

УДК 626.13

Хомицький В.В.¹, к.т.н., пров.н.с.
Терещенко Л.М.², к.ф.-м.н., с.н.с.
Фомін В.В.³, д.ф.-м.н., проф.
Абрамова Л.П.⁴, провідний гідротехнік

Застосування чисельної спектральної моделі SWAN для розрахунків параметрів вітрового хвилювання в районі Кривої коси

¹ Інститут гідромеханіки НАНУ, вул. Желябова, 8/4, Київ, 03680, Україна
e-mail: homicky@ukr.net

² Інститут гідромеханіки НАНУ, вул. Желябова, 8/4, Київ, 03680, Україна
e-mail: lida_tereschenko@mail.ru

³ Морське відділення Українського НІГМІ, вул. Советська, 61, м. Севастополь, 99011, Україна

⁴ Інститут гідромеханіки НАНУ, вул. Желябова, 8/4, Київ, 03680, Україна

V. V. Khomicky¹, Senior Scientific Associate
L.N. Tereshchenko², Principle Scientific Associate
V.V. Fomin³, Doctor of Sciences
L. P. Abramova⁴, leading Hydraulic Engineering

The use of numerical models SWAN spectral parameters for the calculation of wind waves in the area Curve spit

¹ Institute of Hydromechanics, Academy of Sciences of Ukraine, 8/4 Zheliabov str., 03680 Kiev, Ukraine, e-mail: homicky@ukr.net

² Institute of Hydromechanics, Academy of Sciences of Ukraine, 8/4 Zheliabov str., 03680 Kiev, Ukraine e-mail: lida_tereschenko@mail.ru

³ Marine Branch of the Ukrainian Hydrometeorological Institute, 61, Soviet street, Sevastopol, 99011, Ukraine

⁴ Institute of Hydromechanics, Academy of Sciences of Ukraine, 8/4 Zheliabov str., 03680 Kiev, Ukraine,

Для моделювання вітрового хвилювання та штормового нагону в районі коси Кривої розташованої в Таганрозькій затоці Азовського моря використовувалася модель SWAN, основана на чисельному розв'язку рівняння балансу хвильової енергії в спектральній формі. У розрахунках використовувалася SWAN версії 40.85 в стаціонарному режимі. Кутівий дозвіл моделі складав 10°. По частотній координаті, що змінюється від 0,04 до 2 Гц, використовувалася нерівномірна сітка з 71 вузлом. Джерело генерації хвиль вітром визначалося на основі квазілінійної теорії Янсена. Була виконана серія з 20-ти чисельних експериментів по розрахунку хвильових характеристик для швидкостей і напрямків вітру представлених. У кожному експерименті глибина моря в 3-й області коректувалася шляхом додавання до неї максимальних підйомів рівня моря. Для побудови рельєфу дна розрахункових областей проводилася оцифровка навігаційних карт.

Ключові слова: вітрове хвилювання, модель SWAN, нагін, берегова зона.

To simulate wind waves and storm surge in the area of spit Curve located in Taganrog Bay of the Azov Sea used model SWAN, based on the numerical solution of wave energy balance equation in spectral form. The calculations used SWAN version 40.85 in the steady state. The angular resolution of the model was 10°. For coordinate frequency varying from 0.04 to 2 Hz was used irregular grid of 71 node. Source waves wind generation was determined on the basis of quasi-linear theory Janssen. For a description of bottom friction applied the theory of the relation of the Grant – Madsen. It was made a series of 20 experiments on numerical calculation of wave characteristics of wind speed and direction. In each experiment, the depth of the sea in the 3rd region corrected by adding to it the maximum sea level rise. For the construction of the bottom topography of settlement areas digitize navigational charts. The bottom relief was obtained by digitizing the navigation map 3434 scale 1:50 000. The results of calculations of the wave fields in the area Crooked braids show that the intensity of the wind waves on the wind direction is the same as for the storm surge, dangerous wind direction in order of importance are: the south- west, south, west, south-east.

Key Words: wind waves, model SWAN, assault, coastal zone.

Статтю представив д.ф.-м.н., проф. Анісімов А.В.

Азовське море за морфологічними ознаками відноситься до плоских морів і є мілководною водоймою з невисокими береговими схилами. Площа моря без Сивашу і лиманів складає 37 802 км². Площа Сивашу - 2 540 км², а водойм лиманового типу - 4 200 км². Найбільша його довжина від коси Арабатська стрілка до гирла р. Дон дорівнює 380 км, найбільша ширина між вершинами Темрюкської і Белосарайської заток - 200 км. Об'єм води при середній глибині 8,5 м дорівнює 320 км³.

Підводний рельєф Азовського моря порівняно простий: з віддалення від берега глибини повільно і плавно наростають, досягаючи в центральній частині моря 14,4 м. Основна площа характеризується глибиною 5 - 13 м. Область найбільших глибин знаходиться в центрі моря. Близьке до симетричного розташування ізобат, порушується витягнутістю Таганрозької затоки. Ізобата 5 м розташовується приблизно в 2 км від берега, віддаляючись від нього в затоках і лиманах.

У рельєфі дна Азовського моря відзначаються системи підводних височин, витягнутих уздовж східного (банка Железинська) і західного (банки Морська і Арабатська) узбереж'я моря, глибини над якими зменшуються від 8-9 м до 3-5 м. Для підводного берегового схилу північного узбережжя характерне широке мілководдя (20.30 км) з глибинами 6.7 м, для південного узбережжя - крутий підводний схил до глибин 11-12 м.

Північно-східна ділянка моря врізається в сушу на 140 км, утворюючи Таганрозьку затоку. Високі і обривисті береги північної та південної ділянок затоки прорізають ярами і балками. Від обох берегів виступають коси. На північному березі затоки найбільш великі коси - Беглицька і Крива.

Характеристики штормових нагонів і вітрового хвилювання в районі Кривої коси, розташованої в Таганрозькій затоці Азовського моря, визначаються: рельєфом дна і конфігурацією берегової лінії; швидкістю і напрямом вітру; величинами ефективних розгонів.

Берегова зона с. Обрив, що примикає зі сходу до основи Кривої коси, є мілководною акваторією з глибинами 1-2 м (ізобата 2 м розташовується на відстані 500-750 м від урізу води).

Для моделювання вітрового хвилювання використовувалася модель SWAN, основана на

чисельному розв'язку рівняння балансу хвилевої енергії в спектральній формі:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = S / \sigma \quad (1)$$

Тут S - функція джерела, що описує механізми формування хвилевого поля; $c_x, c_y, c_\theta, c_\sigma$ - швидкості перенесення хвилевої енергії, що визначаються на основі методу геометричної оптики:

$$c_x = c_g \frac{k_x}{k} + U, \quad c_y = c_g \frac{k_y}{k} + V,$$

$$c_\theta = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial m} + k_x \frac{\partial U}{\partial m} + k_y \frac{\partial V}{\partial m} \right), \quad (2)$$

$$c_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial H} \left(\frac{\partial H}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial y} \right) - \frac{c_g}{k} \left(k_x \frac{\partial U}{\partial s} + k_y \frac{\partial V}{\partial s} \right), \quad (3)$$

де c_g - групова швидкість; k_x, k_y - компоненти хвилевого вектору; $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$; $\sigma = \sqrt{gk \operatorname{th}(kH)}$ - власна частота; s - просторова координата, паралельна напрямку поширення хвиль; m - просторова координата перпендикулярна напрямку поширення хвиль. При виведенні співвідношень (2), (3) використовуються дисперсійне співвідношення і рівняння збереження хвилевих гребнів.

В результаті чисельного розв'язку рівняння (1) виходить просторово-часовий розподіл частотно-кутового спектру хвиль F . Якщо ввести операцію подвійної інтеграції по частоті від σ_{\min} до σ_{\max} і по напрямку від 0 до 2π :

$$\langle \Phi \rangle = \int_0^{2\pi} \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \Phi(\theta, \sigma) d\sigma d\theta, \quad (4)$$

Знаючи середню висоту хвиль, можна знайти висоти хвиль різних забезпеченостей на основі інтегральної функції розподілу для моря кінцевої глибини.

У розрахунках використовувалася модель SWAN версії 40.85 в стаціонарному режимі. Кутовий дозвіл моделі складав 10°. По частотній координаті, що змінюється від 0,04 до 2 Гц, використовувалася нерівномірна сітка з 71 вузлом. Джерело генерації хвиль вітром визначалося на основі квазілінійної теорії

Янсена. Для опису донного тертя застосовувалися співвідношення теорії Гранта-Мадсена з параметром шорсткості дна $k_N = 0,01m$. З метою підвищення точності розрахунків використовувався 3-х кроковий метод вкладених сіток. На першому кроці моделювалися поля хвилювання в усьому Чорноморському басейні на сітці $\sim 4,5 \times 4,5$ км (246×160 вузлів). На другому кроці на сітці $\sim 1,5 \times 1,5$ км (246×205 вузлів) хвилювання розраховувалося для акваторії, що включає Азовське море, Керченську протоку і північно-східний шельф Чорного моря.

На третьому кроці з дозволом $\sim 50 \times 50$ м (669×518 вузлів) розраховувалися поля вітрових хвиль в районі Кривої коси. На кроках 2 і 3 параметри хвиль на рідких межах визначалися інтерполяцією модельних даних, отриманих на попередніх кроках. На третьому кроці враховувалося вплив зміни рівня моря на вітрове хвилювання. Для цього глибина моря в SWAN задавалася у виді: $H = h + \eta$, де h - рельєф дна басейну; η - рівень моря, отриманий за допомогою моделі ADCIRC.

Для побудови рельєфу дна розрахункових областей проводилося оцифрування навігаційних карт. Рельєф дна третьої області показаний на рис. 1 Він був отриманий шляхом оцифрування навігаційної карти 3434 масштаби 1:50 000.

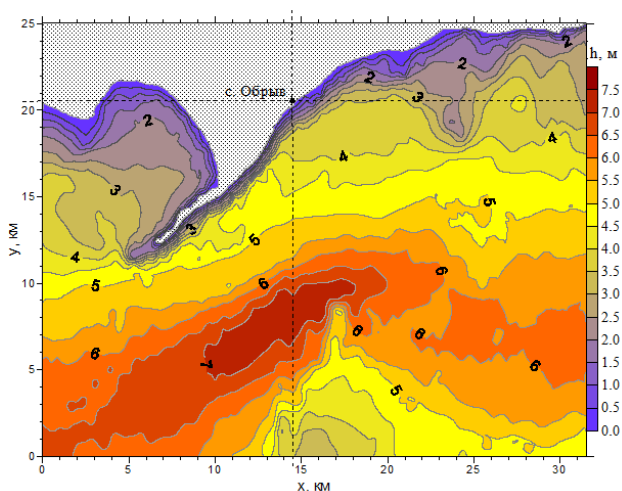


Рис.1 Модельний рельєф дна (м) в районі Кривої коси. Ізобати проведені через 0,5м.

Була виконана серія з 20-ти чисельних експериментів за розрахунком хвилевих характеристик для різних швидкостей і напрямів вітру. У кожному експерименті глибина моря в

3-ій області коригувалася шляхом додавання до неї максимальних підйомів рівня моря.

Результати розрахунків хвилевих полів в районі Кривої коси показують, що залежність інтенсивності вітрового хвилювання від напрямів вітру та ж, що і для штормових нагонів, тобто хвиленебезпечні напрями вітру в порядку їх значущості наступні: південний захід, південь, захід, південний схід. Модельні поля хвилювання для східного вітру слід сприймати з урахуванням вищевикладених вище зауважень, що стосуються ефектів обміління і осушення дна. Результати моделювання дають основу припускати, що при східних вітрах виникають згони, що перешкоджають виникненню інтенсивного хвилювання в досліджуваному районі.

Проаналізуємо основні особливості модельних полів хвилювання в районі Кривої коси. На рис. 2 приведені просторові розподіли висот хвиль 1% -ої забезпеченості ($h_{1\%}$) і середнього напрямку вітрового хвилювання ($\bar{\theta}$) для усіх 20-ти варіантів розрахунків. А на рис.3 амплітуда швидкості придонних орбітальних рухів.

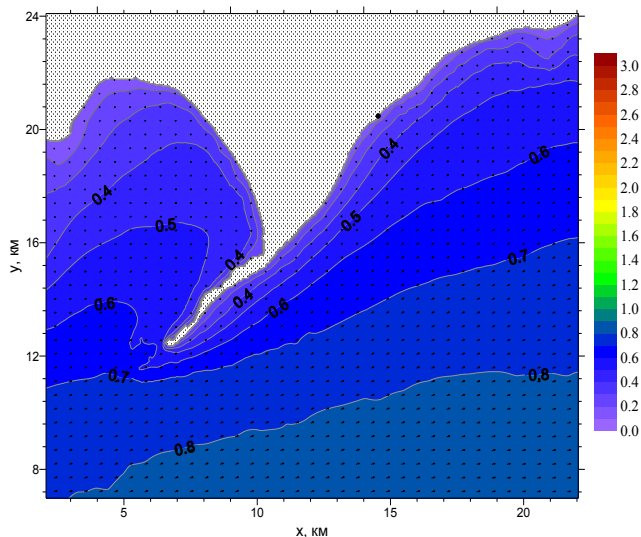


Рис.2 Висота хвиль 1% -ої забезпеченості (м) і середній напрям хвилювання в районі Кривої коси при західному вітрі 8 м/с.

Як видно, розрахунковий нагін призводить до збільшення висот хвиль та із зменшенням глибин стає все більш значимим. Так якщо в районі улоговини висоти хвиль збільшуються на 0,25-0,3 м ($\sim 15\%$), то у береговій зоні, що примикає до Кривої коси, збільшення висот хвиль досягає 0,7-0,9 м ($\sim 75-90\%$).

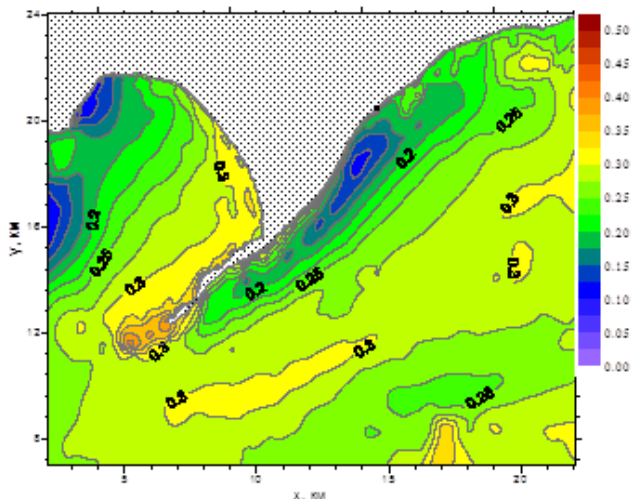


Рис.3 Амплітуда швидкості придонних орбітальних рухів (м/с) в районі Кривої коси при західному вітрі 20,3 м/с.

Висновки

Отриманий результат демонструє важливість розрахунку штормових нагонів при моделюванні вітрового хвилювання в мілководних районах. Проведені чисельні експерименти показують поєднання сильних штормових нагонів інтенсивних вітрових хвиль, що виникають на їх фоні, може призводити до виникнення особливо небезпечних явищ у береговій зоні с. Обрив.

Список використаних джерел

1. Luettich, R.A. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL / R.A. Luettich, J.J. Westerink, N.W. Scheffner.- Vicksburg, Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, MS.- 1992.- 137p.
2. Luettich R.A. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC / R.A. Luettich, J.J. Westerink - University of Notre Dame.-2004.-74 p
3. Kerr P.C. Surge Generation Mechanisms in the Lower Mississippi River and Discharge Dependency./ P.C. Kerr, J.J. Westerink, J.C. Dietrich, R.C. Martyr // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.- 2013, 139(4). - P. 326-335.
4. Booij. N. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and

validation. / N. Booij., R.C. Ris, L.H. Holthuijsen // J. Geophys. Res.- 1999, 104(C4).- P. 7649-7666.

5. Holthuijsen L.H. Waves in oceanic and coastal waters. / L.H. Holthuijsen. - Cambridge University Press: Cambridge.-2007. - 387p.

References

1. LUETTICH R.A., WESTERINK J.J., SCHEFFNER N.W. (1992) ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Vicksburg: Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, MS. 137p.
2. LUETTICH R.A., WESTERINK J.J. (2004) Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC. Notre Dame: University of Notre Dame. 74 p.
3. KERR P.C., WESTERINK J.J., DIETRICH J.C., MARTYR R.C. (2013) Surge Generation Mechanisms in the Lower Mississippi River and Discharge Dependency. // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, - ,139(4).- P. 326-335.
4. BOOIJ. N., RIS. R.C., HOLTHUIJSEN L.H (1999). A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. // *J. Geophys. Res.*- 104(C4).- P. 7649-7666.
5. HOLTHUIJSEN L.H. (2007) Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge: University Press Cambridge XVI. 387p.

Надійшла до редколегії 24.03.15