

УДК 532.593

Vitalii V. Yakovlev, DSci, Professor of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine
e-mail: vvyak@ukr.net

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

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

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

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

Lidiia M. Tereshchenko, PhD, Associate professor of the Department of 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

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

Viktoriia V. Bondar, Leader engineer of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine

Institute of Hydromechanics of the NASU, Kyiv, Ukraine

INFLUENCE OF WATER AREA DEPTH ON WIND WAVES

***Abstract.** A semi-empirical technique for calculating the parameters of wind waves at variable sea depths along the wind acceleration has been developed and presented. This technique allows you to determine the average values of wind wave heights, their length and period depending on the wind velocity, taking into account and without taking into account the heaping of water by wind. Within the framework of the described method, the calculations of wind wave parameters suitable for isobaths $d = 20$ m were performed for a specific study area of the Bistre (Novostambulske) branch of the Danube estuary, for the north-eastern and eastern wind directions. Numerical simulations were performed for the Black Sea in the location of the protection dam of the Maritime approach channel of the Danube-Black Sea deep-sea navigation. Numerical calculations of wind wave transformation in the water area near the protection dam for the most dangerous wind directions in stormy conditions were performed. For mathematical simulation, the maximum values of wind velocity and wave height were used, which were observed during the whole period of research of the Black Sea water area in the*

© В.В. Яковлев, В.А. Воскобійник, В.В. Хомицький, В.О. Ткаченко, О.А. Воскобойник, Л.М. Терещенко, А.В. Воскобійник, В.В. Бондар, 2020

region of the dam. Within the framework of refraction theory, wave transformation calculations have been performed for the most wave-hazardous wind acceleration directions, namely, the north-eastern and eastern wind directions. It is shown that taking into account the heaping of water by wind leads to an increase in the parameters of gravitational waves. The results of numerical simulations have shown that with the increase of wind acceleration exceeding the limit values, the parameters of the waves reach constant values. These values depend on the bathymetry of the seabed, wind velocity and direction. It was found that the increase in the deviation of the free surface of the sea from the undisturbed level significantly depends on the heaping of water by wind. It was found that the relative increase in the wave parameters is observed higher in the east wind direction than in the northeast wind direction in the study area of the Black Sea.

Key words: water area; wind wave; wave motion; numerical simulation; wave height and length; period; heaping of water by wind

**В.В. Яковлєв, В.А. Воскобійник, В.В. Хомицький, В.О. Ткаченко,
О.А. Воскобойник, Л.М. Терещенко, А.В. Воскобійник, В.В. Бондар**

Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

ВПЛИВ ГЛИБИНИ АКВАТОРІЇ НА ВІТРОВІ ХВИЛІ

Анотація. Розроблена та викладена напівемпірична методика розрахунку параметрів вітрових хвиль за змінними глибинами моря уздовж вітрового розгону. Ця методика дозволяє визначити середні значення висот вітрових хвиль, їх довжину і період в залежності від швидкості вітру з урахуванням і без урахування вітрового нагону. В рамках викладеної методики проведені розрахунки параметрів вітрових хвиль, що підходять до ізобат $d = 20$ м, для конкретної досліджуваної ділянки рукава Бистре (Новостамбульське) гирла Дунаю, для північно-східного і східного напрямів вітру. Чисельне моделювання проводилося для акваторії Чорного моря в місці розташування захисної огорожувальної дамби морського каналу глибоководного судового ходу Дунай – Чорне море. Проведені чисельні розрахунки трансформації вітрових хвиль в акваторії поблизу захисної огорожувальної дамби для найбільш небезпечних напрямків вітру в штормових умовах. Для математичного моделювання використовувались максимальні значення швидкості вітру та висоти хвилі, які спостерігались за весь період досліджень акваторії Чорного моря в районі огорожувальної дамби. В рамках рефракційної теорії виконані розрахунки трансформації хвиль для найбільш хвиленебезпечних напрямків розгону вітру, а саме, північно-східного та східного напрямків вітру. Показано, що врахування вітрового нагону призводить до збільшення параметрів гравітаційних хвиль. Результати чисельного моделювання показали, що зі збільшенням вітрового розгону, що перевищує граничні значення, параметри хвиль виходять на незмінні значення. Ці значення залежать від батиметрії дна моря, швидкості і напрямку вітру. Виявлено, що збільшення відхилення вільної поверхні моря від незбуреного рівня істотно залежить від вітрового нагону. Встановлено, що відносне збільшення параметрів хвилювання спостерігається вище за східним напрямком вітру, ніж за північно-східним напрямком вітру у досліджуваному районі Чорного моря.

Ключові слова: акваторія; вітрова хвиля; хвильовий рух; чисельне моделювання; висота і довжина хвилі; період; вітровий нагін

Вступ

Вітрове хвилювання істотно впливає на діяльність морського транспорту, рибної промисловості, гідротехнічне будівництво та інше. Для проектування та експлуатації таких споруд і конструкцій важливі надійні дані про фактичний та очікуваний стан поверхні морів і океанів. Освоєння природних ресурсів шельфових зон і вирішення наукових завдань, пов'язаних з вивченням взаємодії океану і атмосфери, збільшує вимоги до даних про морське хвилювання. Все це постійно стимулює створення надійних методів розрахунку і прогнозу елементів вітрового хвилювання.

У задачах розрахунку хвильових полів в прибережних акваторіях в останні роки загальноприйнятим став підхід з використанням моделі WAVEWATCH [1–3] для розрахунку генерації хвиль вітром в глибоководних акваторіях. Але для розрахунків у шельфовій зоні і в прибережних водах використовують модель SWAN [4–6]. Поблизу берегів в зонах істотної мінливості донного рельєфу і за наявності гідротехнічних споруд використовуються деталізовані моделі, які добре описують ефекти дифракції хвиль, взаємодії хвиль з донною неоднорідністю і течіями в лінійному і нелінійному наближенні [7–11]. Серед цих моделей в практиці проектування гідротехнічних об'єктів останнім часом все частіше застосовуються моделі, засновані на квазітривимірних рівняннях трансформації хвиль, а також моделі, засновані на двовимірних рівняннях Бусінеска. Ці моделі вимагають значних обчислювальних ресурсів, але в той же час дозволяють враховувати також вплив нелінійних ефектів [12–14].

Зазначені вище моделі є досить складними в застосуванні до конкретних умов і вимагають дуже великих витрат часу на підготовку і аналіз вихідних даних. Тому дуже актуальними є більш спрощені підходи, засновані на розрахунку середніх елементів хвиль певної забезпеченості. Ці елементи, обчислені за різними зв'язками для однакових умов хвилеутворення, відрізняються один від одного в кілька разів, що свідчить про складність багатьох факторів, що впливають на процес розвитку хвилювання. Серед цих факторів треба виокремити такі, як змінне поле вітру, складність конфігурації берегової лінії і інші. З цієї причини для побудови основних залежностей необхідно підбирати «ідеальні» умови. Під «ідеальними» зазвичай приймають такі умови, при яких вітер певної тривалості діє з постійною швидкістю над поверхнею моря в напрямку, перпендикулярному до підвітряної берегової лінії. При цьому глибина моря d повинна бути постійною або не впливати на розвиток хвиль. Нижче ми наведемо методику розрахунку середніх елементів вітрових хвиль з урахуванням змінної глибини моря на шляху розгону. Чисельне моделювання проводилося для акваторії Чорного моря в місці розташування захисної огорожувальної дамби морського каналу глибоководного судового ходу Дунай – Чорне море.

Мета роботи – розробка напівемпіричної методики розрахунку параметрів вітрових хвиль за змінними глибинами моря уздовж розгону, яка дозволить визначити середні значення висот вітрових хвиль, їх довжину і період в залежності від швидкості вітру з урахуванням і без урахування вітрового нагону.

Методика розрахунку

Під час інженерних розрахунків широко використовують емпіричні залежності між середньою висотою хвилі \bar{h} і середнім періодом вітрової хвилі \bar{T} від швидкості вітру V_w (зазвичай на висоті $z = 10$ м над незбуреним рівнем моря), відстані (розгоном хвиль) L від підвітряного берега до розрахункової точки, тривалості дії вітру t і глибини моря d . Такі залежності за «ідеальних» умов для середніх значень висоти і періоду хвилі мають вигляд

$$\bar{h} = F_1(V_w, L, t, d), \quad \bar{T} = F_2(V_w, L, t, d),$$

де F_1 і F_2 – деякі функції параметрів V_w, L, t і d .

На основі аналізу експериментальних даних в роботі [15] отримані наступні апроксимуючі залежності для розрахунку середньої висоти хвилі

$$\bar{h} = h_0 \operatorname{th} \left[\frac{0.1(gd/V_w^2)^{0.8}}{gh_0/V_w^2} \right], \quad (1)$$

де h_0 визначається з урахуванням швидкості вітру V_w , його розгону L або тривалості дії t за формулами

$$h_0(L) = 0.16 \frac{V_w^2}{g} \left\{ 1 - \left[1 + 6.0 \cdot 10^{-3} (gL/V_w^2)^{0.5} \right]^2 \right\},$$
$$h_0(t) = 0.16 \frac{V_w^2}{g} \left\{ 1 - \left[1 + 1.04 \cdot 10^{-3} (gt/V_w^2)^{0.635} \right]^2 \right\}.$$

За значеннями безрозмірних величин gL/V_w^2 і gt/V_w^2 треба визначити значення $h_0(L)$ і $h_0(t)$ та за меншими з них прийняти середню висоту хвиль згідно з рекомендаціями робіт [16, 17].

Середній період вітрової хвилі \bar{T} визначається за формулою [15]

$$\bar{T} = 6.2\pi \frac{V_w}{g} \left(g \bar{h} / V_w^2 \right)^{0.625}.$$

Середня довжина вітрової хвилі $\bar{\lambda}$ при відомому значенні \bar{T} є дійсним позитивним коренем дисперсійного рівняння [18]

$$\bar{\lambda} = \frac{g\bar{T}^2}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi d}{\bar{\lambda}}.$$

За відсутності відомостей про тривалість дії вітру допускається [16] для попередніх розрахунків приймати: для водосховищ і озер – $t = 6$ годин; для морів – $t = 12$ годин; для океанів – $t = 18$ годин. Значення граничного розгону L_{cp} для визначення параметрів вітрових хвиль треба приймати згідно з рекомендаціями роботи [16] по табл. 1.

Таблиця 1 – Значення граничного розгону хвиль

Швидкість вітру, V_w , м/с		20	25	30	40
Граничний розгін L_{cp} , км	На морях	800	600	300	100
	На океанах	1600	1200	600	200

За глибинами, змінними вздовж розгону, розрахунок параметрів вітрового хвилювання рекомендується проводити за такою методикою, яка узагальнює викладені в роботах [16, 17] підходи. Профіль дна вздовж лінії розгону в цьому випадку, починаючи від підвітряного боку, апроксимується кусково-постійними функціями. При цьому, весь шлях розгону розбивається на ділянки довжиною l_i та глибиною $d_i = |d_0 + d_{end}| / 2$, де d_0 та d_{end} – глибина початку і кінця кожної ділянки, які визначені таким чином, щоб виконувалася умова $|d_0 - d_{end}| \leq \varepsilon$. Далі для кінця першої (від підвітряного боку) ділянки визначається середня висота хвилі, відповідно до залежності (1). На другій ділянці з середньою глибиною d_2 розрахунок середньої висоти хвилі проводиться за наступним алгоритмом. Спочатку по залежності (1) визначається розгін Δl_1 такий, щоб отримати середнє значення висоти хвилі \bar{h}_1 за глибини d_2 . Далі за формулою (1) розраховується середня висота хвилі \bar{h}_2 на другій ділянці з глибиною d_2 і розгоном $l_2 + \Delta l_1$, де l_2 – довжина другої ділянки, причому $l_2 + \Delta l_1$ не повинні перевищувати значення L_{cp} . Середні висоти хвиль для всіх наступних ділянок визначаються за аналогічною схемою.

Якщо для якої-небудь ділянки шляху розгону з середньою глибиною d_{j+1} немає такого Δl_j , при якому досягається значення \bar{h}_j для глибини d_{j+1} , то методика стає некоректною. В цьому випадку необхідно покласти $\bar{T}_{j+1} = \bar{T}_j$, і значення середньої висоти хвилі \bar{h}_{j+1} на глибині d_{j+1} визначається як функція від середньої висоти хвилі \bar{h}_j на глибині d_j за формулою [18]

$$\bar{h}_{j+1} = \bar{h}_j \sqrt{\frac{\left[1 + \frac{4\pi d_j}{\lambda_j \operatorname{sh}(4\pi d_j / \lambda_j)}\right] \operatorname{th}(2\pi d_j / \lambda_j)}{\left[1 + \frac{4\pi d_{j+1}}{\lambda_{j+1} \operatorname{sh}(4\pi d_{j+1} / \lambda_{j+1})}\right] \operatorname{th}(2\pi d_{j+1} / \lambda_{j+1})}}. \quad (2)$$

Висоту хвилі i %-ої забезпеченості $h_{i\%}$ слід визначати за формулою

$$h_{i\%} = k_i \bar{h}, \quad (3)$$

де k_i – коефіцієнти i %-ої забезпеченості – визначаються відповідно до рекомендацій [8].

Перше обвалення хвилі i % забезпеченості на глибині d_{br} визначається згідно з:

– критерієм Миша [19] – $h_{1\%br} / \lambda_{br} > 0.14 \operatorname{th}(2\pi d_{br} / \lambda_{br})$, при $d_{br} / \lambda_{br} > 0.1$,

– критерієм Мунка [20] – $h_{i\%dr} \geq d_{br} / 1.28$, при $d_{br} / \lambda_{br} < 0.1$.

Якщо після обвалення висота хвиль i %-ої забезпеченості, обчисленої по (1)–(3), більше $d/1.28$, то вважаємо $h_{i\%} = d/1.28$.

Вітровий нагін S для відкритого узбережжя для глибин змінних вздовж розгону можна визначити аналогічно викладеній вище методиці розрахунку параметрів вітрових хвиль з трансцендентного рівняння

$$gS^2 = 3.0 \cdot 10^{-6} LV_w^2 \ln[d/(d + S)], \quad (4)$$

яке представлено в роботі [20] для кожної окремої ділянки постійної глибини d_j . Таким чином, всі параметри вітрових хвиль, розраховані за викладеною вище методикою, будуть визначатися над збуреним рівнем моря $z = S$.

Результати розрахунків

В рамках викладеної моделі проведено розрахунки параметрів вітрового хвилювання за підходом до ізобат $d = 20$ м досліджуваної ділянки рукава Бистре (Новостамбульське) гирла річки Дунай, для напрямків розгонів вітру північний схід (ПнС) і схід (С) та превалюючих швидкостей (V_w) [21–23].

Результати розрахунків наведені на рис. 1 і в таблиці 2, де $L, d, S, \eta, \bar{h}, \bar{\lambda}, \bar{T}$ – відповідно розгін вітру (м), глибина моря чи океану (м), вітровий нагін (м), відхилення вільної поверхні моря від рівня $z = 0$ і $z = S$ (м), середня висота (м), середня довжина (м) і середній період вітрової хвилі (с) з урахуванням (штрихова лінія) і без урахування (суцільна лінія) вітрового нагону. На рис. 1 крива 1 відповідає відхиленням вільної поверхні моря ($\eta = S + \bar{h}/2$) з урахуванням вітрового нагону, крива 2 – відхиленням вільної поверхні моря ($\eta = \bar{h}/2$) без урахування вітрового нагону ($S = 0$) і крива 3 – з урахуванням вітрового нагону (S).

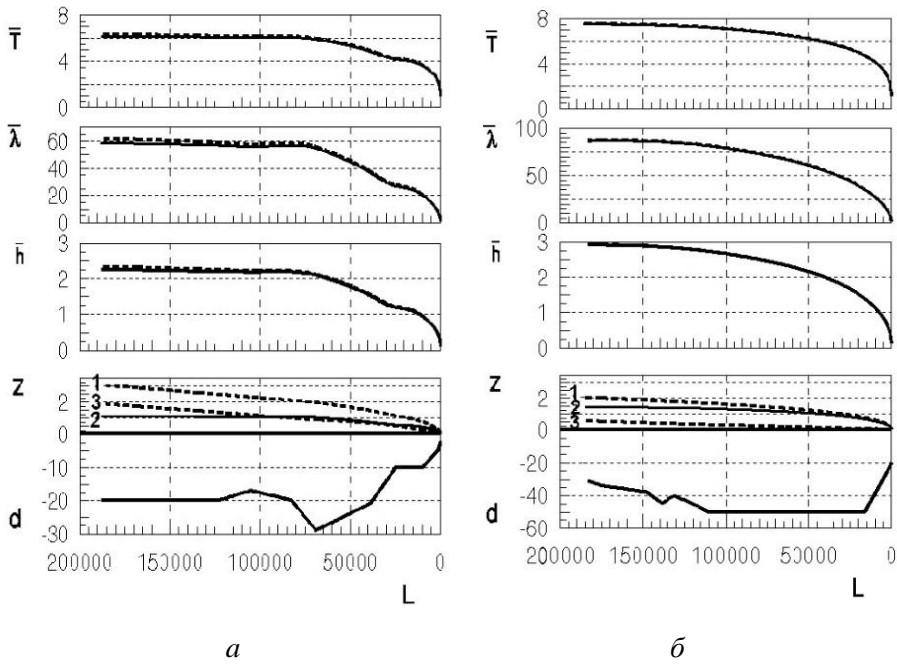


Рис. 1 – Середні значення параметрів вітрових хвиль і відхилення вільної поверхні моря з урахуванням і без урахування вітрового нагону за північно-східним (а) та східним (б) напрямками вітру

Результати розрахунків, представлені на рис. 1, показують, що зі збільшенням вітрового розгону, що перевищує граничні значення, параметри хвиль виходять на стабільні незмінні значення. Ці значення залежать від батиметрії дна моря, швидкості і напрямку вітру, згідно із залежностями (1) і (2). Так, на рис. 1а постійні значення параметрів хвиль досягаються для розгонів $L > 75\,000$ м, а на рис. 1б ці значення досягаються для $L > 150\,000$ м. Результати досліджень показують, що збільшення відхилення вільної поверхні моря від незбуреного рівня істотно залежить від вітрового нагону. Так, на рис. 1 відхилення вільної поверхні моря значно перевищують рівні моря в незбуреному стані. При цьому зі збільшенням розгону вітру різниця стає більше. На рис. 1б відхилення вільної поверхні моря менше, ніж на рис. 1а. Це обумовлено тим, що в розрахунках параметрів хвиль для північно-східного і східного напрямків швидкості вітру були різні (більше для напрямлення ПнС, ніж для С, див., таблиця 2), а згідно з рівнянням (4) швидкість вітру знаходиться в квадратичній залежності.

Таблиця 2 – Параметри вітрових хвиль в кінці вітрового розгону

Румб		$V_w, \text{ м/с}$	$d, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$\eta, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$T, \text{ с}$
ПнС	без нагону	24	20	0	1,125	2,25	58,4	6,21
	з нагоном	24	20	1,89	3,055	2,33	61,4	6,34
С	без нагону	21	28	0	1,49	2,98	89,81	7,5
	з нагоном	21	28	0,75	2,245	2,89	89,9	7,51

Результати розрахунків показують, що з урахуванням нагону параметри вітрового хвилювання в кінці вітрового розгону збільшуються більш ніж на 10% з підходом до ізобат $d = 20$ м досліджуваної ділянки рукава Бистре гирла річки Дунай. При цьому відносне збільшення параметрів хвилювання спостерігається вище за східним напрямком вітру, ніж за північно-східним напрямком (див., таблиця 2).

Висновки

1. Розроблена та викладена напівемпірична методика розрахунку параметрів вітрових хвиль за змінними глибинами моря уздовж розгону, яка дозволяє визначити середні значення висот вітрових хвиль, їх довжину і період в залежності від швидкості вітру з урахуванням і без урахування вітрового нагону.

2. В рамках викладеної методики проведені розрахунки параметрів вітрових хвиль, що підходять до ізобат $d = 20$ м, досліджуваної ділянки рукава Бистре (Новостамбульське) гирла річки Дунай, за превалюючих швидкостей вітру та напрямків розгонів вітру північний схід і схід. Проведено розрахунки параметрів хвиль і відхилення вільної поверхні моря з урахуванням вітрового нагону.

3. Виявлено, що зі збільшенням вітрового розгону, що перевищує граничні значення, параметри хвиль виходять на незмінні значення. Ці значення залежать від батиметрії дна моря, швидкості і напрямку вітру.

3. Показано, що врахування вітрового нагону призводить до збільшення параметрів хвиль. Встановлено, що відносне збільшення параметрів хвилювання спостерігається вище за східним напрямком вітру, ніж за північно-східним напрямком вітру. Виявлено, що відхилення вільної поверхні моря значно перевищують рівні моря в незбуреному стані і збільшення відхилення вільної поверхні моря від незбуреного рівня істотно залежить від вітрового нагону.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. WAVEWATCH III R version 6.07. User manual and system documentation. – College Park, MD, USA, 2019. – 465 p.
2. Ferrari F. Optimized wind and wave energy resource assessment and offshore exploitability in the Mediterranean Sea / F. Ferrari, G. Besio, F. Cassola, A. Mazzino // Energy. – 2020. – Vol. 190, No1. – P. 116447-1-15. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116447>
3. Sun Z. A Comparison of WAVEWATCH III grid models for a typical reef lagoon / Z. Sun, X. Liu, Z. Cai, J.-G. Li [et al.] // Proc. 29-th Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. – Honolulu, Hawaii, USA, 2019. – P. 1-7.
4. SWAN Cycle III version 41.20. User Manual. – Delft University of Technology, Netherlands, 2018. – 121 p.
5. Amarouchea K. Evaluation of a high-resolution wave hindcast model SWAN for the West Mediterranean basin / K. Amarouchea, A. Akpinarb, N.E.I. Bacharic, R.E. Cakmakb [et al.] // Applied Ocean Res. – 2019. – Vol. 84. – P. 225-241. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.01.014>
6. Lianga B. Characteristics of global waves based on the third-generation wave model SWAN / B. Lianga, H. Gaoa, Z. Shaoa // Marine Structures. – 2019. – Vol. 64. – P. 35-53. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.10.011>

7. Dingemans M. Water wave propagation over uneven bottoms. / M. Dingemans – NY: World Scientific, 1997. – 471 p.
8. Holthuijsen L.H. Waves in oceanic and coastal water. / L.H. Holthuijsen – Cambridge Press, 2007. – 312 p.
9. Яковлев В.В. Двумерные модели плановой трансформации волн в жидкости переменной глубины / В.В. Яковлев // Прикладная гидромеханика. – 2000. – Т. 2 (74), №4. – С. 119-125.
10. Бондарь В.В. Совместное воздействие волн и течений на круглоцилиндрические преграды больших поперечных размеров / В.В. Бондарь, В.А. Ткаченко, В.В. Яковлев // Прикладная гидромеханика. – 2014. – Т. 16 (88), №3. – С. 14-22.
11. Бондарь В.В. Совместное воздействие волн и течений на осесимметрические преграды больших поперечных размеров / В.В. Бондарь, В.А. Ткаченко, В.В. Яковлев // Прикладная гидромеханика. – 2015. – Т. 17 (90), №2. – С. 3-8.
12. Muliati Y. Wind wave modeling in natura sea: A comparison among SWAN, SEAFINE and ERA-INTERIM / Y. Muliati, R.L. Tawekal, A. Wurjanto, J. Kelvin [et al.] // Intern. J. Geomate. – 2019. – Vol. 16, Issue 54. – P. 176-184. <https://doi.org/10.21660/2019.54.93272>
13. Yin C. The Characteristics of storm wave behavior and its effect on cage culture using the ADCIRC+SWAN model in Houshui Bay, China / C. Yin, H. Huang, D. Wang, Y. Liu [et al.] // Oceanic and Coastal Sea Res. – 2020. – Vol. 19, No 2. – P. 307-319. <https://doi.org/10.1007/s11802-020-3941-3>
14. Bjorkqvist J.-V. WAM, SWAN and WAVEWATCH III in the Finnish archipelago – the effect of spectral performance on bulk wave parameters / J.-V. Bjorkqvist, O. Vaha-Piikkio, V. Alari, A. Kuznetsova [et al.] // J. Operational Oceanography. – 2020. – Vol. 13, No 1. – P. 1633236-1-16. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2019.1633236>
15. Крылов Ю.М. Ветровые волны и их воздействие на сооружения. / Ю.М. Крылов, С.С. Стрекалов, В.Ф. Цыплухов – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 259 с.
16. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М.: Госстрой СССР, 1983. – 38 с.
17. Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновых, ледовых и от судов). – Л.: ВНИИГ, 1977. – 316 с.
18. Ле Меоте Б. Введение в гидродинамику и теорию волн на воде. / Б. Ле Меоте – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 368 с.
19. Miche M. Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés a l'action de la houle. / M. Miche // Ann. Ponts Chaussées. – 1944. – 121. – P. 285-318.
20. Селезов И.Т. Трансформация волн в прибрежной зоне шельфа. / И.Т. Селезов, В.Н. Сидорчук, В.В. Яковлев. – Киев: Наукова думка, 1983. – 208 с.
21. Divinskii B. Maximum waves in the Black Sea / B. Divinskii, V. Fomin, R. Kosyan, D. Lazorenko // Proc. 14th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22-26 Oct 2019). – Mugla, Turkey: MEDCOAST Foundation, 2019. – Vol. 2. – P. 799-810.
22. Divinsky B.V. Extreme wind waves in the Black Sea / B.V. Divinsky, V.V. Fomin, R.D. Kosyan, Y.D. Ratner // Oceanologia. – 2019. – Vol. 62, No1. – P. 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
23. Хомицкий В.В. Удосконалення захисної огорожувальної дамби Морського підхідного каналу Дунай-Чорне море / В.В. Хомицкий, Б.М. Островерх, В.О. Ткаченко, В.А. Воскобийник, Л.М. Терещенко // Екологічна безпека та природокористування. – 2020. – Т. 35, № 3. – С. 57-77. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.57-77>

Стаття надійшла до редакції 17.04.2020 і прийнята до друку після рецензування 24.07.2020

REFERENCES

1. WAVEWATCH III R version 6.07. User manual and system documentation. (2019). College Park, MD, USA.
2. Ferrari, F., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2020). Optimized wind and wave energy resource assessment and offshore exploitability in the Mediterranean Sea. *Energy*, 190 (1), 116447-1-15. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116447>
3. Sun, Z., Liu, X., Cai, Z., Li, J. et al. (2019). A Comparison of WAVEWATCH III grid models for a typical reef lagoon. In *29-th Intern. Ocean and Polar Engineering Conf.* (pp. 1-7). Honolulu, Hawaii, USA.
4. SWAN Cycle III version 41.20. User Manual. (2018). Netherlands: Delft University of Technology.
5. Amarouchea, K., Akpinarb, A., Bacharic, N.E.I., Cakmakb, R.E. et al. (2019). Evaluation of a high-resolution wave hindcast model SWAN for the West Mediterranean basin. *Applied Ocean Res.*, 84, 225-241. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.01.014>
6. Lianga, B., Gaoa, H., & Shaoa, Z. (2019). Characteristics of global waves based on the third-generation wave model SWAN. *Marine Structures*, 64, 35-53. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.10.011>
7. Dingemans, M. (1997). *Water wave propagation over uneven bottoms*. NY: World Scientific.
8. Holthuijsen, L.H. (2007). *Waves in oceanic and coastal water*. Cambridge Press.
9. Yakovlev, V.V. (2000). Dvumernye modeli planovoj transformacii voln v zidkosti peremennoj glubiny [Two-dimensional models of the planned transformation of waves in a fluid of variable depth]. *Prikladnaja gidromekhanika*, 2(74) (4), 119-125. (in Russian)
10. Bondar, V.V., Tkachenko, V.A., & Yakovlev, V.V. (2014). Sovmestnoe vozdeystvie voln i techenij na kruglocilindricheskie pregrady bolshikh poperechnykh razmerov [Joint action of waves and currents on circular cylindrical obstacles of large transverse dimensions]. *Prikladnaja gidromekhanika*, 16(88) (3), 14-22. (in Russian)
11. Bondar, V.V., Tkachenko, V.A., & Yakovlev, V.V. (2015). Sovmestnoe vozdeystvie voln i techenij na osesimmetrichnye pregrady bolshikh poperechnykh razmerov [Joint action of waves and currents on axisymmetric obstacles of large transverse dimensions]. *Prikladnaja gidromekhanika*, 17(90) (2), 3-8. (in Russian)
12. Muliati, Y., Tawekal, R.L., Wurjanto, A., Kelvin, J. et al. (2019). Wind wave modeling in natura sea: A comparison among SWAN, SEAFINE and ERA-INTERIM. *Intern. J. Geomate*, 16 (54), 176-184. <https://doi.org/10.21660/2019.54.93272>
13. Yin, C., Huang, H., Wang, D., Liu, Y. et al. (2020). The Characteristics of storm wave behavior and its effect on cage culture using the ADCIRC+SWAN model in Houshui Bay, China. *Oceanic and Coastal Sea Res.*, 19 (2), 307-319. <https://doi.org/10.1007/s11802-020-3941-3>
14. Bjorkqvist, J.-V., Vaha-Piikkio, O., Alari, V., Kuznetsova, A. et al. (2020). WAM, SWAN and WAVEWATCH III in the Finnish archipelago – the effect of spectral performance on bulk wave parameters. *J. Operational Oceanography*, 13 (1), 1633236-1-16. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2019.1633236>
15. Krylov, Yu.M., Strelkov, S.S., & Cyplykhov, V.F. (1976). *Vetrovye volny i ikh vozdeystvie na sooruzeniya* [Wind waves and their impact on structures]. L.: Gidrometeoizdat. (in Russian)
16. SNiP 2.06.04-82*. (1983). Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzeniya (volnovye, ledovye i ot sydov). Moscow: Gosstroj SSSR. (in Russian)
17. Rukovodstvo po opredeleniju nagryzok i vozdeystvij na gidrotekhnicheskie sooruzeniya (volnovykh, ledovykh i ot sydov). (1977). L.: VNIIG. (in Russian)
18. Le Meete, B. (1974). *Vvedenie v gidrodinamiku i teoriju voln na vode* [Introduction to hydrodynamics and water wave theory]. L.: Gidrometeoizdat. (in Russian)
19. Miche, M. (1944). *Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés a l'action de la houle*. Ann. Ponts Chaussées, 121, 285-318.

20. Selezov, I.T., Sidorchyk, V.N., & Yakovlev, V.V. (1983). *Transformacija voln v pribreznoj zone shelfa [Wave transformation in the coastal shelf zone]*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
21. Divinskii, B., Fomin, V., Kosyan, R., & Lazorenko, D. (2019). Maximum waves in the Black Sea. In *Proc. 14th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST* (Marmaris, Turkey, 22-26 Oct 2019). (vol. 2, pp. 799-810). Mugla, Turkey: MEDCOAST Foundation.
22. Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D., & Ratner, Y.D. (2019). Extreme wind waves in the Black Sea. *Oceanologia*, 62 (1), 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
23. Khomicky, V.V., Ostroverkh, B.M., Tkachenko, V.O., Voskoboinick, V.A., & Tereshchenko, L.M. (2020). Improvement of protection dam of the Marine approach channel Danube-Black Sea. *Environmental safety and natural resources*, 35 (3), 57-77. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.57-77>

The article was received 17.04.2020 and was accepted after revision 24.07.2020

Яковлев Віталій Васильович

доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу Гідродинаміки хвильових та руслових течій Інституту гідромеханіки НАН України
Адреса робоча: 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4
e-mail: vvyak@ukr.net

Воскобійник Володимир Анатолійович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу Гідродинаміки хвильових та руслових течій 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

Хоміцький Віталій Володимирович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу Гідродинаміки хвильових та руслових течій 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

Ткаченко Віктор Олексійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу Гідродинаміки хвильових та руслових течій Інституту гідромеханіки НАН України
Адреса робоча: 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4
e-mail: tkachenkob@gmail.com

Воскобойник Олександр Анатолійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу Технічної гідромеханіки Інституту гідромеханіки НАН України
Адреса робоча: 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4
ORCID ID: 0000-0001-8114-4433 **e-mail:** alexandr.vsk@gmail.com

Терещенко Лідія Миколаївна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу Гідродинаміки хвильових та руслових течій 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

Воскобійник Андрій Володимирович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу Гідробіоніки та керування примезовим шаром Інституту гідромеханіки НАН України

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

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

Бондар Вікторія Віталіївна

провідний інженер відділу Гідродинаміки хвильових та руслових течій Інституту гідромеханіки НАН України

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