
Сформулированы принципы создания программного обеспечения программно-аппаратных комплексов поддержки принятия решений и требования к аналитическим моделям для обеспечения надежной и безаварийной эксплуатации систем динамического позиционирования.

***Ключевые слова:** система динамического позиционирования, безопасность мореплавания, программное обеспечение.*

Gabruk R.

CONCEPTS OF FIRMWARE DECISION SUPPORT SYSTEM SOFTWARE CREATION FOR DYNAMIC POSITIONING SAFETY

Concepts of firmware decision support system software creation and requirements of analytic model were formed to ensure reliable and accident-free dynamic positioning.

***Keywords:** dynamic positioning system, safety of navigation, software.*

УДК 627.223.6

Хомицький В.В., Фомін В.В., Ткаченко В.О., Терещенко Л.М., Горбатенко Є.Г.

ПРОГНОЗУВАННЯ ХВИЛЬОВОГО РЕЖИМУ НА ФАРВАТЕРАХ ЗІ СКЛАДНИМИ УМОВАМИ ПІДХОДУ

На прикладі глибоководного судового ходу на баровій частині Новостамбульського гирла Килійської дельти р. Дунай в статті розглядаються особливості розрахунку хвильового режиму на фарватерах зі складними умовами підходу.

***Ключові слова:** судноплавний канал, рефракція хвиль, трансформація хвиль, спектральна модель.*

Прогноз розрахункових значень швидкості вітру та параметрів хвиль є однією з головних проблем при провадженні суден в вузькостях і особливо при розташуванні каналу в гирловій частині річки. Сильний вітер та висока хвиля не тільки ускладнюють керування рухом судна, але й накладають цілком обумовлені вимоги на розміри каналу. Так, від співвідношення параметрів хвиль та довжини судна разом з урахуванням кута між віссю каналу та кутом підходу хвиль залежить просідання корпусу судна [1]. Правила плавання по каналу регламентують можливість користування таким при визначених величинах названих факторів. Що стосується будівельних габаритів каналу, то запас під килем призначають з урахуванням замулення, яке в свою чергу залежить від хвильових та вітрових течій. Саме фактор замулення може впливати на вибір типу каналу: "прохідний углиб континенту" (через лиман та гирло річки) або "обхідний" (в обхід гирла річки – через континент) [2].

При проектуванні підхідного каналу розрахункові величини вітру та хвиль нормативної забезпеченості взагалі визначають за допомогою статистичних даних та стандартних розрахунків. В умовах складних фарватерів, в тому разі при наявності в зоні дії каналу гідротехнічних споруд, дослідження факторів динаміки потребують використання математичних моделей.

В даній статті на прикладі дослідження нестационарних гідродинамічних полів на фарватері судового ходу в баровій частині гирла Бистре р. Дунай розглядається методика моделювання розвитку, розповсюдження та трансформації над каналом вітрових хвиль.

Математичне моделювання проводилось на основі рефракційної та спектральної хвильових моделей.

Гирлова область Дунаю складається з дельти та узмор'я. Від вершини дельти (Ізмаїльського Чатала), де Дунай розділяється на два головні рукави (Килійський і Тульчинський) відстань по прямій до будь-якого пункту її морського краю не перевищує 70-80 км. Узмор'я є прибережною смугою шириною 8-10 км. і протяжністю близько 180 км. Морська межа гирлової області Дунаю проходить на узмор'ї приблизно по ізобаті 22 м.

Довжина рукава Бистрий (Новостамбульський), через яких прокладено судовий хід, дорівнює 9,2 км., ширина – 210 м, середня глибина – 6 м. При пропуску середньобагаторічної витрати води течія в рукаві становить 0,71 м/с.

Гирловий бар рукава Бистрого відноситься до річкового гирлового типу. Процес дельтоутворення на баровій частині продовжується і характеризується наявністю конуса винесення, утворенням островів (осередків) і морських кіс. Дельта рукава формується при деякому переважанні морських чинників і характеризується дугоподібною формою гирлового бару з хвилеподібним морським краєм (рис.1).

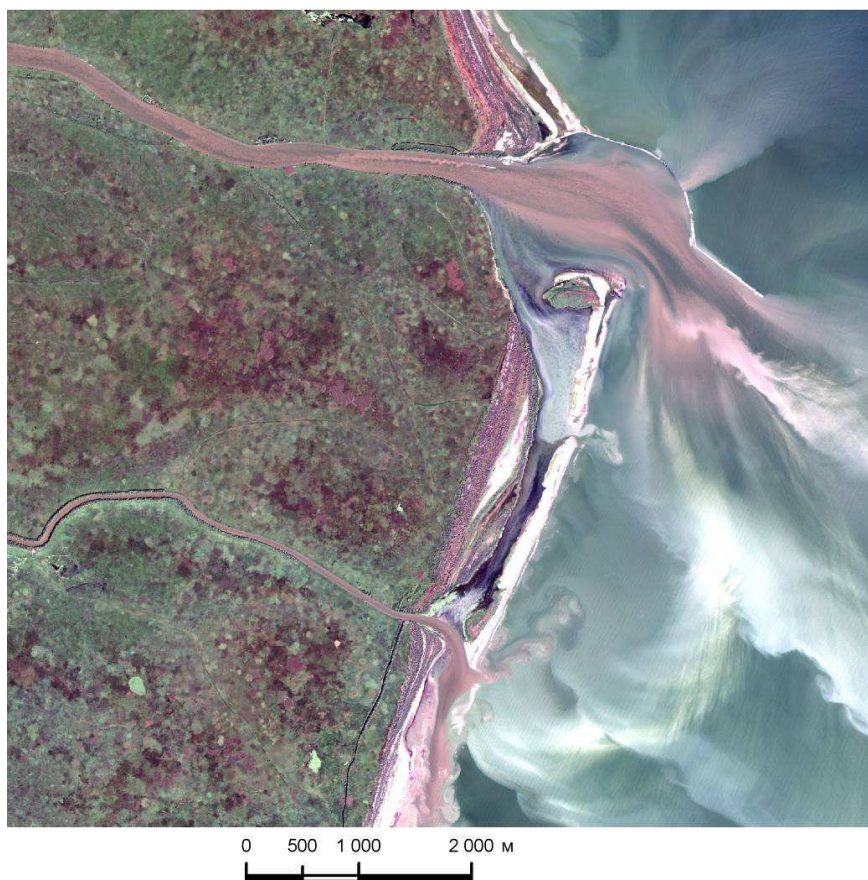


Рис.1. Зображення каналу з супутника WorldView-2 від 24.08.2010р (дані УЦМЗР)

Морфометричні характеристики бару наступні: довжина – 1450 м; глибина на гребені 1,0 м; довжина морського краю бару – 4200 м. Провідним геоморфологічним процесом на узбережжі досліджуваної ділянки є абразійно-аккумулятивні процеси в Килійській дельті, а основним режимоформуючим чинником – річковий стік і водообмін з морем. Ведучі гідродинамічні процеси – вітрове хвилювання, течії, нагони та згони рівня моря. Основними джерелами надходження наносів на узмор'ї є грубозернисті фракції річкової і морської суспензії і тяглих наносів, а також берегоформуєча частина ($d > 0.10$ мм) вздовжберегового потоку наносів. Провідну роль в динаміці вод грають вздовжберегові енергетичні течії.

Гідродинамічні умови району формуються переважаючим східним перенесенням повітряних мас. На всьому узбережжі впродовж року переважають вітри W, S і NO напрямів. Для розрахункової ділянки характерні відносно круті ($\lambda_0=12\dots13$) хвилі, що мають висоту 1,9...4,0 м і довжину 21- 45 м. Хвилювання швидко розвивається і встановлюється через 4-6 годин після початку дії вітру. Найбільш сильні шторми співпадають в часі з підйомами нагонного рівня. Тривалість сильних штормів 24-108 годин [3, 4].

Нагонні-згонні коливання рівнів на узмор'ї – короткоперіодні. Швидкість підйому рівня при нагонах складає приблизно 6-10 см/годину, при згоні – 4-8 см/годину. Для розрахункових вітрів величина нагону в створі каналу не перевищує 1,0 м.

Головну поверхневу течію в районі рукава Бистрий утворює циклонічне кільце течій із швидкістю 0,1-0,3 м/с. Приливні коливання рівнів в досліджуваному районі носять неправильний півдобовий характер з амплітудою 0,08 - 0,10 м.

Аналіз історії Килійської дельти показує, що в цілому акумулятивні процеси в дельті та процеси абразії різних мисів і барів компенсують один одного.

При існуючій підводній топографії загальна довжина прорізу судового ходу дорівнює 3,2 км. Робоча глибина каналу – 7,0 м, загальний об'єм виєму – 1,1 млн.м³. З північної сторони канал огорожений кам'янонакидною дамбою довжиною 2,45 км.

Розрахунки трансформації хвиль над каналом виконані в рамках рефракційної моделі. Перевагою такого підходу є зведення завдання про розповсюдження хвиль в рідині змінної глибини до системи п'яти звичайних диференціальних рівнянь, що значно знижує обсяг обчислень, необхідних для її вирішення, і дозволяє за допомогою сучасних ЕОМ порахувати трансформацію хвиль в акваторіях, розміри яких на декілька порядків перевищують довжину хвилі.

Нижче 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 якому промінь розповсюдження хвиль, що задається параметрично у вигляді $x=x(t)$, $y=y(t)$, проходить шлях за мінімальний час і задовольняє рівнянням [5]

$$\frac{dx}{dt} = c \cos \alpha, \quad \frac{dy}{dt} = c \sin \alpha, \quad \frac{d\alpha}{dt} = \frac{\partial c}{\partial x} \sin \alpha - \frac{\partial c}{\partial y} \cos \alpha. \quad (1)$$

Тут t – час проходження променя, α – кут між променем і віссю x , $c(x,y)=\lambda/T$ – швидкість розповсюдження хвилі, $\lambda(x,y)$ – довжина хвилі, $T=\sqrt{2\pi\lambda/(g \operatorname{th}(2\pi d/\lambda))}$, – період хвилі, $d(x,y)$ – глибина.

Коефіцієнт рефракції визначається за формулою [5]

$$K_p = 1/\sqrt{\beta}, \quad (2)$$

де $\beta=l/l_{ucx}$ – коефіцієнт розділення променів l_{ucx} – відстань між променями на глибокій воді.

Коефіцієнт розділення променів β задовольняє рівнянню [5]

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} + P(t) \frac{d\beta}{dt} + Q(t) \beta = 0. \quad (3)$$

В (3) величини $P(t)$ і $Q(t)$, маючи на увазі залежність $x=x(t)$ і $y=y(t)$, визначаємо за формулами

$$P = -2\left(\frac{\partial c}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial c}{\partial y} \sin \alpha\right), \quad Q = c\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \sin^2 \alpha - \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} \sin 2\alpha + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}\right).$$

Введенням допоміжної змінної $\frac{d\beta}{dt} = \delta$ рівняння (3) приводиться до системи рівнянь першого порядку

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = \delta, \quad \frac{\partial \delta}{\partial t} = -P(t)\delta - Q(t)\beta. \quad (4)$$

Таким чином, ми приходимо до системи п'яти звичайних диференціальних рівнянь (1) і (4) для визначення координат променя та коефіцієнта розділення променів. При початковій умові $t=0$ маємо відповідні хвилі на розрахунковій глибині воді

$$x(0)=x_{ucx}, \quad y(0)=y_{ucx}, \quad \alpha(0)=\alpha_{ucx}, \quad \beta(0)=1, \quad \delta(0)=0. \quad (5)$$

Над гладким рельєфом дна за відсутності перетину променів чисельне вирішення системи рівнянь (1) - (4) з початковими умовами (5) дозволяє побудувати план рефракції. Далі при розрахунку рефракції хвиль, що наближаються до берегу, припускаємо, 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 хвилевої дії, який еквівалентний постійному потоку енергії у відсутності течій, тобто виконуються умови збереження енергії вздовж променя. Тоді висоту хвилі на даній глибині d можна визначити як функцію від висоти хвилі на розрахунковій глибині за допомогою формули [6]

$$h = h_{ucx} K_p K_{\Pi} \sqrt{\frac{[(1 + 2kd / \text{sh} 2kd) \text{th} kd]_{ucx}}{(1 + 2kd / \text{sh} 2kd) \text{th} kd}}, \quad (6)$$

де $k=2\pi/\lambda$ - хвильове число, яке визначається з вирішення трансцендентного рівняння $4\pi^2/(gT^2)=k \text{ th}(kd)$, а K_{Π} – коефіцієнт втрат який визначається по СНіП 2.06.04-82 [7]. K_p – коефіцієнт рефракції.

Алгоритм розрахунку напрямку променя та коефіцієнта розділення променів, побудований на розв'язати системи (1) і (4) з початковими умовами (5) методом Рунге-Куты з подальшим визначенням висот хвиль вздовж променя за (6), реалізований у вигляді програми на мові Фортран. В результаті розрахунків можна визначити параметри трансформованих хвиль в даній області, тобто напрям, висоту, довжину і кут набігання хвилі для кожного променя.

Висота хвилі на глибині, відповідній початку її першого обвалення (x_{br}, y_{br}) задовольняє критерію початку руйнування

$$\begin{aligned} \text{при } d_{br}/\lambda_{\beta p} > 0.1, \quad \text{Міша [8]} \quad h_{br}/\lambda_{br} > 0.14 \text{ th}(2\pi d_{br}/\lambda_{br}), \\ \text{при } d_{br}/\lambda_{\beta p} < 0.1 \quad \text{Мунка [6]} \quad h_{br} > d_{br}/1.28. \end{aligned} \quad (7)$$

Глибина, яка відповідає початку другого і третього обвалення, визначалася по СНіП 2.06.04-82 [7]. Після обвалення висоти трансформованих хвиль обчислюються по [7]. Якщо висота хвилі h , визначена по [7], була більша $d/1.28$, то $h=d/1.28$.

Перерахунок поточного азимута трансформованих хвилі (Az) проводився по формулі

$$Az = Az_{исх} + (\alpha_{исх} - \alpha), \quad (8)$$

де $Az_{исх}, \alpha_{исх}$ – азимут і кут набігання хвилі на розрахунковій глибині, α – поточний кут набігання падаючої хвилі.

Математичне моделювання трансформації і руйнування хвиль на підході до гирла Бистре (Новостамбульське) виконане в рамках викладеної вище моделі рефракції для найбільш хвиленебезпечних напрямів розгону (NO, O, SO, S). Розрахункові параметри хвиль на глибокій воді проводилися по[9, 10].

На рис.2 наведені графіки променевої картини та трансформації висот хвиль $h_{2\%}$ при дії хвиленебезпечного вітру від NO швидкістю 25 м/с. Тут пунктирні тонкі лінії – ізолінії глибин моря, а великі точки на променях – початок першого обвалення вітрової хвилі. Промені хвиль проходять тут через точки обвалення.

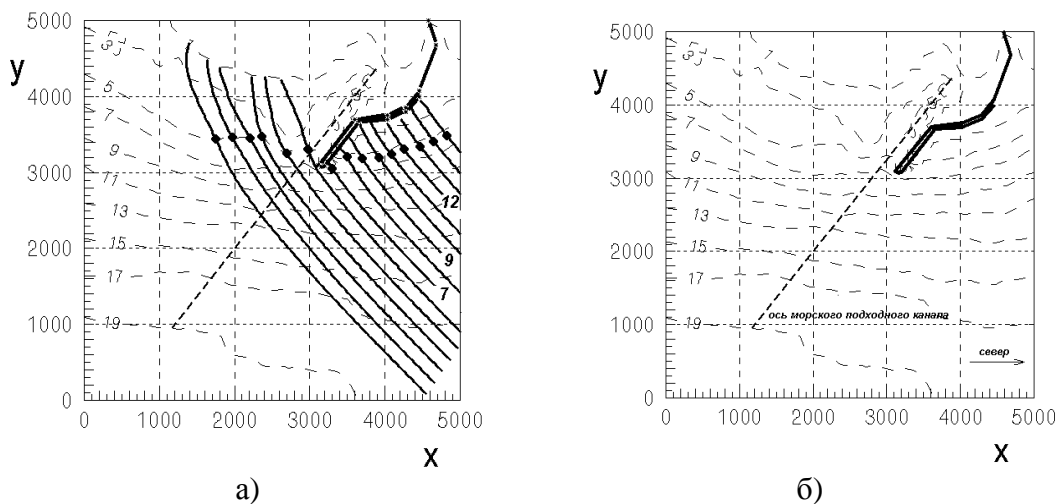


Рис.2. Променева картина (а) та висоти трансформованих хвиль (б)

На рис.3 показаний хід зміни параметрів набігаючої хвилі вздовж променів, що підходять до захисної дамби. Тут координати точки на промені подані в метрах d – глибина в цій точці, м; λ та Az – відповідно середня довжина хвилі, м, та азимут підходу променя, град.

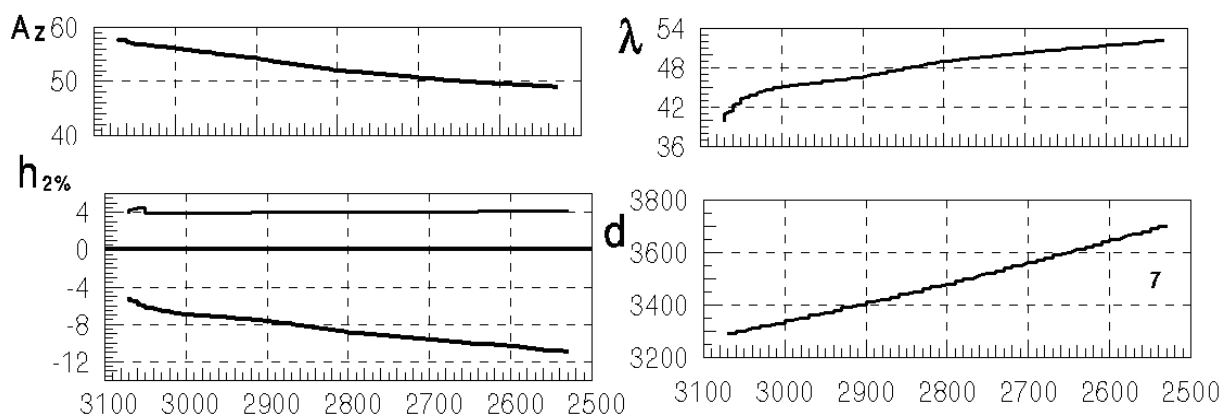


Рис.3. Параметри набігаючих хвиль при NO напрямі вітру

Чисельні розрахунки рефракції хвиль в районі захисної дамби проведені для найбільш хвиленебезпечних напрямів розгону вітру (NO, O, SO, S). Променеві картини трансформації хвиль в районі досліджуваного морського берега показують, що рефракція для всіх напрямів рівномірна, області каустик відсутні і розрахункові хвилі набігають на контури захисної дамби. Отримано, що для більшості досліджуваних напрямів вітру спостерігатиметься обвалення хвиль перед дамбою.

Для математичного моделювання вітрового хвилювання в районі гирла Бистре використана також паралельна версія спектральної хвилевої моделі SWAN Cycle III 40.81 (Delft Hydraulics, 2010). Модель основана на чисельному вирішенні рівняння балансу хвилевої енергії в спектральній формі [11-13]

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \omega} (c_\omega N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = S / \omega . \quad (9)$$

Тут $N = E/\omega$ – щільність хвилевої дії; E – енергетичний спектр хвилювання; x, y, t – просторові координати і час; ω, θ – частотна і кутова координати. Величини $c_x, c_y, c_\omega, c_\theta$ – швидкості перенесення щільності хвилевої дії уздовж відповідних просторових і частотно-кутових координат. Вирази для цих швидкостей визначається в припущенні поволі змінних параметрів середовища [14].

Функція джерела в правій частині рівняння (9) має вигляд

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib} , \quad (10)$$

де S_{in} – джерело генерації хвиль вітром; S_{nl} – нелінійні взаємодії спектральних гармонік; S_{wc} – дисипація енергії унаслідок обвалення хвилевих гребенів; S_{bf} – дисипація енергії, обумовлена донним тертям; S_{dip} – обвалення хвиль на критичних глибинах.

Вихідними даними моделі є наступні характеристики: висота значних хвиль $H_{1/3}$ (significant wave height) – середнє значення висот 1/3 найбільш високих хвиль в спектрі хвилювання; Θ_m – середній напрям розповсюдження хвиль; T_m – середній період хвиль; U_{wb} – амплітуда швидкості придонних хвилевих течій.

Як рельєф дна досліджуваного району використовувався цифровий масив, отриманий шляхом зняття глибин з навігаційних карт з подальшим згладжуванням і інтерполяцією. Розрахункова область мала розмір 6,87км x 6,17км (кількість вузлів – 500 x 320) з трьома рідкими бічними межами. Кроки сітки по зональній і меридіональній координатах склали 13,7 м і 19,3 м відповідно. Модельний рельєф дна представлений на рис.4.

Моделювалися стаціонарні хвилеві поля ($\partial N / \partial t = 0$). Розрахунки проводилися 3-х кроковим методом вкладених сіток. На першому кроці розраховувалося хвилювання для всього Азово-Чорноморського басейну на сітці 5км. Далі проводився розрахунок хвилювання в пригирловому районі Дунаю на сітці 1 км. Як граничні умови на рідкій межі бралися результати розрахунків на першому кроці. На завершальному кроці розраховувалося хвилювання в районі, представленому на рис.4. На рідких межах використовувалися результати моделювання з другого кроку.

У всіх випадках дозвіл моделі по кутовій координаті складав 5° , частотний інтервал дорівнював 0,04-2 Гц. Проводився параметричний облік дифракції хвиль [15]. Донне

тертя в SWAN визначалося методом Гранта-Мадсена [14] з постійним параметром еквівалентної жорсткості, рівним 0,01 м.

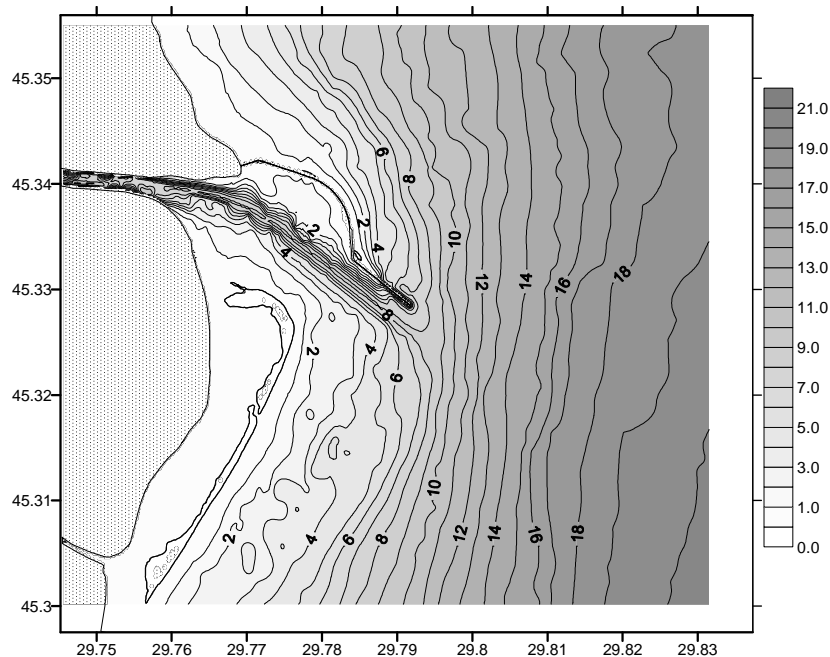


Рис.4. Модельний рельєф дна (м) на в районі гирла Бистре (ізобати дані через 1 м)

Приведені просторові розподіли висот хвиль 2%-ої забезпеченості ($H_{2\%}$) і середнього напрям хвилювання θ_m .

Режим вітрового хвилювання в досліджуваному районі визначається рельєфом дна, конфігурацією берегової лінії, швидкістю і напрямом вітру, а також величинами ефективних розгонів.

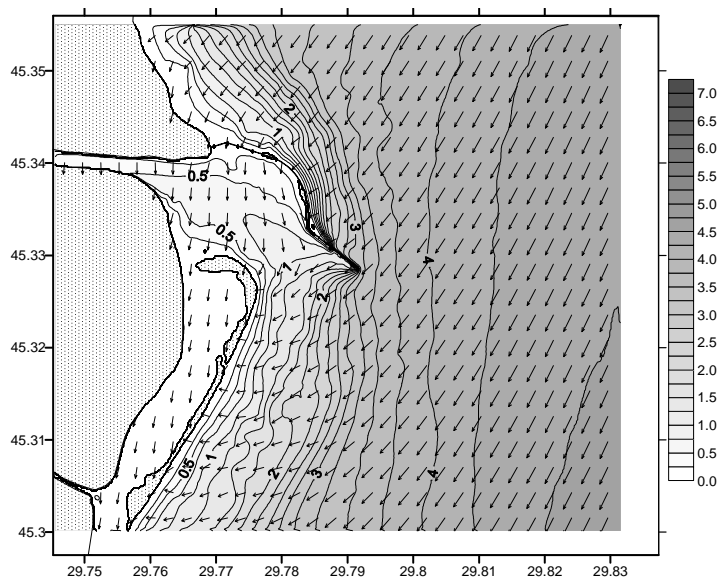


Рис.5 Висота хвиль 2 %-ої забезпеченості (м) і середній напрям хвилювання в районі гирла Бистре при північному вітрі 25 м/с (ізолінії дані через 0,25 м)

Для оцінки параметрів вітрового хвилювання розглядався «гіпотетичний» шторм, коли над всім Чорним морем дме однорідний по простору і постійний за часом вітер. Розрахунки виконувалося для 4-х варіантів напрямку і швидкості приводного вітру: північ – 25 м/с; північний схід – 24 м/с; схід – 21,5 м/с; південь – 21 м/с.

На рис.6 представлено поля амплітуди швидкості придонних орбітальних течій U_{wb} .

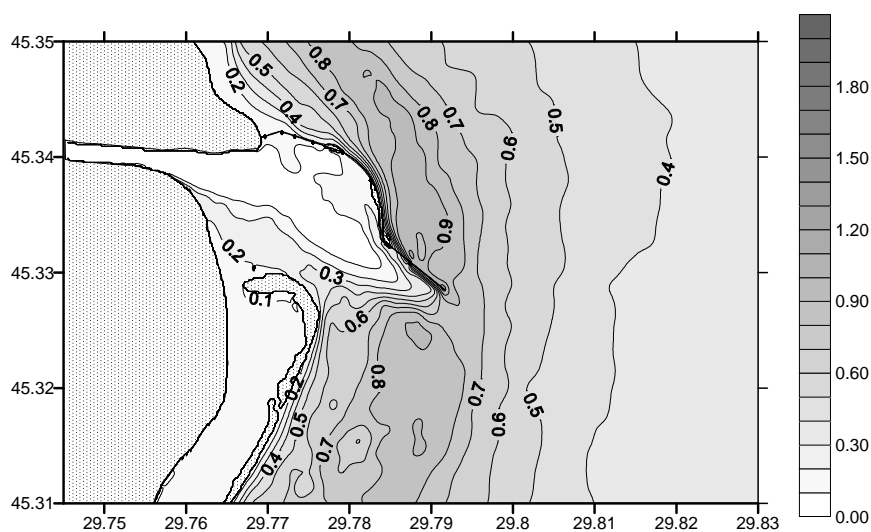


Рис. 6. Амплітуда швидкості придонних орбітальних течій (м/с) в районі гирла Бистре при північному вітрі 25 м/с. Ізолії дані через 0,1 м/с.

Для оцінки статистичних характеристик вітрового хвилювання в районі гирла Бистре був використаний тридцятирічний масив полів висот, напрямів і періодів вітрових хвиль в Чорному морі за період 1979-2008 рр. на регулярній сітці з дискретністю 5 км по простору і 6 годин за часом. Цей масив був розрахований по моделі SWAN з використанням даних вітрового реаналізу JRA [16].

Графік швидкості вітру на висоті 10м над рівнем моря за даними реаналізу JRA в розрахунковій точці приведений на рис.7. Жирною лінією показаний лінійний тренд.

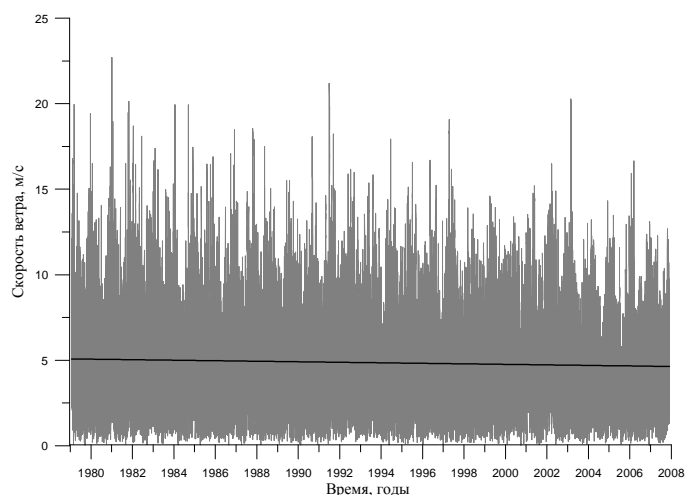


Рис.7. Швидкість приземного вітру в точці 45.33° с.ш., 29.83° в.д. за даними реаналізу JRA за 1979-2008 рр.

Висновки. Для оптимізації режиму проходження каналом рухомих плаваючих об'єктів на фарватерах зі складними умовами підходу доцільно використовувати спектральні та рефракційні математичні моделі з оцінкою розрахункового вітру за вітровим аналізом JRA.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Погосов С.Г.* Безопасность плавания в портовых водах. – М.: Транспорт, 1977. – 136 с.
2. *Мирошниченко В.Г.* Эксплуатация морских каналов. – М.: Транспорт, 1981. – 136 с.
3. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 4. Черное море. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 100 с.
4. Типовые поля ветра и волнения Черного моря. – Севастополь: Сев. отд. ГОИН, 1987. – 116с.
5. *Селезов И.Т., Сидорчук В.Н., Яковлев В.В.* Трансформация волн в прибрежной зоне шельфа. – Киев: Наукова думка, 1983. – 208 с.
6. *Смирнов Г.Н.* Океанология. – М.: Высшая школа, 1974. – 344 с.
7. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М.: Госстрой СССР. 1983. – 38с.
8. *Miche M.* Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés a l'action de la houle. // Ann. Ponts Chaussées. – 1944. – 121. – P.285-318.
9. *В.А. Ткаченко* Методика расчета параметров ветрового волнения в море переменной глубины // Годичный отчет института гидромеханики НАН Украины за 1997год. – Киев: ИГМ НАНУ, 1997. – С.23-24.
10. *Б.Ле Меоте* Введение в гиродинамику и теорию волн на воде. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 368с.
11. *Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H.*, A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. // J. Geophys. Res., 1999, 104(C4), p. 7649-7666.
12. *Ris, R.C., Booij N. Holthuijsen, L.H.* A third generation wave model for coastal regions, Part II, Verification. // J. Geophys. Res., 104, C4, p. 7667-7681.
13. User Manual SWAN Cycle III version 40.81 – <http://vlm089.citg.tudelft.nl/swan>
14. *Іванов в.А., Фомін В.В* Математичне моделювання динамічних процесів в зоні море-суша / Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-гидрофизика», 2008. – 363 с.
15. *Holthuijsen, L.H., A. Herman, Booij N.* Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models. Coastal Engineering, 2003 №49, p.291-305.
16. *Onogi K., Tsutsui J, Koide H. et al.* The JRA-25 Reanalysis. // J. Meteor. Soc. Japan, 2007, vol. 85.– P. 69-432.

Хомицкий В.В., Фомин В.В., Ткаченко В.А., Терещенко Л.Н., Горбатенко Е.Г.
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА НА ФАРВАТЕРАХ СО СЛОЖНЫМИ УСЛОВИЯМИ ПОДХОДА

На примере глубоководного судового хода на баровой части Новостамбульского устья Килийской дельты реки Дунай в статье рассматриваются особенности расчета волнового режима на фарватерах со сложными условиями подхода.

Ключевые слова: *судоходной канал, рефракция волн, трансформация волн, спектральная модель.*

V.Khomicky, V. Fomin, V. Tkachenko, L. Tereshchenko, E.Gorbatenko
PREDICTING WAVE REGIME ON THE FAIRWAYS WITH COMPLEX CONDITIONS APPROACH

In the case of deep trial run on bars of the mouth Novostambulskoho Kyliyskoyi Danube Delta in article features the calculation of wave mode on the fairway with challenging conditions approach.

Keywords: *shipping channel, the refraction of wave, the transformation of wave, spectral model.*