering J.*, 63(1), 52-67. doi: <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1850396>
9. Chooanizade, 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107895>
10. Bendat, Ju.S., & Piersol, A.G. (2010). *Random Data: Analysis and Measurement Procedure*, Wiley.
11. 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. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01051721>
12. 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. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93(5), 1205-1220. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>
13. Whitham, G.B. (1999). *Linear and nonlinear waves*. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118032954>
14. Le Mehaute, B. (1976). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer-Verlag. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-85567-2>

15. 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. doi: <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9433-9>
16. Voskoboinick, V.A., Voskoboinick, A.V., Areshkovych, O.O., & Voskoboinyk, O.A. (2016). Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. In *Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016*. (pp. 905-910). Oxford, UK. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
17. Voskobijnyk, 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. In *Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016*. (pp. 897-903). Oxford, UK. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315375045-114>
18. Voskoboinick, A., Voskoboinick, V., Turick, V., Voskoboinyk, O., Cherny, D., & Tereshchenko, L. (2021). Interaction of group of bridge piers on scour. In Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He (Eds.), *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1247*. (pp. 3-17). Springer. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_1)
19. 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*. (pp. 35-50). Springer. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4_3)
20. Koraim, A.S. (2014). Hydraulic characteristics of pile-supported L-shaped bars used as a screen breakwater. *Ocean Engineering*, 83, 36-51. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.03.016>
21. Reddy, M.S., & Neelamani, S. (1992). Wave transmission and reflection characteristics of a partially immersed rigid vertical barrier. *Ocean Engineering*, 19(3), 313-325. doi: [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(92\)90032-Y](https://doi.org/10.1016/0029-8018(92)90032-Y)

*The article was received 17.02.2022 and was accepted after revision 26.05.2022*

#### **Селезов Ігор Тимофійович**

доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

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

**e-mail:** igor.selezov@gmail.com

#### **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: 0000-0003-2161-6923 **e-mail:** vlad.vsk@gmail.com

#### **Воскобойник Олександр Анатолійович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу технічної гідромеханіки Інституту гідромеханіки НАН України

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

ORCID ID: 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: 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: 0000-0001-8045-8625 **e-mail:** andrew.vsk@gmail.com