

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА СИСТЕМИ INFORMATION RESOURCES AND SYSTEMS

УДК 532.593

Vitalii V. Khomicky, PhD, Associate professor of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine
ORCID ID 0000-0003-0910-2233 *e-mail*: homicky@ukr.net

Borys M. Ostroverkh, PhD, Associate professor of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine
ORCID ID 0000-0002-3373-5535 *e-mail*: ostro@ukr.net

Viktor A. Tkachenko, PhD, Associate professor of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine
ORCID ID *e-mail*: tkachenkob@gmail.com

Vladimir 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

Lidiia M. Tereshchenko, PhD, Associate professor of the Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine
ORCID ID 0000-0001-6068-7092 *e-mail*: litere70@gmail.com

Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine

IMPROVEMENT OF PROTECTION DAM OF THE MARINE APPROACH CHANNEL DANUBE-BLACK SEA

***Abstract.** One of the important tasks for Ukraine is to restore navigation on the mouth of the Danube Bistre, using it as a European-Asian way from the Baltic Sea to the Black Sea, and then to the East. Restoration of the deep-sea navigation of the Danube-Black Sea River has begun about ten years ago and has been progressing with great difficulty and interruptions. A protective enclosing dam of the Maritime approach channel of the Danube-Black Sea deep-water vessel was built in the water area of the Bystre estuary of the Kiliya Delta of the Danube River. This paper presents the results of mathematical and physical modeling of the improvement and reconstruction of the protection dam of the Maritime approach channel of the Danube-Black Sea deep-sea navigation. Numerical calculations of the transformation of wind waves in the water area near the dam for the most dangerous wind directions in stormy conditions are carried out. For mathematical modeling, the maximum values of wind and wave height were used, which were observed during the entire research period in the area of the dam.*

Within the framework of refraction theory, wave transformation calculations were performed for the most wave-dangerous directions of wind acceleration, namely, northeast, east, southeast and south wind directions. The results of calculations show that the construction of a protective dam at the exit of the Bystre estuary leads to a significant reduction in wave heights (almost twice) and their lengths by more than 1.5 times, which will ensure a smooth approach and exit of vessels to the Bystre estuary. To assess the characteristics of storm surges and wind waves in the study area was set "hypothetical" storm, when uniform in space and constant in time wind blows over the entire Black Sea. Simulations of wind waves were performed by the 3-step method of nested grids. Calculations were performed for twelve options directly. The morphodynamic calculations showed the areas of circulating near bottom currents inside the dam protected area and the peculiarities of the bottom deformation due to wave motion and storm rise of sea level. Experimental studies on a fragment of the dam model revealed the areas of greatest wave loads, features of wave transformation and pressure fields on the dam ridge. On the basis of theoretical and experimental researches the new step form of the dam which withstands storm wave loads is proposed.

Key words: protective dam; wave transformation; circulation; bottom deformation; wave load

В.В. Хомицький, Б.М. Островерх, В.А. Ткаченко, В.А. Воскобійник, Л.М. Терещенко

Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАХИСНОЇ ОГОРОДЖУВАЛЬНОЇ ДАМБИ МОРСЬКОГО ПІДХІДНОГО КАНАЛУ ДУНАЙ-ЧОРНЕ МОРЕ

Анотація. Одним з важливих завдань для України є відновлення судноплавства по гирлу Дунаю Бистре, використовуючи його як європейсько-азійську магістраль від Балтійського моря у Чорне море, а далі в країни Сходу. Відновлення глибоководного суднового ходу р. Дунай-Чорне море було розпочато близько десяти років тому і просувалося з великими труднощами і перервами. Було збудовано захисну огорожувальну дамбу морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай-Чорне море в акваторії гирла Бистре Килійської дельти р. Дунай. В роботі представлено результати математичного та фізичного моделювання щодо удосконалення та реконструкції цієї огорожувальної дамби. Проведені чисельні розрахунки трансформації вітрових хвиль в акваторії поблизу дамби для найбільш небезпечних напрямків вітру в штормових умовах. Для математичного моделювання використовувались максимальні значення вітру та висоти хвилі, які спостерігались за весь період досліджень в районі огорожувальної дамби. В рамках рефракційної теорії виконані розрахунки трансформації хвиль для найбільш хвиленебезпечних напрямків розгону вітру, а саме, північно-східного, східного, південно-східного та південного напрямків вітру. Результати розрахунків показують, що будівництво захисної огорожувальної дамби на виході з гирла Бистре призводить до значного зменшення висот хвиль (майже вдвічі) та їх довжин більше, ніж у 1,5 раза, що забезпечить безпроблемний захід і вихід суден у гирло Бистре. Для оцінки характеристик штормових нагонів і вітрового хвилювання в досліджуваному районі задавався «гіпотетичний» шторм, коли над всім Чорним морем діє однорідний по простору і постійний за часом вітер, взятий за дослідний період. Моделювання вітрового хвилювання проводилися 3-кроковим методом

вкладених сіток. Розрахунки виконувалися для дванадцяти варіантів напрямку. Морфодинамічні розрахунки показали області циркуляційних придонних течій усередині захисної дамби та особливості деформації dna під дією хвильового руху та штормових нагонів. Експериментальні дослідження на фрагменті моделі дамби виявили області найбільших хвильових навантажень, особливості трансформації хвиль та поля тиску на гребені дамби. На базі теоретичних і експериментальних досліджень запропонована нова ступенева форма дамби, яка витримує штормові хвильові навантаження.

Ключові слова: огороджувальна дамба; трансформація хвиль; циркуляція; деформація dna; хвильове навантаження

Вступ

Дунай – це найбільша міжнародна ріка Європи, яка протікає по територіях десяти держав, в тому числі і через Україну. Дунай впадає в Чорне море і представляє собою транспортну магістраль сьомого міжнародного транспортного коридору, який з'єднує Європу з Азією. Тому одне з важливих завдань для України – це відновлення судноплавства по гирлу Бистре, використовуючи його як європейсько-азійську магістраль від Балтійського моря через Рейн і Дунай у Чорне море, а далі в країни Сходу, аж до Китаю. Відновлення глибоководного суднового ходу р. Дунай-Чорне море було розпочато близько десяти років тому і просувалося з великими труднощами і перервами. Було збудовано захисну огороджувальну дамбу морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай-Чорне море в акваторії гирла Бистре Килійської дельти р. Дунай [1, 2].

Дамба призначена для захисту каналу від наносів під час штормів північного та північно-східного напрямку, які є найпотужнішими у цій ділянці моря, захисту від запливання укосів каналу під дією хвиль і для забезпечення безпечного входу до каналу суден з моря при сильних вітрах, які домінують 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. Огороджувальна дамба морського підхідного каналу (рис. 1а) довжиною 2,73 км виконана з кам'яного накиду з несортованої гірської маси (рис. 1б).



Рис. 1 – Загальний вигляд огороджувальної дамби (а) та фрагмент її кам'яної насипки (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. Внаслідок будівництва дамби на замулення гирла переважно впливає річковий стік, який розвантажується в акваторії моря через проріз гирла. Під час набігання на захисну дамбу вітрові хвилі гасяться, тяглі наноси осідають на навітряному борту дамби, а зважені розподіляються рівномірно по перетину акваторії усередині дамби. Максимальна кількість наносів переміщується в забаровій частині. Дія штормів фронтальних до осі підхідного каналу (схід, північний-схід, південний-схід) призводить до збільшення швидкості течії в каналі та утворення тут промивного струменю, який простежується до гирла каналу. Також продовжується обміління підводної частини Пташиної коси біля каналу, а за Пташиною косою утворилася нова барова структура, що висувається за межі захисної дамби в бік моря.

Захисна дамба природним чином входить в структуру “лівого берега”, основні зони акумуляції наносів на “річищі” переміщуються до входу в підхідний канал. За наявності затоплення верхніх брівок, що відповідає виходу потоку на заплаву, виникають умови для розвинення меандрування річища, а утворена морська частина коси пересувається на ділянку перед Пташиною косою та на барову частину за косою. Спостерігається, таким чином, утворення нової морської коси та перемички, куди надходять наноси з правобережної ділянки каналу і тут відбувається їх акумуляція.

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 (гребеня огорожувальної дамби). З морської сторони дамби площа розмиву лівої вздовж берегової коси гирла Бистре за 2013-2014 рр. становила майже 2 га. Також продовжилося явище розмиву берега о. Піщаний в місті примикання дамби та розмив північного фасаду дамби в районі її корінної частини. Такі деформації з'явилися на морському боці дамби та ділянці корінного берега внаслідок суттєвих швидкостей вздовж берегового потоку за дефіциту витрат наносів. Зони розмиву продовжували залишатися на всій морській частині досліджуваної ділянки, що призвело до поглиблення дна аж до 10-метрової відмітки біля оголовку дамби [2].

Серед факторів руйнування деяких ділянок огорожувальної дамби визначено спільну дію вітрових хвиль, утворення крижано-камінних мас на гребені та укосах та насунання крижаних полів з дією згінно-нагінних явищ в зимово-весняний період. В результаті дії таких навантажень відбулося оповзання кам'яної насипки та з'явилася більша пологість укосів, а також переміщення окремих каменів фракції 900 мм, які були закинуті хвилями на гребінь огорожувальної дамби. Матеріал облицювання із каменю фракцій 900 мм та 1200 мм на деяких ділянках змістився до підніжжя укосу огорожувальної дамби або скотився на поверхню берми, розкриваючи, таким чином, ядро споруди. Матеріал ядра під впливом хвильових та льодових

навантажень було переміщено на поверхню гребеня або на берму споруди. В цілому деформації дамби не призвели до суттєвих наскрізних руйнувань і вона відповідає, з незначними змінами, проектному профілю, але потребує додаткової реконструкції та удосконалень [2, 3].

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 Килійської дельти р. Дунай.

Математичні моделі та експериментальний стенд

Математичне моделювання хвильового навантаження на захисну огорожувальну дамбу морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай-Чорне море та морфодинамічних процесів в акваторії гирла Бистре Килійської дельти р. Дунай було виконано за допомогою рефракційної та спектральної моделі SWAN, а також моделі XBeach.

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 [4, 5]. 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. Під час розрахунку рефракції хвиль, що наближаються до берега, припускається, що відбиття хвиль не відбувається і ухил донної поверхні такий слабкий, що хвилі ведуть себе як плоскі періодичні хвилі на воді постійної глибини. У найпростішому випадку сталих періодичних хвиль, що набігають на берег, зміна амплітуди виходить з умови постійності потоку хвильової дії, який еквівалентний постійному потоку енергії у відсутності течій, тобто виконуються умови збереження енергії вздовж променя трансформації хвиль від найбільш хвиленебезпечних напрямів розгону вітру. Алгоритм розрахунку напрямку променя та коефіцієнта розділення променів побудований на розв'язанні задачі з урахуванням початкових умов методом Рунге-Куты з подальшим визначенням висот хвиль вздовж променя [4, 6].

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 [7]. 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 [8]. 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. Модель SWAN використовує неявні схеми, які є більш надійними та економічними на мілководді, ніж явні. На основі рівняння балансу хвильової дії з джерелами та стоками модель мілкої води SWAN (Acronym for Simulating WAves Nearshore) є розширенням глибоководних хвильових моделей. Вона включає сучасні формулювання для процесів генерування, дисипації та взаємодії хвиль на глибокій воді, які присутні у моделі WAM [8]. На мілководді ці процеси були доповнені найсучаснішими формулюваннями для дисипації енергії за рахунок тертя води з дном, взаємодії хвильового руху і придонної течії та намивів і розмивів ґрунту. Модель SWAN є повністю спектральною (у всіх просторових напрямках та частотах) і обчислює еволюцію вітрових хвиль у прибережних регіонах на мілкій воді та з зовнішніми течіями. На мілководді орбітальні рухи води, викликані поверхневими хвилями, поширюються до морського дна. Це породжує взаємодію між поверхневими хвилями та дном. Існують різні механізми взаємодії хвиль з дном та їх відносних сил. Серед них можна виокремити механізми розсіювання енергії на нерівностях дна, рух донного ґрунту, проникнення рідини в пористе дно і тертя в турбулентному прилежовому шарі. Перший процес призводить до локального перерозподілу хвильової енергії через розсіювання хвильових компонентів. Останні три процеси є дисипативними. Їх інтенсивність залежить від умов дна. Для континентальних шельфових морів із піщаним дном домінуючим механізмом є тертя води з ґрунтом дна.

Відомо [9], що 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 [10]. Модель XBeach (eXtreme Beach behavior) 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 [11]. Для опису передачі енергії від обвалених хвиль до бурунів використовується рівняння балансу енергії бурунів [12]. При цьому враховується кутовий розподіл хвильового спектру і використовується одна пікова частота, що відповідає припущенню про вузькосмуговість спектру в частотній області. У моделі XBeach для різницевої апроксимації рівнянь використовується прямокутна рознесена сітка. Глибина, рівень, концентрація наносів, енергія хвиль і бурунів визначаються в центрах комірок, а компоненти швидкості течій та потоки наносів визначаються посередині бічних меж комірок. Інтегрування здійснюється на основі явної схеми з автоматичним вибором часового кроку. В різницевій схемі, яку застосовують в моделі XBeach, реалізований алгоритм осушення – затоплення [11]. Слід зазначити, що ефекти, які обумовлені зміною величини нагонів, чинять значно більший вплив на морфодинамічні процеси, ніж зміна в однаковому відносному співвідношенні висоти хвиль [13].

Аналогічні висновки отримані в роботі [14], в якій виконані чисельні експерименти з дослідження чутливості моделі XBeach до вхідних параметрів.

Експериментальні дослідження по фізичному моделюванню проводились у хвильовому басейні на полігоні та у хвильовому лотку в лабораторії Інституту гідромеханіки НАНУ [15, 16]. На полігоні хвильовий басейн в плані представляв собою прямокутник зі сторонами 67×43 м і висотою огорожувальних стінок 2 м, глибина наповнення басейну водою складала 0,9 м. Довжина хвильового лотка складала 30 м, ширина – 0,35 м, глибина – 0,87 м. Басейн і лоток обладнані щитовими хвилеутворювачами, які породжували хвилі регульованої та контрольованої висоти від 0,02 м до 0,4 м та періоду від 0,5 с до 2 с. Крім того, в басейні та лотку знаходились відповідні засоби реєстрації та контролю параметрів хвиль, швидкостей течії, хвильових тисків та навантажень, системи візуалізації дослідів. Вони обладнані приладами обробки та аналізу експериментальних результатів, відео- і фотоапаратурою та допоміжними засобами. Дослідження виконувались за умови дії монохроматичних регулярних хвиль, які при підході до споруди зазнавали розбиття на споруді. Під час моделювання хвильового руху рідини дотримувалися умови автотельності по числу Рейнольдса та Фруда [17–19], а самі моделі були зроблені у масштабі.

Результати дослідження

Згідно з розробленою програмою та методикою досліджень проводилося чисельне та фізичне моделювання хвильового поля в околі захисної огорожувальної дамби морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай-Чорне море, хвильових навантажень на дамбу та морфодинамічних процесів в акваторії гирла Бистре Килійської дельти р. Дунай. Для математичного моделювання використовувались максимальні значення вітру та висоти хвилі, які спостерігались за весь період досліджень в районі огорожувальної дамби. Розглянемо завдання рефракції гармонійних хвиль, що приходять з глибокої води в мілководу прибережну зону, яка характеризується змінною глибиною. Вирішення такого роду завдань на основі рівнянь теорії хвиль в рідині кінцевої глибини навіть в наближенні теорії мілкої води представляє істотні труднощі, тому виходитимемо із спрощеного підходу, заснованого на променевому методі. Рівняння променевого методу засновані на принципі Ферма, згідно з яким промінь розповсюдження хвиль проходить шлях за мінімальний час.

Результати розрахунків та космічний знімок місця розташування дамби наведені на рис. 2, де показані глибини суднового ходу гирла Бистре на виході з захисної огорожувальної дамби (рис. 2а) та ізобати глибин в околі дамби разом з віссю ОУ, яку направлено вздовж осі морського підхідного каналу ($x = 1933,8$ м), азимут якої дорівнює 126° (рис. 2б). В результаті будівництва захисної огорожувальної дамби морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай-Чорне море та днопоглиблювальних робіт глибина суднового ходу буде складати від 7 м до 10 м, що забезпечить прохід великотоннажних суден для перевезення експортно-імпорتنих і транзитних вантажів і з'єднає транспортні магістралі Європи та Азії.

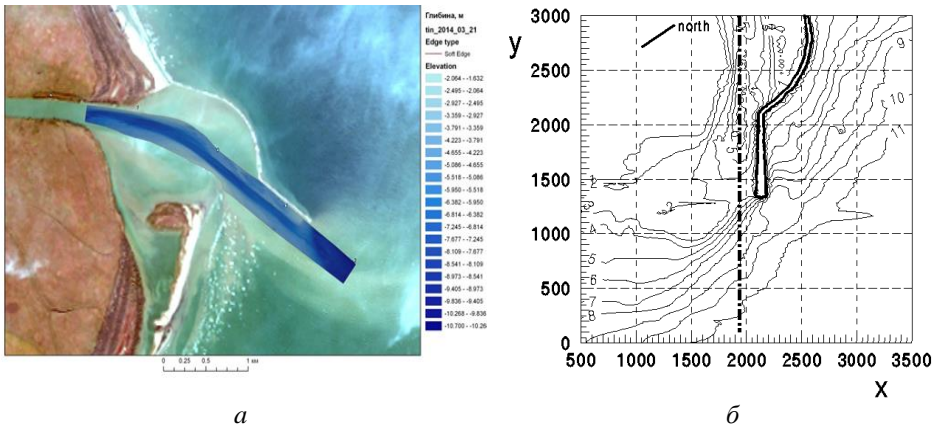


Рис. 2 – Глибини суднового ходу (а) та ізобати глибин (б) в околі захисної огорожувальної дамби

В рамках рефракційної теорії виконані розрахунки трансформації хвиль для найбільш хвиленебезпечних напрямків розгону вітру, а саме, північно-східного (ПнСх), східного (Сх), південно-східного (ПдСх) та південного (Пд) напрямків вітру. В розрахунках трансформації хвиль на підходах до гирла Бистре, де глибина складала 11 м, були використані параметри хвиль, які наведені в Таблиці 1. Для розрахунків використовувався максимальний розрахунковий вітер по всіх напрямках за весь період досліджень, згідно з даними, представленими у роботах [6, 20].

Таблиця 1 – Параметри хвиль від хвиленебезпечних напрямків вітру

Параметри хвиль					
Румб	d(м)	Азимут(грд.)	V_w (м/с)	h2%(м)	λ (м)
ПнСх	11	46,68	26	4,61	52,23
Сх	11	89,70	22	6,26	70,14
ПдСх	11	130,76	21	7,74	90,70
Пд	11	168,57	21	7,12	86,46

Дані, наведені в Табл. 1, показують, що найбільше небезпечним напрямком вітрових хвиль на захисну огорожувальну дамбу є північно-східний напрямок. Тому подальші розрахунки були проведені саме для цього напрямку хвиль.

На рис. 3 представлені розрахункові параметри хвильового поля у відповідності до рефракційної теорії в досліджуваній ділянці моря поблизу захисної огорожувальної дамби морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай-Чорне море в акваторії гирла Бистре Килійської дельти р. Дунай. Променева картина трансформації хвиль від найбільш хвиленебезпечних напрямів розгону вітру представлена на рис. 3а. Тут товсті суцільні лінії показують промені трансформації хвиль, тонкі суцільні лінії – це ізолінії глибин моря, товсті крапки на променях – це початок першого обвалення вітрової хвилі, а штрих-пунктирна лінія – це вісь морського підхідного каналу. На рис. 3б та на рис. 3в тонкими суцільними лініями позначені висоти та довжини трансформованих вітрових хвиль, відповідно, а штрих-пунктирна лінія – це вісь морського підхідного каналу. Результати розрахунків показують, що будівництво захисної огорожувальної дамби на

виході з гирла Бистре призводить до значного зменшення висот хвиль (майже вдвічі) та їх довжин більше, ніж у 1,5 раза, що забезпечить безпроблемний захід і вихід суден у гирло Бистре.

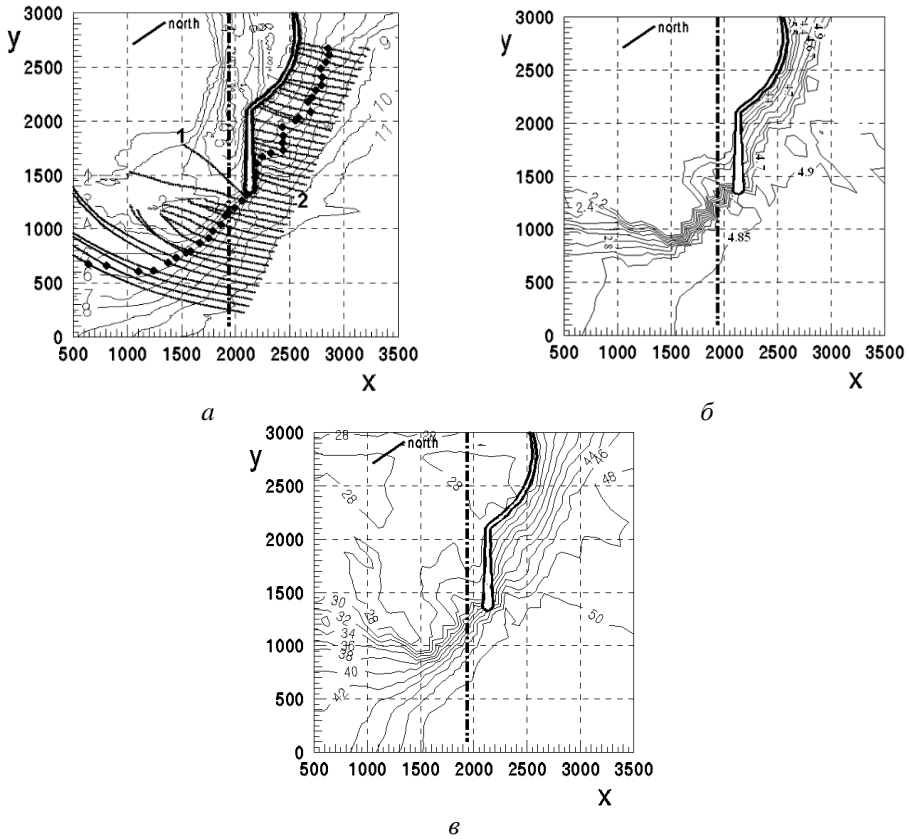


Рис. 3 – Променева картина (а), висоти (б) та довжини (в) трансформованих хвиль

Для оцінки характеристик штормових нагонів і вітрового хвилювання в досліджуваному районі задавався «гіпотетичний» шторм, коли над всім Чорним морем діє однорідний по простору і постійний за часом вітер, взятий за дослідний період. Моделювання вітрового хвилювання проводилися 3-кроковим методом вкладених сіток. Роздільна здатність хвильової моделі по кутовій координаті складала 5° , частотний інтервал дорівнював (0,04–2) Гц. Донні тертя визначалися методом Гранта-Мадсена [21] з постійним параметром еквівалентної шорсткості, рівним 0,01 м. Під час моделювання полів вітрових хвиль проводився параметричний розрахунок дифракції хвиль на захисній дамбі [7], а для розрахунку штормового нагону глибина моря в статистичній моделі SWAN задавалася у вигляді: $H = h + \eta$, де h – рельєф дна; η – рівень моря з тривимірної моделі циркуляції води у прибережній зоні океану [22].

Розрахунки виконувалися для дванадцяти варіантів напрямку і швидкості вітру, і розрахункові модельні значення рівня моря в найближчому до гирла Бистре вузлі розрахункової сітки (45.34° пн.ш., 29.78° сх.д.) представлені у Табл. 2.

Таблиця 2 – Модельний рівень моря для різних напрямків і різної швидкості вітру

Швидкість вітру, м/с	Модельний рівень моря, м			
	Південь	Південний схід	Схід	Північний схід
8	0,03	0,10	0,13	0,08
13	0,06	0,33	0,39	0,25
26	0,32	1,48	1,67	1,33

Результати розрахунків, які наведено в Табл. 2, показують, що максимальний штормовий нагін в досліджуваному районі відбувається під час дії східного вітру, але північно-східний вітер також призводить до достатньо високого рівня нагону поблизу захисної дамби.

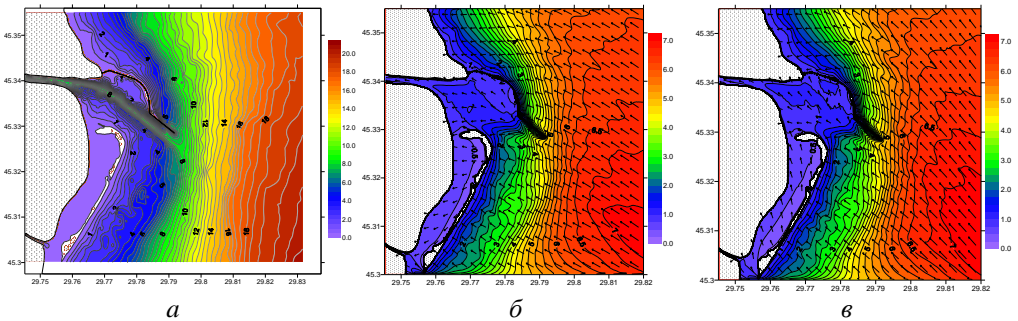


Рис. 4 – Рельєф дна (а) та висоти хвиль 2%-ї забезпеченості і середній напрямок хвилювання для $V_w = 26$ м/с і північного (б), південно-східного (в) напрямку вітру

Результати чисельного моделювання за допомогою статистичної моделі SWAN показані на рис. 4. Тут показані рельєф і глибини дна поблизу захисної огорожувальної дамби (рис. 4а) та висоти хвиль 2%-ї забезпеченості і середній напрямок хвилювання в районі гирла Бистре з урахуванням штормового нагону для швидкості вітру 26 м/с і його східного (рис. 4б) та південно-східного (рис. 4в) напрямків. В розрахунках врахований модельний рівень моря, який обумовлений нагоном штормових хвиль, тому наведені результати чисельного моделювання для найбільшої швидкості вітру та найбільших висот нагону, що показані в Табл. 2. Для найбільше небезпечного напрямку хвилювання моря висоти хвиль 2%-ї забезпеченості будуть нижче представлені для різних швидкостей вітру.

На рис. 5 наведені результати розрахунків висот хвиль 2%-ї забезпеченості і середній напрямок хвилювання в районі гирла Бистре з урахуванням штормового нагону для південно-східного напрямку вітру і різних швидкостей вітру.

Результати досліджень показують, що зі збільшенням швидкості вітру, який має північно-східний напрямок, висоти гравітаційних хвиль з урахуванням штормового нагону збільшуються.

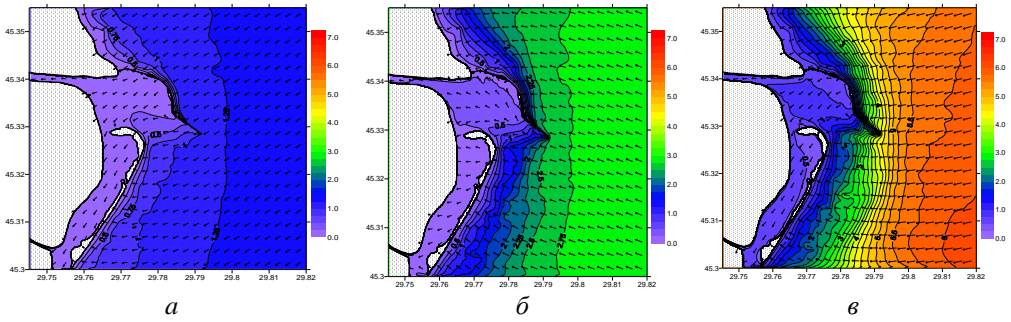


Рис. 5 – Висота хвиль 2%-ї забезпеченості і середній напрямок хвилювання в районі гирла Бистре з урахуванням штормового нагону для швидкості вітру: 8 м/с (а); 13 м/с (б) та 26 м/с (в)

Згідно з розробленою програмою та методикою досліджень моделювання гідроморфодинаміки проводилося за допомогою моделі XBeach. Це дозволило змоделювати поле хвильового руху, придонні та поверхневі течії, переніс наносів і зміни рельєфу дна з урахуванням процесів осушення і затоплення. Як відомо, основний внесок до гідроморфодинаміки прибережної зони вносять індуковані вітровим хвилюванням течії та дисипації енергії хвиль, що виникають в результаті їх розповсюдження до берега. Хвильові течії мають вигляд сумарного дрейфу на тлі орбітальних рухів частинок води. На рис. 6 наведені розрахункові схеми прибережних течій та поля деформацій дна в районі гирла Бистре, індуковані штормовим хвилюванням. Наведені схеми відображають середню по глибині і усереднену за часом циркуляцію вод та поле придонних швидкостей в досліджуваному районі, а також деформації донної поверхні з урахуванням штормового нагону.

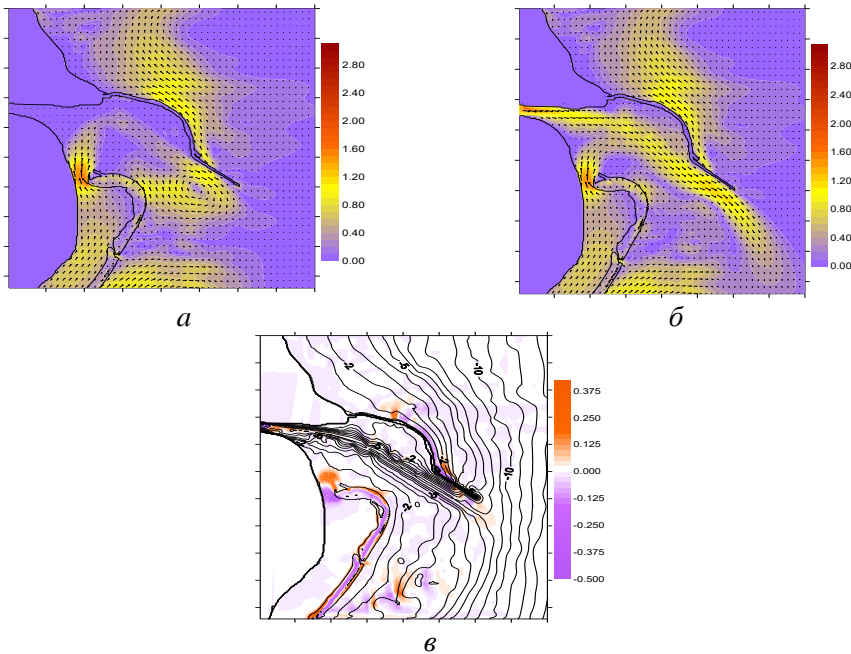


Рис. 6 – Поле швидкостей придонних течій для витрат $Q = 500 \text{ м}^3/\text{с}$ (а) і $Q = 1500 \text{ м}^3/\text{с}$ (б) та поле деформацій дна для $Q = 1500 \text{ м}^3/\text{с}$ (в) в районі гирла Бистре з урахуванням штормового нагону

Загальною особливістю придонного руху води є наявність струменевих течій з швидкостями близькими до (1-2) м/с. Особливо інтенсивні течії (рис. 6а) спостерігаються в протоці між берегом і північною ділянкою коси Пташиної. При цьому ураховання штормового нагону не приводить до помітного ослаблення цієї течії. Якщо в умовах межени ($Q \leq 500 \text{ м}^3/\text{с}$) вплив річкових вод на циркуляцію усередині огорожувальної дамби практично не позначається, то при витраті в гирлі ($Q > 500 \text{ м}^3/\text{с}$), яка формує русло, відбувається повне зникнення циркуляції (рис. 6б).

Згідно з результатами, які представлено на рис. 6в, деформаціями дна є зони акумуляції і розмиву, що чергуються. Найбільше істотні деформації відбуваються в протоці між північною ділянкою коси Пташиною і материком. При цьому і сама коса схильна до помітних деформацій на всьому своєму контурі. З внутрішньої сторони захисної дамби і на осі каналу деформації дна незначні. Проведені розрахунки показали, що врахування штормового нагону підвищує адекватність моделювання морфодинаміки досліджуваного району. Так, якщо штормовий нагін не враховується, то деформацій коси Пташиної не відбувається. Внесок річкового стоку у формування деформацій дна помітний лише при витраті гирла Бистре близько $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ і більше.

Експериментальні дослідження з фізичного моделювання взаємодії моделей штормових хвиль від північно-східного напрямку з моделлю фрагмента захисної огорожувальної дамби у масштабі 1:50 проводились у хвильовому лотку. Запропоновано удосконалити форму захисної дамби й збудувати її у вигляді ступінчастої конструкції.

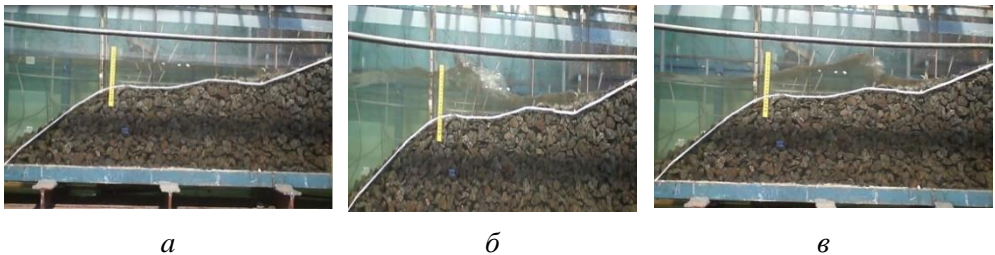


Рис. 7 – Модель фрагмента огорожувальної дамби перед дослідями (а), обвалення хвилі на нижній бермі (б) та на верхній бермі (в)

На рис. 7 представлені фотографії хвильового руху над фрагментом моделі дамби. На рис. 7а представлено вид профілю дамби з двома бермами і трьома різними укосами, які запропоновано в якості реконструкції існуючого профілю дамби у вигляді одного укосу постійного кута нахилу. Основна ідея реконструкції полягає в утворенні штучного підводного хвилелому, який застосовується для гасіння хвиль і перешкоджає переносу наносів, що підходять до берегової лінії [5, 23, 24]. На рис. 7б показано обвалення хвилі на першій бермі дамби, а на рис. 7в показано обвалення хвилі на другій бермі та накопчування буруна на верхню частину моделі захисної дамби. Таким чином, застосування укосів і ступінчастих берм дозволяє суттєво розрушити набігаючу хвилю, зменшити її висоту та інтенсивність при підході до головної частини захисної дамби.

На рис. 8 показані осцилограми хвильового руху в процесі підходу моделі штормової хвилі до фрагмента моделі ступінчастої захисної огорожувальної

дамби. Перед нижньою або першою з напрямку моря бермою форма хвилі несуттєво відрізняється від синусоїдальної форми, яку генерує хвилепродуктор (рис. 8а). З переміщенням хвилі до кінця нижньої берми форма хвилі змінилася, а особливо зменшилася її висота – більше ніж у 3 рази (рис. 8б). З підходом хвилі до другої берми форма хвилі ще дужче змінилася через її обрушення на бермах, а також зменшилася висота порушеної хвилі, вона в 4 рази стала меншою, ніж висота штормової хвилі на глибокій воді. Осцилограма порушених хвиль отримала високочастотні складові, які обумовлені трансформацією початкової хвилі на ступінчатій конструкції дамби.

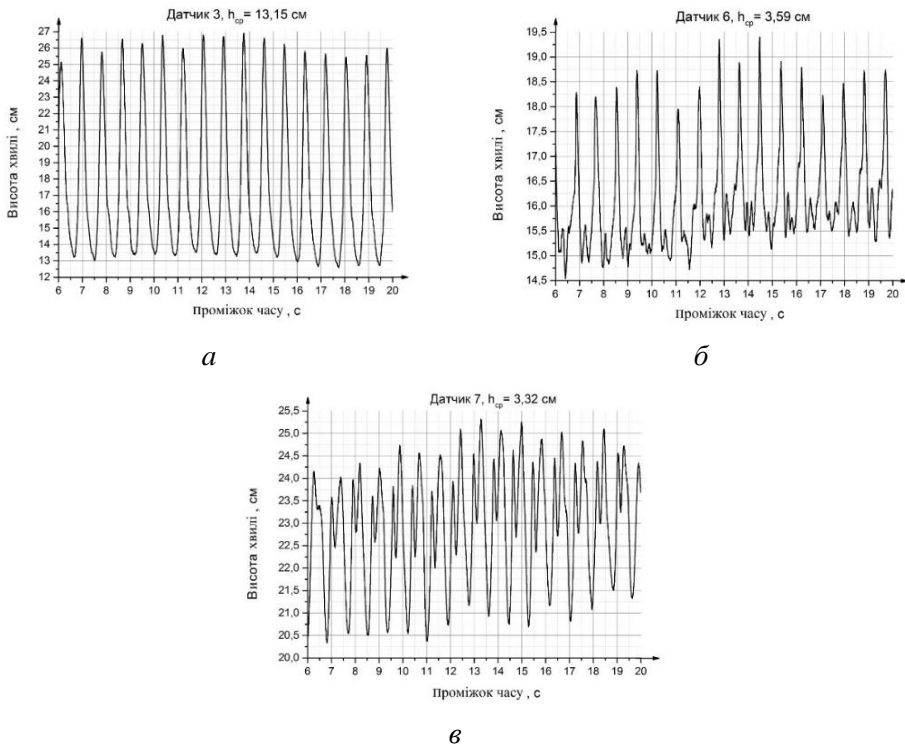


Рис. 8 – Форма хвилі перед нижньою бермою (а), перед верхньою бермою (б) та в кінці верхньої берми (в) моделі огорожувальної дамби

Для виявлення хвильового навантаження штормових хвиль на верхню частину дамби було використано дослідження поля тиску за допомогою мініатюрних п'єзокерамічних датчиків пульсацій тиску [25, 26], які було розташовано в кінці верхньої берми на початку верхнього укусу дамби, на середині укусу і на верхній частині укусу, куди накочувалися моделі штормових хвиль. Ці датчики мали високу просторову і частотну роздільну здатність та реєстрували як великомасштабні, так і дрібномасштабні (до $3 \cdot 10^{-3}$ м) довжини хвиль джерел пульсацій тиску [27-29]. Одночасна реєстрація пульсацій тиску групою датчиків та обробка і аналіз результатів дослідження з використанням апарату теорії ймовірностей та математичної статистики дозволили визначити просторово-часові характеристики поля пульсацій тиску та джерел, які його генерують. Кореляційний та спектральний аналіз дозволили визначити

масштаби вихрових і хвильових структур, їх частотні параметри, швидкість та напрямок переносу джерел пульсацій тиску [29, 30].

На рис. 9 представлені залежності пульсацій тиску у часі, які генерувалися хвильовим рухом, на обтічній поверхні верхньої частини моделі захисної дамби. На початку верхнього укосу дамби синусоїдальна форма хвилі отримала зміни в області її гребеня та підшови (рис. 9а). З наближенням до середньої частини верхнього укосу дамби ці зміни збільшилися і збільшилася висота порушених хвиль. На самій верхівці дамби спостерігається ударна дія хвилі на дамбу з високодобротними тональними складовими. В цьому місці дамби ударна хвиля, маючи значну інтенсивність, діє на дамбу тільки частиною свого гребеня. Підшови хвилі не досягає цього місця вимірювань, що відображено на формі пульсацій тиску на рис. 9в.

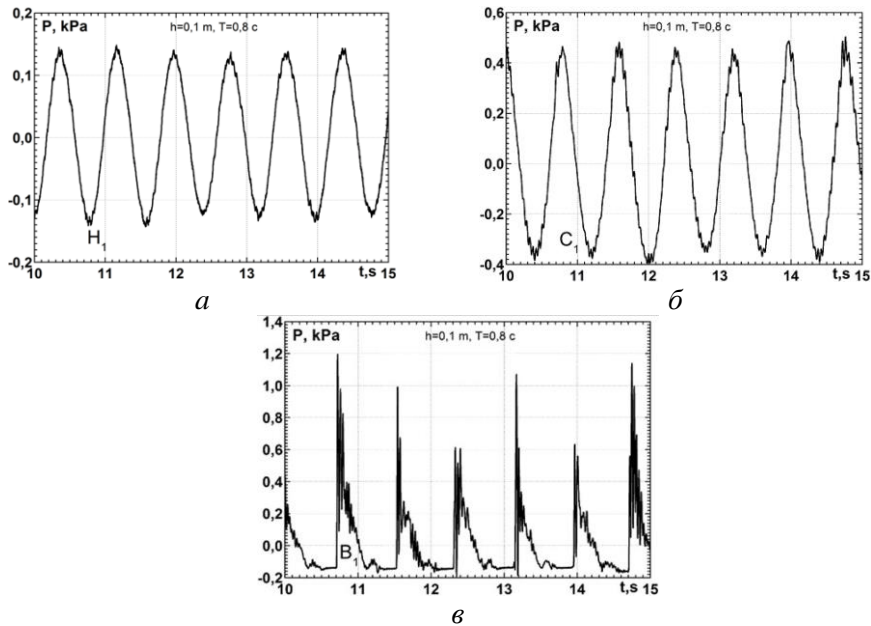


Рис. 9 – Хвильовий тиск на нижню частину (а), на середню частину (б) та на верхню частину (в) моделі верхнього укосу огороджувальної дамби

Частотний склад поля пульсацій тиску та джерел, які його генерують, представлено на рис. 10. 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 хвилепродуктором 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 (див., рис. 10б та рис. 10в). Це відповідає тому, що доходячи до гребеня дамби, штормова хвиля розбивається і утворюються буруни та дрібномасштабні хвильові компоненти. Хвильова енергія штормових хвиль перетворюється з інтенсивної низькочастотної складової у високочастотні складові, а сама хвиля трансформується у дрібномасштабні водяні маси, які діють на гребінь захисної огороджувальної дамби.

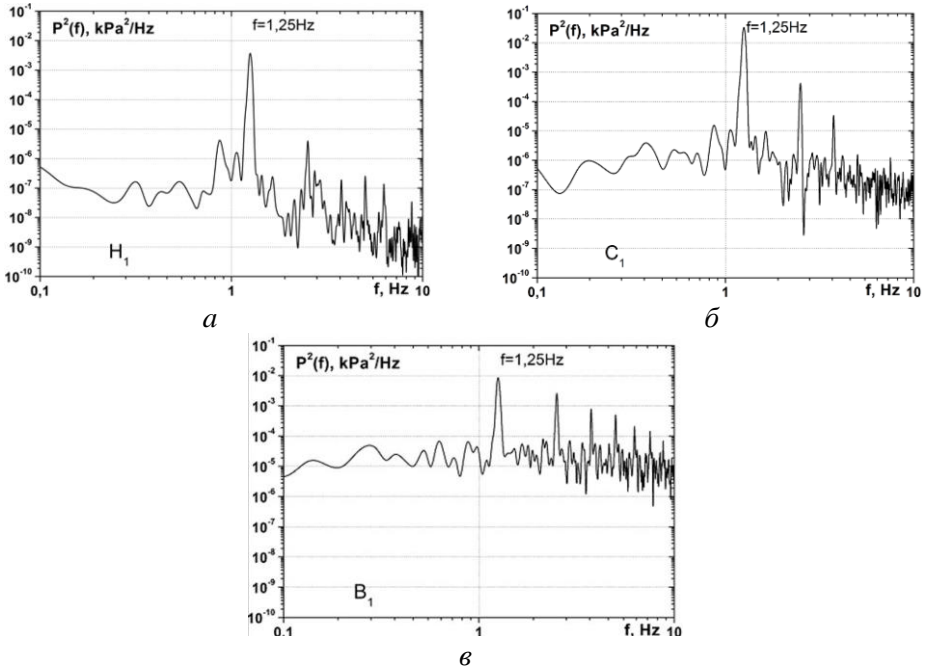


Рис. 10 – Спектральні густини потужності пульсацій тиску на нижню частину (а), на середню частину (б) та на верхню частину (в) моделі верхнього укусу огорожувальної дамби

Таким чином, теоретичні та експериментальні дослідження показали, що оптимальній конструкції захисної огорожувальної дамби морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай-Чорне море в акваторії гирла Бистре Килійської дельти р. Дунай відповідає ступінчаста дамба. Найменші хвильові навантаження ця дамба має за таких характеристик укусів і берм: нижній укіс повинен мати кут нахилу 1:1,5; нижня горизонтальна берма повинна мати довжину близько 10 м у натурі; середній укіс дамби повинен мати кут нахилу 1:5; нижня горизонтальна берма повинна мати довжину також близько 10 м у натурі, а верхній укіс дамби повинен мати кут нахилу 1:(3-3,5). При цьому верхня частина дамби повинна бути покрита кам'яною накидкою з фракцією каміння 1,2 м.

Висновки

Результати чисельного та фізичного моделювання щодо розробки рекомендацій з удосконалення та реконструкції захисної огорожувальної дамби морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай-Чорне море в акваторії гирла Бистре Килійської дельти р. Дунай показали, що:

1. Найбільш небезпечним напрямком вітрових хвиль на захисну огорожувальну дамбу є північно-східний напрямок. На базі рефракційної теорії результати розрахунків показали, що будівництво захисної огорожувальної дамби на виході з гирла Бистре призводить до значного зменшення висот хвиль (майже вдвічі) та їх довжин більше, ніж у 1,5 раза, що забезпечить безпроблемний захід і вихід суден у гирло Бистре.

2. Розрахунки за спектральною моделлю SWAN, яка використовується для обчислення еволюції вітрових хвиль у прибережних регіонах на мілкій воді, показали, що захисна огорожувальна дамба, яка відповідає проектним показникам, витримає навантаження хвильового поля з параметрами висот хвиль 2%-ї забезпеченості з урахуванням штормового нагону для всіх напрямків вітру, в тому числі і південно-східного напрямку, а також різних швидкостей вітру, які притаманні цій зоні Чорного моря.

3. Морфодинамічні розрахунки за допомогою моделі XBeach показали, що загальною особливістю придонного руху води в районі гирла Бистре є наявність струменевих течій з швидкостями, близькими до (1-2) м/с. Особливо інтенсивні течії спостерігаються в протоці між берегом і північною ділянкою коси Пташиної. При цьому урахування штормового нагону не приводить до помітного ослаблення цієї течії. Якщо в умовах межені ($Q \leq 500 \text{ м}^3/\text{с}$) вплив річкових вод на циркуляцію усередині огорожувальної дамби практично не позначається, то при витраті в гирлі ($Q > 500 \text{ м}^3/\text{с}$), яка формує русло, відбувається повне зникнення циркуляції.

4. Установлено, що найбільше істотні деформації дна відбуваються в протоці між північною ділянкою коси Пташиною і материком. При цьому і сама коса схильна до помітних деформацій на всьому своєму контурі. З внутрішньої сторони захисної дамби і на осі каналу деформації дна незначні. Якщо штормовий нагін не враховується, то деформації коси Пташиної не відбувається. Внесок річкового стоку у формування деформацій дна помітний лише при витраті гирла Бистре близько $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ і більше.

5. Результати фізичного моделювання показали, що хвильове поле поблизу захисної огорожувальної дамби має суттєво неоднорідний і випадковий характер з детермінованими складовими. Визначено особливості трансформації штормових хвиль на підході до дамби та виявлено вплив форми дамби на параметри хвильового поля. Виявлено просторово-часові характеристики хвильового тиску на конструкцію дамби та показані джерела поля пульсацій тиску на поверхні верхньої частини дамби. Проведені експериментальні дослідження з визначення ефективної конструкції захисної дамби, яка має мінімальні навантаження від дії максимальних штормових хвиль, які притаманні морській акваторії експлуатації дамби.

6. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що оптимальній конструкції захисної огорожувальної дамби морського підхідного каналу глибоководного суднового ходу Дунай-Чорне море в акваторії гирла Бистре Килійської дельти р. Дунай відповідає ступінчаста дамба. Найменші хвильові навантаження ця дамба має за таких характеристик укосів і берм: нижній укіс повинен мати кут нахилу 1:1,5; нижня горизонтальна берма повинна мати довжину близько 10 м у натурі; середній укіс дамби повинен мати кут нахилу 1:5; верхня горизонтальна берма повинна мати довжину також близько 10 м у натурі, а верхній укіс дамби повинен мати кут нахилу 1:(3-3,5). Глибина води над першою бермою повинна складати 4 м, а над другою бермою – близько 2 м. Верхня частина дамби повинна бути покрита кам'яною накидкою з фракцією каміння 1,2 м.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналіз морфодинаміки прибережної зони району ГСХ Дунай – Чорне море за наявними даними космічної зйомки у 2010-2011 рр. та результати промірів глибин в 2011 р. Звіт УЦМЗР, етап 1. – Київ: УЦМЗР, 2011. – 25 с.
2. Аналіз гідроморфологічних і техногенних процесів під час експлуатації ГСХ р. Дунай-Чорне море в рамках проекту “Створення глибоководного суднового ходу р. Дунай-Чорне море на українській ділянці дельти. Повний розвиток” у 2015 році. – Ізмаїл: ДГМО, 2015. – 9 с.
3. Реконструкція споруди огорожувальної дамби МПК ГСХ Дунай-Чорне море на українській ділянці дельти, Одеська область, Кілійський район, гирло Бистре. Математичне та фізичне моделювання хвильових процесів, Етап 1. – Київ: ІГМ НАНУ, 2015. – 73 с.
4. Селезов И.Т., Сидорчук В.Н., Яковлев В.В. Трансформация волн в прибрежной зоне шельфа. – Киев: Наукова думка, 1983. – 208 с.
5. Liu D.-J., Cheng D., Sun Z.-C., Zhao X.-Z., Chen Y., Lin W.-D. Experimental and numerical study of regular waves past a submerged breakwater // J. Hydrodynamics. – 2019. – Vol. 31. – P. 641-653. <https://doi.org/10.1007/s42241-019-0001-9>
6. Селезов И.Т., Сорокина В.В. Численное исследование рефракции поверхностных волн лучевым методом // Гидротехническое строительство. – 1981. – №1. – С. 39-42.
7. SWAN Cycle III version 41.31. User Manual. – Delft University of Technology, Netherlands, 2019. – 149 p.
8. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M. Dynamics and modelling of ocean waves. – Cambridge: University Press, 1994. – 532 p.
9. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. – Киев: Наукова думка, 1992. – 244 с.
10. Харитоновна Л.В., Иванча Е.В., Алексеев Д.В. Влияние штормовых нагонов и ветровых волн на морфодинамические процессы в районе Бакальской косы // Морской гидрофизический ж. – 2015. – № 1. – С. 79-90.
11. XBeach Model Description and Manual. – Unesco-IHE Institute for Water Education, Delft and Delft University of Technology, 2015. – 138 p.
12. Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R., Lescinski J. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands // Coastal Engineering. – 2009. – Vol. 56. – P. 1133-1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
13. Trouw K., Zimmermann N., Mathys M., Delgado R., Roelvink D. Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport in the surf zone: A sensitivity study with different types of numerical models // Coastal engineering proc. – 2012. – Vol. 33, № 1 – P. 1-12. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.23>
14. McCall R. The longshore dimension in dune over wash modelling. Development, verification and validation of XBeach. – Thesis: Delft University of Technology, 2008. – 147 p.
15. Хомицький В.В., Воскобойник В.А., Харченко А.Г., Воскобойник О.А., Терещенко Л.М., Воскобойник А.В., Нікітін І.А. Захист пляжу активними берегозахисними спорудами // Екологічна безпека та природокористування. – 2019. – Т. 32, № 4. – С. 60-77. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.4.60-77>
16. Yakovlev V., Voskoboynick V., Khomicky V., Tereshchenko L., Tkachenko V. Calculation method of wind waves for variable depths of sea area // Abstracts of the 1st International scientific and practical conference “Innovative Development of Science and Education”. – Athens, Greece, 2020. – P. 153-159.
17. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
18. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физическое моделирование. – Новосибирск: Наука, 1986; – 295 с.

19. Лаппо Д.Д., Жуковец А.М., Мищенко С.С. Условия автомодельности в исследованиях волнового движения жидкости // Изв. ВИНТИ им. Веденеева. – 1979. – Т. 132. – С. 59-65.
20. Divinsky B.V., Fomin V.V., Kosyan R.D., Ratner Yu.D. Extreme wind waves in the Black Sea // *Oceanologia*. 2019. – Vol. 61, № 1. – P. 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
21. Крылов Ю.М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 225 с.
22. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model // in *Coastal and Estuarine Sciences*, N.S. Heaps (ed). – 1987. – Vol. 4. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1029/CO004p0001>
23. Селезов И.Т., Хомицкий В.В., Ткаченко В.А., Терещенко Л.Н., Савченко С.А., Братасюк И.П. Исследование трансформации поверхностных гравитационных волн над затопленным волноломом сложной формы // *Прикладная гидромеханика*. – 2013. – Т.15, №4. – С. 71-77.
24. Loksha, Kerpen N.B., Sannasiraj S.A., Sundar V., Schlurmann T. Experimental investigations on wave transmission at submerged breakwater with smooth and stepped slopes // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 116. – P. 713-719. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.356>
25. Voskoboinick V., Voskoboinyk O., Voskobijnyk A. Investigation of wall pressure fluctuation fields using miniature sensors // Abstracts of IX International Scientific and Practical Conference “Actual Aspects of Development in the context of Globalization”. – Florence, Italy, 2020. – P. 265-269.
26. 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, № 4. – P. 709-722. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9433-9>
27. Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.V., Areshkovych O.O., Voskoboinyk O.A. Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier // *Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016*. - Oxford, UK, 2016. – P. 905-910. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
28. Voskoboinick V.A., Turick V.N., Voskoboinyk O.A., Voskoboinick A.V., Tereshchenko I.A. Influence of the Deep Spherical Dimple on the Pressure Field Under the Turbulent Boundary Layer // In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 754. Springer, Cham. – 2019. – P. 23-32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_3
29. Vinogradnyi G.P., Voskoboinick V.A., Grinchenko V. T., Makarenkov A. P. Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder // *J. Fluid Dyn.* – 1989. – 24, № 5. – P. 695-700. <https://doi.org/10.1007/BF01051721>
30. Voskoboinick V.A., Grinchenko V.T., Makarenkov A.P. Correlation characteristics of a wall pressure fluctuation field in a turbulent boundary layer induced by a longitudinal flow along a flexible extended cylinder // *Intern. J. Fluid Mech. Res.* – 2003. – 30, № 6. – P. 644–650. <https://doi.org/10.1615/InterFluidMechRes.v30.i6.70>

Стаття надійшла до редакції 23.03.2020 і прийнята до друку після рецензування 03.07.2020

REFERENCES

1. Analysis of the morphodynamics of the Danube – Black Sea coastal zone according to the available space survey data in 2010-2011 and depth measurements in 2011. (2011). *UCMZR Report, Phase I*. Kyiv: UCMZR. (in Ukrainian)

2. Analysis of hydromorphological and technogenic processes during the operation of the Danube-Black Sea GCS within the framework of the project “Creation of a deep-water course of the Danube-Black Sea on the Ukrainian section of the Delta. Full Development” in 2015. (2015). Ishmael: DGMO. (in Ukrainian)
3. Reconstruction of the construction of the Danube-Black Sea MPK GSKh dam on the Ukrainian delta section, Odesa region, Kili district, Bystre mouth. *Mathematical and Physical Modeling of Wave Processes, Stage 1*. (2015). Kiev: IHM NASU. (in Ukrainian)
4. Selezov, I.T., Sidorchuk, V.N., & Yakovlev, V.V. (1983). *Transformation of waves in the coastal zone of the shelf*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
5. Liu, D.-J., Cheng, D., Sun, Z.-C., Zhao, X.-Z., Chen, Y., & Lin, W.-D. (2019). Experimental and numerical study of regular waves past a submerged breakwater. *J. Hydrodynamics*, 31, 641-653. <https://doi.org/10.1007/s42241-019-0001-9>
6. Selezov, I.T., & Sorokina, V.V. (1981). Numerical study of surface wave refraction by the ray method. *Hydrotechnical construction*, 1, 39-42. (in Russian)
7. SWAN Cycle III version 41.31. User Manual. (2019). Delft University of Technology, Netherlands.
8. Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen P.A.E.M. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge: University Press.
9. Blatov, A.S., & Ivanov, V.A. (1992). *Hydrology and hydrodynamics of the Black Sea shelf zone*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
10. Kharitonova, L.V., Ivancha, E.V., & Alekseev, D.V. (2015). Influence of storm surges and wind waves on morphodynamic processes in the area of Bakal spit. *Marine hydrophysical j.*, 1, 79-90. (in Russian)
11. XBeach Model Description and Manual. (2015). Unesco-IHE Institute for Water Education, Delft and Delft University of Technology.
12. Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56, 1133-1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
13. Trouw, K., Zimmermann, N., Mathys, M., Delgado, R., & Roelvink, D. (2012). Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport in the surf zone: A sensitivity study with different types of numerical models. *Coastal engineering proc.*, 33(1), 1-12. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.23>
14. McCall, R. (2008). The longshore dimension in dune over wash modelling. Development, verification and validation of XBeach. Thesis: Delft University of Technology.
15. Khomicky, V., Voskoboinick, V., Kharchenko, A., Voskoboinyk, O., Tereshchenko, L., Voskoboinick, A., & Nikitin, I. (2019). Defense of beach by active coast-protecting structures. *Environmental Safety And Natural Resources*, 32(4), 60-77. doi:<http://dx.doi.org/10.32347/2411-4049.2019.4.60-77>. (in Ukrainian)
16. Yakovlev, V., Voskoboinick, V., Khomicky, V., Tereshchenko, L., & Tkachenko, V. (2020). Calculation method of wind waves for variable depths of sea area. *Abstracts of Papers. 1st International scientific and practical conference “Innovative Development of Science and Education”*. Athens, Greece, 2020. (pp. 153-159).
17. Sedov, L.I. (1977). *Methods of similarity and dimension in mechanics*. M.: Nauka. (in Russian)
18. Kutateladze, S.S. (1986). *Similarity analysis and physical modeling*. Novosibirsk: Nauka. (in Russian)
19. Lappo, D.D., Zhukovets, A.M., & Mishchenko, S.S. (1979). Self-driving conditions in studies of fluid wave motion. *Izv. VINITI im. Vedeneeva*, 132, 59-65. (in Russian)
20. Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D., & Ratner, Yu.D. (2019). Extreme wind waves in the Black Sea. *Oceanologia*, 61(1), 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
21. Krylov, Yu. M. (1966). *Spectral methods for the study and calculation of wind waves*. L.: Hydrometeoizdat. (in Russian)

22. Blumberg, A.F., & Mellor, G.L. (1987). *A description of three dimensional coastal ocean circulation model*. In N.S. Heaps (Ed.), *Coastal and Estuarine Sciences* (Vol. 4, pp. 1-16). doi:<https://doi.org/10.1029/CO004p0001>
23. Selezov, I.T., Khomitsky, V.V., Tkachenko, V.A., Tereshchenko, L.N., Savchenko, S.A., & Bratasyuk, I.P. (2013). Investigation of the transformation of surface gravitational waves over a flooded wave of complex shape. *Applied Hydromechanics*, 15(4), 71-77. (in Russian)
24. Loksha, Kerpen N.B., Sannasiraj, S.A., Sundar, V., & Schlurmann, T. (2015). Experimental investigations on wave transmission at submerged breakwater with smooth and stepped slopes. *Procedia Engineering*, 116, 713-719. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.356>
25. Voskoboinick, V., Voskoboinyk, O., & Voskobijnyk, A. (2020). Investigation of wall pressure fluctuation fields using miniature sensors. *Abstracts of Papers. IX International Scientific and Practical Conference "Actual Aspects of Development in the context of Globalization"*. Florence, Italy, 2020. (pp. 265-269).
26. 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>
27. Voskoboinick, V.A., Voskoboinick, A.V., Areshkovych, O.O., & Voskoboinyk, O.A. (2016). Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. In *Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016)*, Oxford, UK, 12-15 September 2016. (pp. 905-910). <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
28. Voskoboinick, V.A., Turick, V.N., Voskoboinyk, O.A., Voskoboinick, A.V., & Tereshchenko, I.A. (2019). *Influence of the Deep Spherical Dimple on the Pressure Field Under the Turbulent Boundary Layer*. In Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (Eds.), *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol 754. pp. 23-32). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_3
29. 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>
30. Voskoboinick, V.A., Grinchenko, V.T., & Makarenkov, A.P. (2003). Correlation characteristics of a wall pressure fluctuation field in a turbulent boundary layer induced by a longitudinal flow along a flexible extended cylinder. *Intern. J. Fluid Mech. Res.*, 30(6), 644-650. <https://doi.org/10.1615/InterJFluidMechRes.v30.i6.70>

The article was received 23.03.2020 and was accepted after revision 03.07.2020

Хомицький Віталій Володимирович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу Гідродинаміки хвильових і руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

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

ORCID ID 0000-0003-0910-2233 **e-mail:** homicky@ukr.net

Островерх Борис Миколайович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу Гідродинаміки хвильових і руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

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

ORCID ID 0000-0002-3373-5535 **e-mail:** ostro@ukr.net

Ткаченко Віктор Олексійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу Гідродинаміки хвильових і руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

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

ORCID ID *e-mail:* tkachenkob@gmail.com

Воскобійник Володимир Анатолійович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу Гідродинаміки хвильових і 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

Терещенко Лідія Миколаївна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу Гідродинаміки хвильових і руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

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

ORCID ID 0000-0001-6068-7092 *e-mail:* litere70@gmail.com