

***В. А. ВОСКОБІЙНИК, О. А. ВОСКОБОЙНИК, А. В. ВОСКОБІЙНИК, А. Г. ХАРЧЕНКО***

### **МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ХВИЛЬ З ЗАХИСНОЮ ДАМБОЮ МОРСЬКОГО КАНАЛУ ДУНАЙ – ЧОРНЕ МОРЕ**

Забезпечення безперерйного судноплавства по річці Дунай і найкоротший вихід у Чорне море є пріоритетним напрямком реалізації сьомого міжнародного транспортного коридору, який об'єднує країни Європи та Азії. З цією метою було збудовано огорожувальну дамбу Морського каналу глибоководного суднового ходу Дунай – Чорне море, яка під час штормових хвиль та льодового навантаження була частково зруйнована. Це викликало необхідність проведення науково-дослідних робіт з метою підсилення експлуатаційної стійкості дамби та забезпечення її ефективного використання. В роботі наведені результати чисельного і фізичного моделювання взаємодії хвиль з захисною дамбою Морського каналу суднового ходу Дунай – Чорне море та навантажень на конструкцію дамби. Математичне моделювання було виконане з застосуванням рефракційної та спектральної моделі SWAN, а також моделі XBeach. Експериментальні роботи було проведено в лабораторних умовах в хвильовому каналі. Було отримано розрахункове розподілення хвильового поля поблизу дамби в умовах штормового нагону та визначені просторово-часові характеристики пульсації хвильового тиску на обтічну поверхню моделі захисної дамби. Отримано інтегральні та спектральні характеристики поля пульсації тиску та запропоновано багатоступінчасту форму дамби з двома бермами, яка суттєво зменшує хвильове навантаження та є стійкою до штормових хвиль. Берми виконали функції підводних хвилеломів та значно зменшили енергію хвильового впливу на верхню частину дамби. Визначено оптимальну форму дамби та геометричні параметри її фронтальної поверхні. Запропоновано в натурних умовах побудувати мористу частину захисної дамби з такими параметрами: нижній глибоководний укіс з нахилом 1 : 1,5, далі на глибині 4 м нижня берма шириною 10 м. Потім зробити укіс з нахилом 1 : 5, а далі на глибині 2 м встановити верхню берму шириною 10 м. Закінчити захисну огорожувальну дамбу Морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай – Чорне море рекомендується гребенем під нахилом 1 : (3 – 3,5). Облицювання фронтальної частини дамби слід зробити з кам'яного накиду камінням фракції 1,2 м.

**Ключові слова:** хвильове навантаження, захисна дамба, математичне моделювання, експериментальні дослідження, пульсації тиску, берма, укіс.

### ***В. А. ВОСКОБОЙНИК, А. А. ВОСКОБОЙНИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК, А. Г. ХАРЧЕНКО*** **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН С ЗАЩИТНОЙ ДАМБОЙ МОРСКОГО КАНАЛА ДУНАЙ – ЧЕРНОЕ МОРЕ**

Обеспечение бесперебойного судоходства по реке Дунай и кратчайший выход в Черное море являются приоритетным направлением реализации седьмого международного транспортного коридора, объединяющего страны Европы и Азии. С этой целью была построена ограждающая дамба Морского канала глибоководного судового хода Дунай – Черное море, которая во время штормовых волн и ледовой нагрузки была частично разрушена. Это вызвало необходимость проведения научно-исследовательских работ в целях усиления эксплуатационной устойчивости дамбы и обеспечения ее эффективного использования. В работе представлены результаты численного и физического моделирования взаимодействия волн с защитной дамбой Морского канала судового хода Дунай – Черное море и нагрузок на конструкцию дамбы. Математическое моделирование выполнено с применением рефракционной и спектральной модели SWAN, а также модели XBeach. Экспериментальные работы были проведены в лабораторных условиях в волновом канале. Было получено расчетное распределение волнового поля у дамбы в условиях штормового нагона и определены пространственно-временные характеристики пульсаций волнового давления на обтекаемую поверхность модели защитной дамбы. Получены интегральные и спектральные характеристики поля пульсаций давления и предложена многоступенчатая форма дамбы с двумя бермами, которая существенно уменьшает волновую нагрузку и устойчива к штормовым волнам. Бермы выполнили функции подводных волноломов и значительно снизили энергию волнового воздействия на верхнюю часть дамбы. Определены оптимальная форма дамбы и геометрические параметры ее фронтальной поверхности. Предложено в натурных условиях построить мористую часть защитной дамбы со следующими параметрами: нижний глибоководный откос с наклоном 1 : 1,5, далее на глубине 4 м нижняя берма шириной 10 м. Затем сделать откос с наклоном 1 : 5, а затем на глубине 2 м установить верхнюю берму шириной 10 м. Закончить защитную ограждающую дамбу Морского подходного канала глибоководного судового хода Дунай – Черное море рекомендуется гребнем под наклоном 1 : (3 – 3,5). Облицовку фронтальной части дамбы следует произвести из каменного накида камнями фракции 1,2 м.

**Ключевые слова:** волновая нагрузка, защитная дамба, математическое моделирование, экспериментальные исследования, пульсации давления, берма, откос.

### ***V. A. VOSKOBOINICK, O. A. VOSKOBOINYK, A. V. VOSKOBIINYK, A. G. KHARCHENKO*** **SIMULATION OF INTERACTION OF WAVES WITH THE PROTECTIVE DAM OF THE DANUBE – BLACK SEA MARINE CHANNEL**

Ensuring uninterrupted navigation on the Danube River and the shortest exit to the Black Sea is a priority direction for the implementation of the seventh international transport corridor, which unites the countries of Europe and Asia. For this purpose, the protection dam of the Marine channel of the Danube-Black Sea deep-sea passage was built, which was partially destroyed by storm waves and ice load. This made it necessary to carry out scientific researches in order to strengthen the operational stability of the dam and ensure its effective use. The paper presents the results of numerical and physical simulation of the interaction of waves with the protective dam of the Marine channel of the Danube-Black Sea and loads on the dam structure. Mathematical simulation was performed using the SWAN refraction and spectral model, as well as the XBeach model. Experimental research was carried out in laboratory conditions in a wave channel. The estimated distribution of the wave field near the dam under storm surge conditions was obtained and the space-time characteristics of wave pressure fluctuations on the streamlined surface of the protective dam model were determined. Integral and spectral characteristics of the pressure fluctuation field were obtained and a multi-stage form of a dam with two berms was proposed, which significantly reduced the wave load and was resistant to storm waves. The berms performed the functions of underwater breakwaters and significantly reduced the energy of the wave impact on the upper part of the dam. The optimal shape of the dam and the geometric parameters of its frontal surface were determined. It is proposed to build the seaward part of the protective dam under natural conditions with the following parameters: a lower deep-water slope with a slope of 1 : 1,5, then at a depth of 4 m a lower berm with a width of 10 m. Then make a slope with a slope of 1 : 5, and then at a depth of 2 m to install an upper berm with a width of 10 m. It is recommended to finish the protective dam of the Marine channel of the Danube-Black Sea deep-sea passage with a ridge with a slope of 1 : (3 – 3,5). The facing of the frontal part of the dam should be made of stone overburden with stones of fraction 1,2 m.

**Key words:** wave load, protective dam, mathematical simulation, experimental research, pressure fluctuations, berm, slope.

**Вступ.** Збільшення обсягів вантажоперевезень між центральними і північними європейськими країнами та країнами чорноморського узбережжя вимагає збільшення судноплавства по річці Дунай, яка є найбільшою міжнародною водною артерією Європи. Поглиблення гирла Бистре Кілійської дельти Дунаю забезпечує реалізацію транспортної магістралі сьомого міжнародного транспортного коридору, який об'єднує країни Європи та Азії. Захист Морського каналу глибоководного суднового ходу Дунай – Чорне море від наносів під час штормів північного та північно-східного напрямку, які є найпотужнішими в цій акваторії Чорного моря, забезпечується захисною дамбою. Крім того, ця дамба дає можливість безперешкодно заходити та виходити з каналу річковим та морським суднам у період сильних вітрів та штормових хвиль в осінньо-зимовий період. Морський підхідний канал має довжину близько 3,4 км, ширину (85 – 100) м та глибину (7 – 9) м на барі гирла Бистре [1, 2]. Огороджувальна дамба Морського підхідного каналу (рис. 1, а) довжиною 2,73 км виконана з кам'яного накиду гірської маси різних фракцій від 0,3 м (в ядрі та нижній частині дамби) до (0,9 – 1,2) м у верхній мористій частині дамби (рис. 1, б).

До будівництва регулюючої дамби глибоководного суднового ходу бар гирла Бистре відноситься до річково-морського типу з помітним впливом на його динаміку морських факторів. Характерною особливістю роботи бару тоді було його висунання в повінь та часткове руйнування висунутої частини бару в межінь. Після будівництва дамби зміни барової ділянки гирла відбувалися в межах огороженої території, а також по периметру дамби та коси Пташина. Дія штормів фронтальних до осі підхідного каналу (схід, північний-схід, південний-схід) призводить до збільшення швидкості течії в каналі та утворення тут промивного струменя, який простежується до гирла каналу. В 2014 році на акваторії Чорного моря в районі огорожувальної дамби за складних гідрометеорологічних умов, які визначались посиленням штормового вітру; підвищенням вітрового нагону та посуванням льодових полів, виникла серія жорстких штормів, які призвели до часткової деформації окремих ділянок надводної частини огорожувальної дамби (гребня огорожувальної дамби). Ці штормові умови були обтяжені рухом льодів на дамбу і зледенінням кам'яної накидки самої дамби. В результаті облицювання дамби з каменів великої фракції частково перемістилося вниз по укусу дамби та оголило її ядро, а гребінь дамби був зруйнований у кількох місцях [1, 2].



а



б

Рис. 1 – Огороджувальна дамба Морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай – Чорне море: а – загальний вигляд дамби; б – фрагмент кам'яного накиду гірської маси.

Тому постало завдання забезпечити надійну та безаварійну експлуатацію дамби. На практиці захист берегоукріплювальних та гідротехнічних споруд від дії штормових хвиль здійснюється за рахунок різного виду та типів хвилеломів або хвилерізів. Хвильові споруди відбивають енергію хвиль повністю (вертикальна стінка або вертикальний хвилелом) або частково (пальові або проникні хвилеломи) [3, 4]. Укісні споруди утворюють поглинаючу дію на хвилю і забезпечують повне гасіння її енергії. Перед спорудами вертикального профілю генеруються стоячі хвилі у разі часткового або повного відбиття хвиль, що набігають. На укісних спорудах хвилі гасяться, а стоячі хвилі не формуються. На великих глибинах переважно використовуються вертикальні стінки, але на малих глибинах застосовуються укісні споруди [5]. Укісні або похилі хвилеломи, дамби, моли будуються з ґрунтової або кам'яної основи або ядра, облицьованого кам'яним накидом скельного каменю великої фракції або бетонними блоками спеціальної форми. Такі берегозахисні споруди під дією штормових хвиль зазнають максимальних навантажень на шар облицювання. У більшості випадків ядро такої споруди не руйнується. Поперечний переріз укісних хвилеломів або дамб залежить від розрахункового хвильового клімату, орієнтації захисної споруди, глибини моря, структури ґрунту та інших гідроморфодинамічних параметрів.

**Мета роботи** – на основі математичного та фізичного моделювання розробити рекомендації щодо удосконалення та реконструкції захисної огорожувальної дамби Морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай – Чорне море в акваторії гирла Бистре Кілійської дельти р. Дунай.

**Математичні моделі, експериментальний стенд та методика досліджень.** Математичне моделювання хвильового навантаження на захисну огорожувальну дамбу Морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай – Чорне море та морфодинамічних процесів в акваторії гирла Бистре Кілійської дельти р. Дунай було виконано за допомогою рефракційної та спектральної моделі SWAN [6], а також моделі XBeach [7].

Трансформація вітрових хвиль над природним або штучним рельєфом морського дна в повній нелінійній постановці є надзвичайно складною проблемою. Тому для вирішення завдань, пов'язаних з літодинамічними процесами, стійкістю і ефективною роботою берегозахисних споруд, зазвичай використовують *теорію рефракції*. Перевагою такого підходу є зведення завдання про розповсюдження хвиль в рідині змінної глибини до *системи п'яти звичайних диференціальних рівнянь*, що значно знижує об'єм обчислень, необхідних для її вирішення, і дозволяє за допомогою сучасних комп'ютерів порахувати трансформацію хвиль в акваторіях, розміри яких на декілька порядків перевищують довжину хвилі.

Модель SWAN – це *модель генерації хвиль третього покоління* для отримання оцінок параметрів хвиль у прибережних районах, озерах та лиманах від заданих параметрів вітру, дна та течій [6]. Однак модель SWAN можна використовувати в будь-якому масштабі, що стосується поверхневих гравітаційних хвиль. Модель базується на *рівнянні балансу хвильової дії* (або *енергетичному балансі* за відсутності течій) з джерелами та стоками. Основна мета моделі SWAN – вирішити рівняння балансу спектральної дії без будь-яких апріорних обмежень на спектр для еволюції росту хвиль. В цій моделі рівняння описують ефекти просторового розповсюдження, рефракції, масштабування, генерації, дисипації та нелінійної взаємодії хвиль з хвилями та дном водойми. Основна наукова ідея моделі SWAN ідентична *моделі WAM третьої версії*. SWAN представляє собою хвильову модель третього покоління, і вона використовує ті самі формулювання для похідних термінів. Тоді як модель WAM розглядає проблеми океанічних масштабів, у моделі SWAN розповсюдження хвиль розраховується від глибокої води до зони прибою.

На морфодинамічні процеси в береговій зоні моря основний вплив роблять вітрові хвилі і, викликані ними, хвильові течії. Напрямок поширення хвиль і їх інтенсивність визначаються вітровою дією, а також особливостями берегової лінії і дна. Крім цього, на трансформацію хвиль поблизу берега впливають локальні гідродинамічні процеси, такі, як коливання підйому та спаду води, які можуть призводити до істотного збільшення динамічної глибини [7]. *Модель XBeach* включає в себе взаємодіючі блоки з розрахунку коротких вітрових хвиль, *баротропних* течій і динаміки наносів. Короткі хвилі в моделі описуються нестационарним рівнянням балансу хвильової енергії в спектральній формі. Для опису передачі енергії від обвалених хвиль до бурунів використовується *рівняння балансу енергії бурунів* [7].

Для проведення чисельного моделювання була використана *напівемпірична методика розрахунку трансформації неруйнівних і руйнівних гравітаційних хвиль* у процесі їх проходження над берегоукріплювальними спорудами складної форми на підставі потенційної *теорії невязкої нестисливої рідини кінцевої глибини* [8]. Результати розрахунків показали, що наявність берми на греблі призводить до трансформації хвиль, яка супроводжується руйнуванням хвиль на краю берми частковим відбиттям хвиль від нерівностей кам'яного облицювання дамби та підводного бенкету берми.

Взаємодія хвильового потоку з конструкцією похилого хвилелому або дамбою і з їх облицювальним шаром вкрай складна, нелінійна і нестационарна, що істотно ускладнює чисельне моделювання і, в більшості випадків, вимагає проведення експериментальних досліджень. Одна з основних проблем – це визначення необхідної ваги облицювального каменю, що має конкретну форму та питому вагу, для розміщення його на споруді із заданим нахилом, на яке діє штормова хвиля певної висоти та довжини. Коефіцієнт стійкості облицювального каменю визначався з виразу:

$$N_s = h_{2\%} / (S - 1)(W / \gamma_s)^{1/3}, \quad (1)$$

де  $h_{2\%}$  – висота хвилі 2% забезпеченості;  $S$  – питома вага каменю в повітрі;  $W$  – необхідна вага облицювального каменю;  $\gamma_s$  – питома вага одиниці кам'яного облицювання.

На гребінь дамби діють вертикальні та горизонтальні сили, які призводять до переміщень та підйомів кам'яного облицювання та каміння ядра дамби в умовах сильного штормового хвилювання [9]. При цьому найбільш поширеним видом руйнування гребня є перекочування і ковзання кам'яної накидки. Гребінь буде стійким, коли сили тертя та кочення будуть меншими за критичні параметри. Це забезпечується виготовленням кам'яного гребня достатньої ваги та шорсткості. Кутасте каміння має перевагу перед гладким кулястим камінням [10].

Коефіцієнт відбиття хвилі від огорожувальної дамби розраховувався за залежністю:

$$k_r = h_r / h_0 = \sqrt{E_r / E_0}, \quad (2)$$

де  $h_r$  – висота відбитої хвилі;  $h_0$  – висота хвилі, що набігає;  $E_r$  і  $E_0$  – енергії відбитої і набігаючої хвилі, відповідно.

Коефіцієнт руйнування хвилі визначалося за залежністю:

$$\xi = \operatorname{tg} \alpha / \sqrt{h_0 / \lambda_0}, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – кут нахилу дамби і  $\lambda_0$  – довжина хвилі на глибокій воді, яка визначалася за залежністю:

$$\lambda_0 = gT^2 / 2\pi, \quad (4)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння;  $T$  – період хвилі.

Хвильове навантаження на гребінь дамби розраховувалося за залежністю:

$$E_c = 1/8(\rho g h_0^2 \lambda), \quad (5)$$

де  $\rho$  – густина води;  $\lambda$  – довжина хвилі для мілкої води, яка розраховувалася як:

$$\lambda = gT^2 / 2\pi \tanh 2\pi H / \lambda_0, \quad (6)$$

де  $H$  – глибина води.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторному хвильовому каналі довжиною 15 м, шириною 0,4 м і глибиною 0,8 м, де розташовувалися моделі захисних дамб у масштабі 1 : 50. Канал було обладнано щитовим хвилегенератором, який утворював хвилі періодом від 0,5 с до 3 с і висотою від 0,02 м до 0,4 м, та засобом гасіння хвиль. Бокові вікна каналу були скляними для проведення візуальних досліджень. Експериментальний стенд мав засоби контролю та вимірювання хвильових і гідродинамічних характеристик апаратурою реєстрації, обробки та аналізу даних. Висоти хвиль вимірювалися струнними датчиками висоти хвилі, а хвильовий тиск на обтічній поверхні моделей вимірювався п'єзокерамічними і п'єзорезистивними датчиками тиску [11, 12].

Оскільки хвильовий тиск і хвильові навантаження на поверхню моделей дамб є випадковими змінними, то результати їх вимірювання оброблялися та аналізувалися *статистичними методами теорії ймовірності і математичної статистики* [13]. Зокрема були визначені функції густини ймовірності осциляцій тиску за залежністю:

$$\rho(p') = \partial P(p') / \partial p', \quad (7)$$

де  $p'$  – осциляції або пульсації тиску на обтічній поверхні дамби;  $P(p')$  – ймовірність осциляцій тиску, яка задовольняє умові:

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(p') dp' \equiv 1.$$

П'єзорезистивні датчики тиску вимірювали повний тиск, який складався з осередненої та пульсаційної складових, у вигляді:  $p = \bar{P} + p'$ . Середній тиск або математичне сподівання визначалися за залежністю:

$$\mu(p) = \int_{-\infty}^{\infty} p P(p) dp = \bar{P}, \quad (8)$$

а середньоквадратичне значення пульсацій тиску визначалося за залежністю:

$$p'_{rms} = \sqrt{\overline{(p')^2}} = \sigma_p^{1/2}, \quad (9)$$

де  $\sigma_p$  – дисперсія поля тиску.

В якості центральних статистичних моментів визначалися *коефіцієнт асиметрії* (третій центральний статистичний момент):

$$Sk = \overline{(p')^3} / (\sigma_p)^{3/2} \quad (10)$$

і *коефіцієнт ексцесу* (четвертий центральний статистичний момент):

$$Kur = \overline{(p')^4} / (\sigma_p)^2 - 3. \quad (11)$$

Спектральний аналіз експериментальних даних дозволив визначити спектральну густину потужності пульсацій тиску за залежністю:

$$P(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{p'}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau, \quad (12)$$

де  $\omega = 2\pi f$  – колова частота,  $\tau$  – час затримки сигналу та  $R_{p'}(\tau)$  – автокореляція пульсацій тиску, яка визначалася за залежністю:

$$R_{p'}(\tau) = \overline{p'(\tau) \cdot p'(t + \tau)}.$$

Інтегральні та спектральні характеристики дозволили визначити статистичні параметри поля тиску і осциляцій тиску на обтічній поверхні досліджуваних моделей дамб. Ці характеристики дали можливість оцінити хвильові навантаження на моделі дамб і визначити конструкцію огорожувальної дамби, яка буде найбільш стійкою до хвильової дії штормових хвиль.

**Результати досліджень.** Для математичного моделювання використовувалися максимальні значення вітру та висоти хвилі, які спостерігались за весь період досліджень в районі огорожувальної дамби. Результати чисельного моделювання за допомогою статистичної моделі SWAN показані на рис. 2. Тут показані висоти хвиль

2 %-ої забезпеченості і середній напрямок хвилювання в районі гирла Бистре з урахуванням штормового нагону для швидкості вітру 26 м/с і його східного (рис. 2, *а*) та південно-східного (рис. 2, *б*) напрямків та рельєф і глибини дна поблизу захисної огорожувальної дамби (рис. 2, *в*). В розрахунках враховано модельний рівень моря, обумовлений нагоном штормових хвиль, тому приведені результати чисельного моделювання для найбільшої швидкості вітру та найбільших висот нагону.

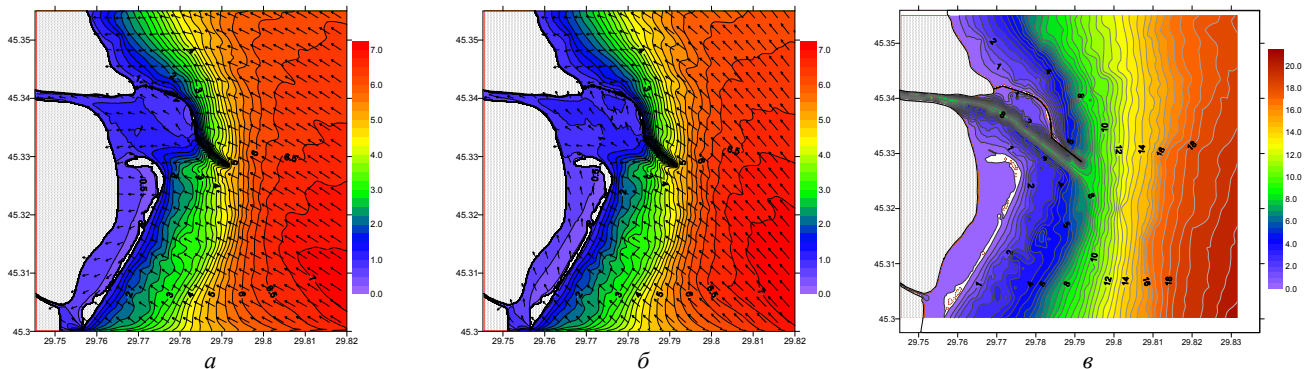


Рис. 2 – Висоти хвиль 2 %-ої забезпеченості і середній напрямок хвилювання для  $V_w = 26$  м/с та напрямку вітру: *а* – північного, *б* – південно-східного, а також *в* – рельєф дна.

Для зменшення негативного впливу штормових хвиль на загороджувальну дамбу було прийняте рішення використати позитивний досвід експлуатації підводних хвилеломів і бERM для захисту берегів і гідротехнічних споруд від дії штормових хвиль. Запропоновано подовжити мористу частину дамби та придати їй ступінчасту форму. Результати розрахунків за виразами (1 – 8) і експерименти показали, що більш ефективною є форма фронтальної частини дамби з двома бERMAМИ і укосами різних кутів нахилу (рис. 3). Така форма дамби дозволила найбільш ефективно розбити штормову хвилю під час її підходу до гребня дамби. Обвалення хвилі відбувалося на нижній бERMA (рис. 3, *б*), а бурун, який утворювався, розбивався на верхній бERMA (рис. 3, *в*) і штормова хвиля підходила до гребня дамби зі значною втратою енергії.

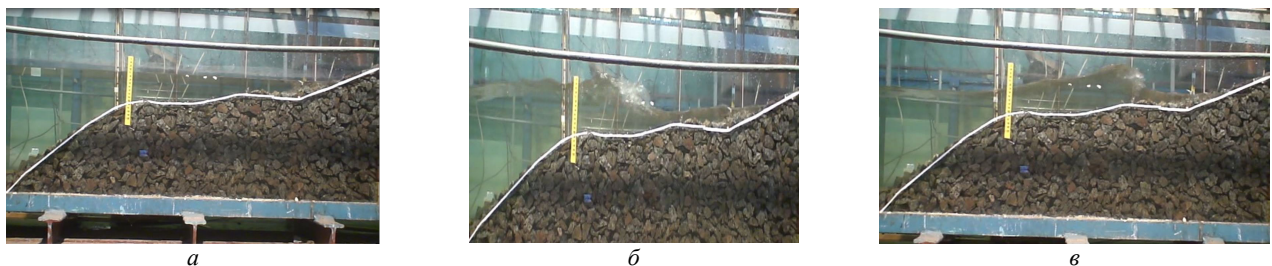


Рис. 3 – Модель фрагмента огорожувальної дамби: *а* – перед дослідом, *б* – обвалення хвилі на нижній бERMA та *в* – обвалення хвилі на верхній бERMA.

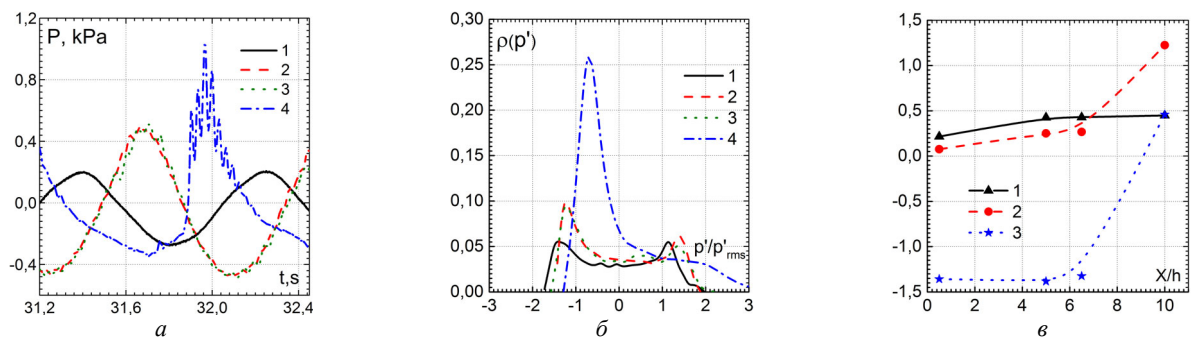


Рис. 4 – Інтегральні характеристики хвильового тиску: *а* – хвильовий тиск на поверхні дамби, *б* – функція густини ймовірності та *в* – середньоквадратичні значення, коефіцієнти асиметрії та ексцесу пульсацій хвильового тиску.

Інтегральні характеристики хвильового тиску на обтічній фронтальній поверхні моделі дамби наведено на рис. 4 для параметрів хвилі  $h = 0,1$  м і  $T = 0,8$  с. На рис. 4, *а* показана форма хвилі, яка взаємодіяла з моделлю дамби в гідродинамічному каналі. Тут *криву тиску 1* вимірювали на відстані  $x = 0,5h$  від початку дамби та на глибині  $y = 3,7h$ , *криву 2* вимірювали на схилі дамби ( $x = 5h$  та  $y = 2h$ ), *криву 3* також вимірювали на схилі

дамби з координатами  $x = 6,5h$  і  $y = 1,5h$ , і крива 4, виміряна на гребні дамби ( $x = 10h$  і  $y = 0,2h$ ). Так, на глибокій воді (крива 1) форма хвилі близька до синусоїдальної, яку генерує хвилепродуктор, а на схилі дамби хвиля починає руйнуватися (крива 2), особливо гребінь хвилі (крива 3). На вершині дамби (крива 4) форма хвилі обумовлена дрібномасштабними хвильовими структурами внаслідок обвалення хвилі на моделі дамби.

На рис. 4, б показано функції щільності ймовірності пульсацій хвильового тиску ( $\rho(p')$ ) в різних точках вимірювання на поверхні моделі дамби, які розраховано за виразом (7). Ці функції показані в залежності від значень пульсацій тиску, які нормуються середньоквадратичними значеннями пульсацій тиску ( $p' / p'_{rms}$ ). За виразами (8) і (9) визначено середні значення тиску та середньоквадратичні значення пульсацій тиску в точках вимірювання. Тут номери кривих ідентичні тим, які наведено на рис. 4, а.

На рис. 4, в показано зміни середньоквадратичних значень пульсацій тиску відносно швидкісного напору  $p' / q$ , де  $q = \rho U^2 / 2$  (крива 1), зміни коефіцієнта асиметрії (крива 2) та зміни коефіцієнта ексцесу (крива 3) залежно від відстані уздовж моделі фрагмента дамби. Статистичні центральні моменти вищих порядків показують інтенсивність осциляцій тиску на обтічній поверхні моделі дамби і характеризують відмінність розподілу ймовірності досліджуваного процесу від нормального чи гаусівського розподілу випадкового процесу. З наближенням до гребня моделі дамби інтенсивність пульсацій хвильового тиску зростає (крива 1 на рис. 4, в). Коефіцієнт асиметрії, розрахований з виразу (10), з віддаленням від підніжжя дамби набуває позитивних значень (крива 2). Коефіцієнт ексцесу поля пристінного тиску на фронтальній поверхні дамби, розрахований за виразом (11), має від'ємні значення в її придонній частині і на укосі, а також набуває позитивних значень на гребні дамби. На гребні дамби навпаки превалюють осциляції тиску малої амплітуди, що генеруються хвильовими структурами малих масштабів.

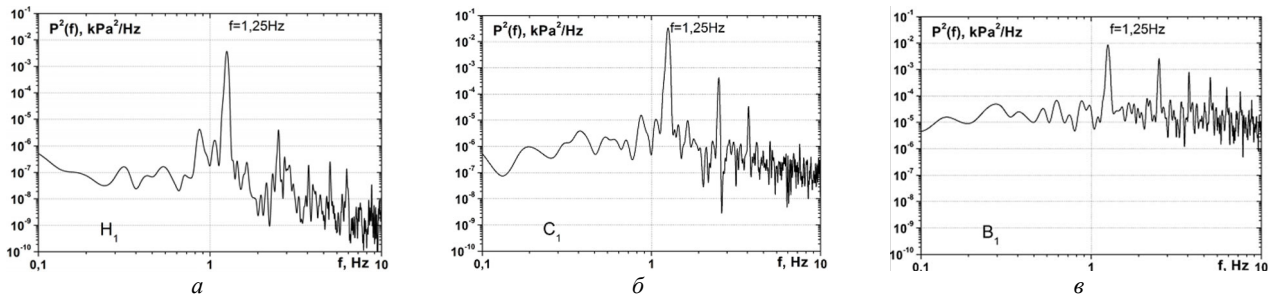


Рис. 5 – Спектральні густини потужності пульсацій тиску: а – на нижній частині, б – на середній частині та в – на верхній частині моделі верхнього укоса огорожувальної дамби.

Частотний склад поля пульсацій тиску та джерел, які його генерують, представлено на рис. 5. Тут представлені спектральні густини потужності пульсацій тиску в нижній, середній та верхній частинах верхівки моделі ступінчастої захисної дамби. Треба зауважити, що на всіх досліджених спектрах присутня основна гармоніка коливального хвильового руху на частоті  $f = 1,25$  Гц, що відповідає періоду генерованої хвилі. Також в спектрах присутні гармоніки вищих порядків основної частоти. Але з наближенням до верхівки дамби в спектрах починають з'являтися значні рівні пульсацій тиску на високих частотах (рис. 5, б та рис. 5, в). Доходячи до гребня дамби, штормова хвиля розбивається і утворюються буруни та дрібномасштабні хвильові компоненти [9, 14].

Таким чином, результати досліджень показали, що берми виконали функції підводних хвилеломів та значно зменшили енергію хвильового впливу на верхню частину дамби. Запропоновано в натурних умовах побудувати мористу частину захисної дамби з такими параметрами: нижній глибоководний укіс з нахилом 1 : 1,5, далі на глибині 4 м нижня берма шириною 10 м. Потім зробити укіс з нахилом 1 : 5, а далі на глибині 2 м встановити верхню берму шириною 10 м. Закінчити захисну огорожувальну дамбу Морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай – Чорне море рекомендується гребенем під нахилом 1 : (3 – 3,5). Облицювання фронтальної частини дамби слід зробити з кам'яного накиду камінням фракції 1,2 м.

**Висновки.** Результати досліджень показали, що хвильові навантаження на фронтальну поверхню моделі існуючої дамби досить великі, що призвело до її часткового руйнування під дією штормового хвилювання та руху льоду у штормових умовах. Інтегральні характеристики хвильового тиску на обтічну поверхню моделі дамби показали, що на гребні дамби виявлені високі рівні пульсацій тиску. Результати розрахунків та експериментальні дослідження дозволили спроектувати ефективну форму фронтальної поверхні огорожувальної дамби у вигляді ступінчастої дамби з двома бермами, що розташовувалися на різних глибинах. Рекомендовано в натурних умовах удосконалити існуючу дамбу та провести її реконструкцію для отримання ефективної та безпечної експлуатації захисної огорожувальної дамби Морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай – Чорне море.

## Список літератури

1. Golodnitsky A. G. Analysis of hydromorphological and technogenic processes during the operation of the Danube-Black Sea GCC within the project «Creation of a deep-water vessel course of the Danube-Black Sea on the Ukrainian part of the delta. Full development in 2015». – Izmail : DGMO, 2015. – 9 p.
2. Khomicky V. V., Ostroverkh B. M., Tkachenko V. A., Voskoboinick V. A., Tereshhenko L. M. Improvement of protection dam of the Marine approach channel Danube-Black sea // *Environ. Safety Natural Resources*. – 2019. – Vol. 35. – no 3. – P. 57–76.
3. Yeganeh-Bakhtiary A., Houshang H., Abolfathi S. Lagrangian two-phase flow modeling of scour in front of vertical breakwater // *Coastal Engineering*. – 2020. – Vol. 159. – ID 103556. <http://dx.doi.org/10.1080/21664250.2020.1747140>.
4. Abdolmaleki M., Kamalan H. Modeling of vertical breakwater wall under bilateral seawater load // *J. Hydraul. Struct.* – 2019. – Vol. 5. – no 1. – P. 89–97. <https://doi.org/10.22055/JHS.2019.30747.1120>.
5. Tao A., Xu W., Si J., Chen S., Zhao H., Wang G. Experimental study on time-varying failure evolution of armour blocks on sloping breakwaters // *Ocean Engineering*. – 2023. – Vol. 279. – ID 114395. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114395>.
6. *SWAN Cycle III version 41.31. User Manual*. – Delft University of Technology : Netherlands, 2019. – 149 p.
7. *XBeach Model Description and Manual*. – UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft and Delft University of Technology : Netherlands, 2015. – 108 p.
8. Yakovlev V. V. Two-dimensional models of planar transformation of waves in liquid of variable depth // *J. Fluid Mech. Res.* – 2003. – Vol. 30. – no 3. – P. 311–320.
9. Voskoboinick V., Khomitsky V., Voskoboinyck O., Tereshchenko L., Voskoboinick A. Wave loads on protective dam of the Marine channel of the Danube-Black sea // *Hydro-environment Research*. – 2021. – Vol. 35. – no 3. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.003>.
10. Sorensen R. M. *Basic coastal engineering*. – NY : Springer Science, 2006. – 330 p.
11. Voskoboinick V., Kornev N., Turnow J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // *Flow Turbulence Combust.* – 2013. – Vol. 90. – no 4. – P. 709–722. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9433-9>.
12. Voskoboinick V. A., Voskoboinick A. A., Turick V. N., Voskoboinick A. V. Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices // *J. Eng. Physics and Thermophysics*. – 2020. – Vol. 93. – no. 5. – P. 1205–1220. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>.
13. Bendat J. S., Piersol A. G. *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*, 4th Edition. – NY : Wiley, 2010. – 640 p.
14. Voskoboinick V., Onyshchenko A., Voskoboinyck O., Makarenkova A., Voskoboinyck A. Junction flow about cylindrical group on rigid flat surface // *Heliyon*. – 2022. – ID e12595. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4092211>.

## References (transliterated)

1. Golodnitsky A. G. *Analysis of hydromorphological and technogenic processes during the operation of the Danube-Black Sea GCC within the project «Creation of a deep-water vessel course of the Danube-Black Sea on the Ukrainian part of the delta. Full development in 2015»*. Izmail, DGMO Publ., 2015. 9 p.
2. Khomicky V. V., Ostroverkh B. M., Tkachenko V. A., Voskoboinick V. A., Tereshhenko L. M. Improvement of protection dam of the Marine approach channel Danube-Black sea. *Environ. Safety Natural Resources*. 2019, vol. 35, no 3, pp. 57–76.
3. Yeganeh-Bakhtiary A., Houshang H., Abolfathi S. Lagrangian two-phase flow modeling of scour in front of vertical breakwater. *Coastal Engineering*. 2020, vol. 159, ID 103556. <http://dx.doi.org/10.1080/21664250.2020.1747140>.
4. Abdolmaleki M., Kamalan H. Modeling of vertical breakwater wall under bilateral seawater load. *J. Hydraul. Struct.* 2019, vol. 5, no 1, pp. 89–97. <https://doi.org/10.22055/JHS.2019.30747.1120>.
5. Tao A., Xu W., Si J., Chen S., Zhao H., Wang G. Experimental study on time-varying failure evolution of armour blocks on sloping breakwaters. *Ocean Engineering*. 2023, vol. 279, ID 114395. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114395>.
6. *SWAN Cycle III version 41.31. User Manual*. Delft University of Technology, Netherlands, 2019. 149 p.
7. *XBeach Model Description and Manual*. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft and Delft University of Technology, Netherlands, 2015. 108 p.
8. Yakovlev V. V. Two-dimensional models of planar transformation of waves in liquid of variable depth. *J. Fluid Mech. Res.* 2003, vol. 30, no 3, pp. 311–320.
9. Voskoboinick V., Khomitsky V., Voskoboinyck O., Tereshchenko L., Voskoboinick A. Wave loads on protective dam of the Marine channel of the Danube-Black sea. *Hydro-environment Research*. 2021, vol. 35, no 3, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.003>.
10. Sorensen R. M. *Basic coastal engineering*. NY, Springer Science, 2006. 330 p.
11. Voskoboinick V., Kornev N., Turnow J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. *Flow Turbulence Combust.* 2013, vol. 90, no 4, pp. 709–722. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9433-9>.
12. Voskoboinick V. A., Voskoboinick A. A., Turick V. N., Voskoboinick A. V. Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices. *J. Eng. Physics and Thermophysics*. 2020, vol. 93, no. 5, pp. 1205–1220. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>.
13. Bendat J. S., Piersol A. G. *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*, 4th Edition. NY, Wiley, 2010. 640 p.
14. Voskoboinick V., Onyshchenko A., Voskoboinyck O., Makarenkova A., Voskoboinyck A. Junction flow about cylindrical group on rigid flat surface. *Heliyon*. 2022, ID e12595. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4092211>.

Надійшло (received) 13.04.2023

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Воскобійник Володимир Анатолійович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: vlad.vsk@gmail.com.

**Воскобойник Владимир Анатольевич** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом гидродинамики волновых и русловых потоков, Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: vlad.vsk@gmail.com.

**Voskoboinick Volodymyr Anatolijovych** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the De-

---

partment of Hydrodynamics of Wave and Channel Flow, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-57; e-mail: vlad.vsk@gmail.com.

**Воскобойник Александр Анатолійович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу технічної гідромеханіки, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: alexandr.vsk@gmail.com.

**Воскобойник Александр Анатольевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела технической гидромеханики, Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: alexandr.vsk@gmail.com.

**Voskoboynuk Oleksandr Anatoliyovych** – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow at the Department of Technical Hydromechanics, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-57; e-mail: alexandr.vsk@gmail.com.

**Воскобийник Андрій Володимирович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу гідробіоніки та керування примежовим шаром, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: andrew.vsk@gmail.com.

**Воскобойник Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела гидробионики и управления пограничным слоем, Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: andrew.vsk@gmail.com.

**Voskobiinyk Andriy Volodymyrovych** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research Fellow at the Department of Hydrobionics and Boundary Layer Control, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-57; e-mail: andrew.vsk@gmail.com.

**Харченко Анатолій Григорович** – головний інженер відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: Anatoliy.kharchenko62@gmail.com.

**Харченко Анатолий Григорьевич** – главный инженер отдела гидродинамики волновых и русловых потоков, Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: Anatoliy.kharchenko62@gmail.com.

**Kharchenko Anatoliy Grygorovych** – Chief Engineer at the Department of Hydrodynamics Wave and Channel Flow, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-57; e-mail: Anatoliy.kharchenko62@gmail.com.