

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕМПІРИЧНИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ НА ПРИКЛАДІ МАЛОГО ГІРСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Світлана Величко¹, Олена Дупляк²

Київський національний університет будівництва і архітектури,
31, проспект Повітряних Сил, Київ, 03037, Україна

¹ канд. тех. наук., velychko.sv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-8848-289X

² канд. тех. наук., dupliak.ov@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3500-5106

DOI: 10.32347/2524-0021.2026.53.4-11

Анотація. Прогнозування параметрів вітрових хвиль у водосховищах є критично важливим компонентом проектування земляних гребель, оскільки дія хвиль безпосередньо впливає на стійкість укосу, його висоту та безпеку споруди. В Україні практика розрахунку параметрів хвилі базується на емпіричних залежностях, розроблених кілька десятиліть тому. Це дослідження має на меті оцінити та порівняти емпіричні методи визначення висоти, періоду та довжини хвилі, що діють в Україні та за кордоном СЕМ, SPM, ASABE та STN. Аналіз було проведено для сухої гірської ємності на річці Іршава (Україна) з урахуванням вітрових умов та геометрії водосховища, характерних для конкретної ділянки. Результати показують, що різні методологічні підходи призводять до значних варіацій у прогнозованих параметрах хвиль. Найнижча висота хвилі 1 % забезпеченості була отримана за допомогою методу СЕМ, тоді як найвище значення було отримано методом ASABE. Чинний український стандарт дав проміжне значення 0,84 м, що близько відповідає результатам ASABE. Було виявлено, що методи, розроблені для внутрішніх водосховищ (СНіП, ASABE) прогнозують вищу висоту хвиль порівняно з методами, що базуються на відкритих прибережних системах (СЕМ, SPM). Ці відмінності впливають на розрахований накат та нагон хвилі, що є важливим для визначення висоти гребня греблі. Дослідження підтверджує, що, незважаючи на все ширше використання числових хвильових моделей, емпіричні методи залишаються практичними та надійними інструментами для інженерного проектування, особливо для малих та середніх водосховищ.

Ключові слова: вітрові хвилі, висота хвилі, довжина хвилі, період хвилі, водосховище.

ВСТУП

Прогнозування утворення вітрових хвиль у водосховищі є ключовим компонентом розрахунку висоти напірної ґрунтової споруди, оскільки вітрові хвилі можуть спричинити руйнування верхового укосу та перелив через гребінь греблі.

На сьогоднішній день при проектуванні напірних ґрунтових споруд в Україні використовується СНіП 2.06.04-82 «Навантаження та впливи на гідротехнічні споруди». Метод прогнозування висоти, довжини та періоду хвилі базується на емпіричних співвідношеннях, отриманих з лабораторних

експериментів та польових спостережень, проведених кілька десятиліть тому. Середня висота хвилі визначається для повністю розвинутого хвилювання (час дії вітру приймається 6 годин) як функція швидкості вітру та довжини розгону хвилі в глибоководній зоні [1].

Традиційна інженерна практика як в Україні так і за кордоном спирається на емпіричні методи [2, 3]. Напівемпіричний підхід Sverdrup–Munk–Bretschneider (SMB) широко використовуються в інструкціях з гідротехніки та посібниках з проектування [4]. В методиці оцінюється значуща висота хвилі (середнє значення найвищої третини

хвиль, що виникають за певний період) та період хвилі на основі безрозмірних співвідношень між швидкістю вітру, довжиною розгону хвилі та розвитком хвилі. Метод SMB розрізняє зростання хвиль, обмежене довжиною розгону, та зростання хвиль, обмежене тривалістю дії вітру, що особливо актуально для водосховищ [5].

Сучасні експериментальні дослідження підтвердили, що зростання хвиль у внутрішніх водосховищах зазвичай обмежене довжиною розгону хвилі та сильно залежить від глибини води та тривалості вітру. Польові вимірювання на малих водосховищах показали, що емпіричні формули на основі SMB часто забезпечують найбільшу відповідність з вимірними параметрами хвиль, коли швидкість вітру та довжина хвилі належним чином визначені [6]. Для невеликих зрошувальних ставків (800 м x 400 м) на основі експериментальних досліджень розроблена модель ASABE Американським товариством сільськогосподарських та біологічних інженерів для водосховищ США [7].

Методика STN (Словаччина) або CSN (Чеська Республіка) базуються на загальнозживаних принципах теорій регулярних та нерегулярних хвиль з деякими модифікаціями, внесеними після досліджень в умовах обмеженого пробігу хвиль на водосховищах гребель загального центральноєвропейського розміру [6, 8]

Coastal Engineering Manual (CEM) та Shore Protection Manual (SPM) вводять додаткові вдосконалення, включаючи використання коригувань швидкості та тривалості вітру. Ці модифікації вдосконалюють представлення фізичних процесів утворення хвилі за різних атмосферних умов. Даний метод прогнозування висоти хвилі в затоці Бандирма виявився найбільш точним у порівнянні з результатами спостережень [4]. В той же час вітрові хвилі у водосховищах суттєво відрізняються від хвиль берегової зони, оскільки більшість водосховищ являють собою басейни з обмеженим пробігом хвиль, де розвиток хвиль в першу чергу контролюється швидкістю вітру, ефективною довжиною пробігу хвиль та глибиною води.

Для визначення висоти хвилі в великих водосховищах зі складною береговою лінією використовуються числові хвильові моделі. Чисельне моделювання, проведене для великих водосховищ, таких як водосховище Ілья-Солтейра в Бразилії, продемонструвало, що прогнози висоти хвиль залежать від параметрів вітрового впливу, геометрії басейну та конфігурації берегової лінії, що враховується в спектральних хвильових моделях [9]. Спостереження за водосховищем Три ущелини виявили чіткі просторові та часові варіації висоти хвиль, що не можливо врахувати за допомогою спрощених емпіричних методів в межах витягнутих або нерівних водосховищ [8]. Крім того, надходження енергії вітру до поверхні води та подальше зростання хвиль демонструють нелінійну поведінку, тобто енергія хвиль швидко зростає, коли швидкість вітру перевищує певні порогові значення [9].

Отже, сучасна практика проектування все частіше поєднує емпіричні методи з числовим моделюванням хвиль та польовими вимірюваннями, щоб отримати більш надійні оцінки висоти хвиль та набігання хвиль у водосховищах. В той же час емпіричні методи залишаються широко зживаними оскільки вони вимагають мінімальних вхідних даних і можуть забезпечити швидку оцінку розрахункових параметрів хвиль.

Для розрахунку хвиль використовуються спеціалізовані гідродинамічні та спектральні хвильові моделі. SWAN (Simulating Waves Nearshore) - один із найпоширеніших наукових пакетів з відкритим доступом для моделювання хвиль для прибережних і внутрішніх водойм [9, 12, 13]. MIKE 21 (Spectral Waves), комерційний програмний комплекс компанії DHI використовує спектральний підхід, що дозволяє отримати точні розрахунки висоти хвиль для інженерних задач [14-16]. TOMAWAC – спектральне хвильове моделювання, що може враховувати вплив вітру, течії, зміну рівня води [17, 18]. Для розрахунку хвилі програмним комплексам потрібні цифрова модель місцевості ложа водосховища, швидкість вітру та напрямки вітру, рівні води в водосховищі, гідравлічна шорсткість дна.

У нещодавніх наукових публікаціях досліджувалося використання штучного інтелекту для прогнозування висоти хвиль у режимі реального часу, що стає дедалі актуальнішим для експлуатації дамб під час екстремальних штормів [19].

Сучасні хвильові моделі мають кілька ключових переваг врахування геометрії водосховища, батиметрії, берегової лінії, островів, спектру хвиль, нелінійних взаємодій, просторового розподілу хвиль. Основні недоліки чисельних моделей це необхідність цифрової моделі водосховища, калібрування параметрів хвиль, велика обчислювальна складність.

Отже емпіричні методи залишаються основою проектування водосховищ завдяки своїй простоті та перевірці часом особливо для невеликих водойм з простою конфігурацією берега.

Актуальність теми

На сьогоднішній день для визначення хвилі 1% забезпеченості перед греблею використовується радянська нормативна база. Інженерне проектування земляних гребель, вимагає ретельної оцінки хвильових навантажень, щоб запобігти руйнуванню конструкції та забезпечити довговічність експлуатації. Визначення параметрів хвилі є ключовим фактором при розрахунку вітрового нагону, нагону та висоти греблі.

Мета досліджень

Дослідити емпіричні методи розрахунку висоти 1 % хвилі та порівняти результати з діючою в Україні методикою.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Аналіз висоти хвилі 1 % забезпеченості, періоду хвилі та довжини проведений на прикладі сухої гірської ємності на річці Іршава, Закарпатська область. Висота греблі 24,50 м, площа дзеркала 28,91 га. В районі проектування спостерігаються гірсько-до-

линні вітри, напрямок яких співпадає з поздовжньою віссю водосховища, розрахункова швидкість штормового вітру прийнята за даними метеостанції Студений 21,0 м/с. Довжина водосховища при НІП складає 977,0 м, максимальна ширина водосховища 605,0 м, ширина біля греблі – 280,0 м (рис. 1).

Розрахунок параметрів хвилі 1 % забезпеченості проводився методикою СНіП, Coastal Engineering Manual (CEM), Shore Protection Manual (SPM), ASABE та STN (Словаччина).

Методика СНіП визначає висоту хвилі 1 % забезпеченості за емпіричною формулою:

$$h_{1\%} = 2,1\bar{h}, \quad (1)$$

де \bar{h} – висота середньої хвилі, м; 2,1 – коефіцієнт переходу.

Висота середньої хвилі та період визначається за діаграмою [1]:

$$\frac{gL}{V_W^2}, \quad (2)$$

$$\frac{gt}{V_W}, \quad (3)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²; t – безперервна тривалість дії вітру для водосховища приймаємо рівній 21600 с; L – довжина розгону хвилі, приймається максимальне значення, м; V_W – розрахункова швидкість вітру, м/с, яка визначається за формулою:

$$V_W = k_{fl}k_lV_{10}; \quad (4)$$

$$k_{fl} = 0,675 + \frac{4,5}{V_{10}}, \quad (5)$$

де k_{fl} – коефіцієнт перерахунку швидкості; k_l – коефіцієнт приведення швидкості вітру на метеостанції до швидкості над водною поверхнею; V_{10} – швидкість вітра над поверхнею землі, м/с.

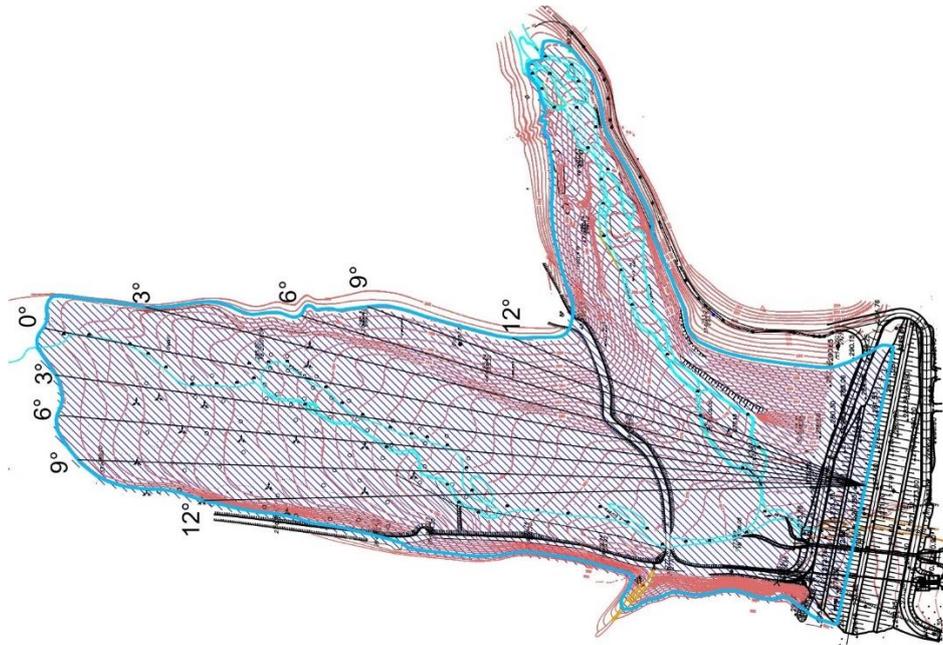


Рис. 1. Розрахункова схема сухої гірської ємності на р. Іршава
Fig. 1. Calculation scheme for dry retention reservoir on the Irshava River

Довжина хвилі визначається:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}, \quad (6)$$

де T – період хвилі, с.

Метод СЕМ визначає значущу висоту хвилі (H_s) – середня висота однієї третини найвищих хвиль; та периметр хвилі за емпіричними рівняннями [6]:

$$H_s = \frac{u_*^2}{g} 0,0413 \left(\frac{gF}{u_*^2}\right)^{0,5}; \quad (8)$$

$$T = \frac{u_*}{g} 0,751 \left(\frac{gF}{u_*^2}\right)^{1/3}; \quad (9)$$

$$u_* = \sqrt{C_d} u_{10}; \quad (10)$$

$$C_d = 0,001(1,1 + 0,035u_{10}), \quad (11)$$

де u_{10} – швидкість вітра над поверхнею землі, м/с; C_d – коефіцієнт опору; F – довжина розгону хвилі, яка визначається як найбільша довжина водосховища від його початку до греблі, м.

Висота хвилі 1 % забезпеченості визначається за формулою:

$$h_{1\%} = 1,67H_s. \quad (7)$$

Метод SPM визначає висоту хвилі 1 % забезпеченості за формулою (7). Значущу висоту хвилі та периметр хвилі визначаються за емпіричними рівняннями [8]:

$$H_s = \frac{u_A^2}{g} 0,0016 \left(\frac{gF}{u_A^2}\right)^{0,5}; \quad (12)$$

$$T = \frac{u_A}{g} 0,286 \left(\frac{gF}{u_A^2}\right)^{1/3}; \quad (13)$$

$$u_A = 0,71u_{10}^{1,23}; \quad (14)$$

$$F = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 F_i, \quad (15)$$

де F – ефективна довжина вітру очікується в напрямку $\pm 12^\circ$ від середнього променя, побудованого в напрямку основного впливу вітру, м; F_i – довжини променів, побудованих через $\varphi = 3^\circ$ від середнього променя, проведеного нормально по перерізу греблі (рис.1).

Метод ASABE визначає висоту хвилі 1 % забезпеченості за формулою (7). Значущу висоту хвилі та периметр хвилі визначаються за формулами [7]:

$$H_s = \frac{u_A^2}{g} 0,0025 \left(\frac{gF}{u_A^2}\right)^{0,44}; \quad (16)$$

$$T = \frac{u_A}{g} 0,4147 \left(\frac{gF}{u_A^2}\right)^{0,28}. \quad (17)$$

Ефективна довжина розгону хвилі визначається за формулою (15).

Метод STN визначає висоту хвилі 1 % забезпеченості за формулою [8]:

$$h_{1\%} = 1,4H_s. \quad (18)$$

Значущу висоту хвилі та периметр хвилі визначаються за формулами [8]:

$$H_s = 0,0026 \frac{u_{10}^{1,06} F^{0,47}}{g^{0,53}}; \quad (19)$$

$$T = 0,46 \frac{u_{10}^{0,44} F^{0,28}}{g^{0,72}}. \quad (20)$$

Довжина розгону хвилі (F) прийнята за рекомендаціями, наведеними в статті [8] як найбільша перпендикулярна відстань від кінця водосховища до греблі.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Результати розрахунків параметрів хвилі та порівняння з методикою, прийнятою в Україні наведено в табл. 1. Відмінності в методичних підходах призвели до розбіжностей в результатах розрахунку. Довжина розгону хвилі, визначена за формулою (15) на 15 % менше максимального розгону, визначеного як максимальна відстань від початку водосховища до греблі під прямим кутом. Середнє арифметичне значення висоти хвилі 1 % забезпеченості дорівнює 0,75 м, середня квадратична похибка висоти хвилі складає 0,12. Найнижче значення висоти хвилі було розраховано методом СЕМ — 0,60 м, найвище значення отримано методом ASABE — 0,93 м. Діюча методика в Україні надає значення 0,84 м, що ближче до значення розрахованого за методикою для малих водосховищ ASABE.

Емпіричні моделі розроблені для внутрішніх водосховищ (СНіП, ASABE) дають вищі значення висоти хвилі ніж моделі (СЕМ та SPM) розроблені для берегової лінії

морів та океанів. Розрахунки періоду хвилі та її довжини демонструють подібні тенденції як і висота хвилі: найменші значення періоду хвилі і довжини мають моделі СЕМ та SPM. Результати розрахунків періоду хвилі за моделями ASABE, STN та СНіП майже збігаються, відхилення складає менше 6,0 %.

Параметри хвилі впливають на визначення величини нагону та накату хвилі на верховий укос земляної греблі, відмітка якого визначається як перевищення нагону та накату хвилі над розрахунковим рівнем води в водосховищі з врахуванням сухого запасу. Для оцінки впливу параметрів хвилі на висоту греблі були розраховані сумарно нагон та накат хвилі за методикою діючою в Україні, викладеною в роботі [20]. Для розрахунків висоти нагону та накату хвилі прийняте кріплення верхового укосу кам'яним накидом, коефіцієнт шорсткості та проникності укосу 0,7 та 0,5 відповідно, закладання укосу 2,5. Висота нагону та накату хвилі визначена за методикою СНіП дорівнює 0,528 м. Найменше значення нагону та накату хвилі було отримано при використанні параметрів хвилі розрахованих за СЕМ – 0,354 м, найбільше значення, 0,583 м, за методикою ASABE. Відхилення сумарного накату та нагону від значення на основі параметрів хвилі СНіП складає від -17,5 см до +5,5 см. Найменші значення мають методи (СЕМ, SPM). Розбіжність між методами СНіП, ASABE та STN складає менше 5 %.

Табл. 1. Результати розрахунків параметрів хвилі
Table 1. Results of wave parameter calculations

Метод розрахунку	Довжина розгону хвилі, м	Середня висота/значуща висота хвилі, м	Період хвилі, с	Довжина хвилі, м	Висота хвилі 1% забезпеченості, м	Похибка відносно СНіП, %
СНіП	977,0	0,4	2,17	7,36	0,84	
СЕМ	977,0	0,36	1,5	3,51	0,60	-28,5
SPM	800,0	0,41	1,75	4,81	0,69	-17,9
ASABE	800,0	0,56	2,27	8,05	0,93	10,7
STN	977,0	0,48	2,31	8,26	0,67	-20,2

ВИСНОВКИ

Обрані емпіричні моделі розрахунку параметрів хвилі враховують подібні принципи механіки хвиль, але мають різні емпіричні коефіцієнти, які впливають на результати розрахунків.

На основі розрахунків можна зробити висновок, що методи СЕМ та SPM загалом надають нижчі оцінки параметрів хвиль (висота, період та довжина), і як наслідок менші значення висоти нахату та нагону хвилі на укос земляної греблі.

Методи СНіП та ASABE мають найменшу розбіжність між значеннями висоти хвилі 1 % забезпеченості. Висота нагону і нахату розрахована за методикою СНіП з використанням параметрів хвиль оцінених методами СНіП, ASABE та STN має розбіжність менше 5 %, що відповідає точності інженерних розрахунків.

Емпіричні методи розрахунку параметрів хвилі залишаються широко застосовуваними в інженерній практиці як в Україні так і за її межами завдяки простоті та надійності перевіреній часом, особливо для малих та середніх водосховищ.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Рогачко С. І.** Силова дія вітрових хвиль на гідротехнічні споруди: підручник для вузів / С. І. Рогачко. Одеса: ОНМУ, 2025. 184 с.
2. **Yakovlev V. V., Voskoboinick V. A., Khomicky V. V., Tkachenko V. O., Voskoboinyk O. A., Tereshchenko L. M., Voskoboinick A. V., Bondar V. V.** Influence of water area depth on wind waves // *Environmental Safety and Natural Resources*, 2020. 36(4), 77–88.
3. **Van der Meer J. W.** Rock armour slope stability under wave attack; the Van der Meer Formula revisited // *Journal of coastal and hydraulic structures*, 2021. 1, 8.
4. **Erkurtulmuş S. A., Peşman E.** Determination of Wave Parameters of Bandırma Bay Using Wave Prediction Methods // *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 2025. 14(1), 167-173.
5. **Eyhavand-Koohzadi A., Badiei P.** Experimental study on the growth and conversion of duration-and fetch-limited wind waves in water of finite depth // *Ocean Engineering*, 2022. 266, 113020.
6. **Kotaška S., Duchan D., Pelikán P., Špano M.** Spectral analysis of oscillatory wind wave

parameters in fetch-limited deep-water conditions at a small reservoir and their prediction: Case Study of the Hulín Reservoir in the Czech Republic // *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2024. 72(1), 95-112.

7. **Ozeren Y., Wren D. G.** Predicting Wind-driven Waves in Small Reservoirs // *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2009. 52(4), 1213-1221.
8. **Pelikán P., Hubačíková V., Kaletová T., Fuska J.** Comparative assessment of different modelling schemes and their applicability to inland small reservoirs: A Central Europe case study // *Sustainability*, 2020. 12(24), 10692.
9. **de Oliveira Mattosinho G., de Oliveira Ferreira F., de Freitas Maciel G.** Deterministic modeling and uncertainty quantification of wind waves in Ilha Solteira Reservoir, Brazil // *Water Science and Engineering*, 2026.
10. **Xie H., Lyu J., Bao Y., Yu Y., Li Y., Zheng X., He X.** Spatial and temporal variation of nearshore significant wave height in the Three Gorges Reservoir, China // *Ecological Indicators*, 2023. 151, 110343.
11. **Guseva S., Casper P., Sachs T., Spank U., Lorke A.** Energy flux paths in lakes and reservoirs // *Water*, 2021. 13(22), 3270.
12. **Aydoğan B., Ayat B.** Performance evaluation of SWAN ST6 physics forced by ERA5 wind fields for wave prediction in an enclosed basin // *Ocean Engineering*, 2021. 240, 109936.
13. **Khomicky V. V., Ostroverkh B. M., Tkachenko V. A., Voskoboinick V. A., Tereshchenko L. M.** Improvement of protection dam of the marine approach channel Danube-Black Sea // *Environmental Safety and Natural Resources*, 2020. 35(3), 57–77.
14. **Alturfi U. A. S., Shukur A. H. K.** Modeling Optimal Locations of Breakwaters to Mitigate Wind-Induced Waves in Bahar Al-Najaf Depression Using MIKE21 // *International Journal of Safety & Security Engineering*, 2024. 14(1).
15. **Ghaderi D.** Investigation of wave height variations in the Strait of Hormuz based on numerical modeling // *Marine Development*, 2025. 3, 4
16. **Chen X., Ni Y., Shen Y., Ying Y., Wang J.** The research on the applicability of different typhoon wind fields in the simulation of typhoon waves in China's coastal waters // *Frontiers in Marine Science*, 2024. 11, 1492521.
17. **Do J. D., Hyun S. K., Jin J. Y., Jeong W. M., Lee B., Chang Y. S.** Swash-Zone Formula Evaluation of Morphological Variation in Haeundae Beach, Korea // *Water*, 2024. 16(6), 836.

18. Wang F., Zhang J., Guo Y., Luo M., Lin Y., Ji Y., Liu S. Numerical study on the effects of combined wave, current, and wind on the tide and wave hydrodynamic field in the Yellow-Bohai Sea area, China // *Applied Ocean Research*, 2025. 165, 104794.
19. Guodong Q., Zhongxian C. A comparison of ocean wave height forecasting methods for ocean wave energy conversion systems // *Water*, 2023. 15(18), 3256
20. Величко С. В., Дупляк О. В. Гідротехнічні споруди. Грунтова гребля з баштовим водоскидом: методичні вказівки до виконання курсового проекту/роботи. Київ: КНУБА, 2024. 42 с.

REFERENCES

1. Rohachko, S. I. (2025). *Sylova diia vitrovyykh khvyl na hidrotekhnichni sporudy: pidruchnyk dlia vuziv*. Odesa: ONMU. Retrieved from: <https://surl.lt/vrhrfk> [in Ukrainian]
2. Yakovlev, V. V., Voskoboinick, V. A., Khomicky, V. V., Tkachenko, V. O., Voskoboinyk, O. A., Tereshchenko, L. M., Voskoboinick, A. V., & Bondar, V. V. (2020). Influence of water area depth on wind waves. *Environmental Safety and Natural Resources*, 36(4), 77–88. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.77-88>
3. Van der Meer, J. W. (2021). Rock armour slope stability under wave attack; the Van der Meer Formula revisited. *Journal of coastal and hydraulic structures*, 1, 8 <https://doi.org/10.48438/jchs.2021.0008>
4. Erkurtulmuş, S. A., & Peşman, E. (2025). Determination of Wave Parameters of Bandirma Bay Using Wave Prediction Methods. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 14(1), 167-173. <https://doi.org/10.46810/tdfd.1608593>
5. Eyhavand-Koohzadi, A., & Badieli, P. (2022). Experimental study on the growth and conversion of duration-and fetch-limited wind waves in water of finite depth. *Ocean Engineering*, 266, 113020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113020>
6. Kotaška, S., Duchan, D., Pelikán, P., & Špano, M. (2024). Spectral analysis of oscillatory wind wave parameters in fetch-limited deep-water conditions at a small reservoir and their prediction: Case Study of the Hulín Reservoir in the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 72(1), 95-112. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0042>
7. Ozeren, Y., & Wren, D. G. (2009). Predicting Wind-driven Waves in Small Reservoirs. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 52(4), 1213-1221. <https://doi.org/10.13031/2013.27793>
8. Pelikán, P., Hubáčková, V., Kaletová, T., & Fuska, J. (2020). Comparative assessment of different modelling schemes and their applicability to inland small reservoirs: A Central Europe case study. *Sustainability*, 12(24), 10692. <https://doi.org/10.3390/su122410692>
9. de Oliveira Mattosinho, G., de Oliveira Ferreira, F., & de Freitas Maciel, G. (2026). Deterministic modeling and uncertainty quantification of wind waves in Ilha Solteira Reservoir, Brazil. *Water Science and Engineering* <https://doi.org/10.1016/j.wse.2026.02.006>
10. Xie, H., Lyu, J., Bao, Y., Yu, Y., Li, Y., Zheng, X., & He, X. (2023). Spatial and temporal variation of nearshore significant wave height in the Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Indicators*, 151, 110343. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110343>
11. Guseva, S., Casper, P., Sachs, T., Spank, U., & Lorke, A. (2021). Energy flux paths in lakes and reservoirs. *Water*, 13(22), 3270. <https://doi.org/10.3390/w13223270>
12. Aydoğan, B., & Ayat, B. (2021). Performance evaluation of SWAN ST6 physics forced by ERA5 wind fields for wave prediction in an enclosed basin. *Ocean Engineering*, 240, 109936. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109936>
13. Khomicky, V. V., Ostroverkh, B. M., Tkachenko, V. A., 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>
14. Alturfi, U. A. S. M., & Shukur, A.-H. K. (2024). Modeling Optimal Locations of Breakwaters to Mitigate Wind-Induced Waves in Bahar Al-Najaf Depression Using MIKE21. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 14(1), 233–240. <https://doi.org/10.18280/ijss.140123>
15. Ghaderi, D. (2025). Investigation of wave height variations in the Strait of Hormuz based on numerical modeling. *Marine Development* 3, 4 <https://doi.org/10.1007/s44312-025-00047-4>
16. Chen, X., Ni, Y., Shen, Y., Ying, Y., & Wang, J. (2024). The research on the applicability of different typhoon wind fields in the simulation of typhoon waves in China's coastal waters. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1492521 <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1492521>
17. Do, J. D., Hyun, S. K., Jin, J. Y., Jeong, W. M., Lee, B., & Chang, Y. S. (2024). Swash-Zone

Formula Evaluation of Morphological Variation in Haeundae Beach, Korea. *Water*, 16(6), 836.

<https://doi.org/10.3390/w16060836>

18. Wang, F., Zhang, J., Guo, Y., Luo, M., Lin, Y., Ji, Y., & Liu, S. (2025). Numerical study on the effects of combined wave, current, and wind on the tide and wave hydrodynamic field in the Yellow-Bohai Sea area, China. *Applied Ocean Research*, 165, 104794.

<https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104794>

19. Guodong, Q., & Zhongxian, C. (2023). A comparison of ocean wave height forecasting methods for ocean wave energy conversion systems. *Water*, 15(18), 3256

<https://doi.org/10.3390/w15183256>

20. Velychko, S. V., & Dupliak, O. V. (2024). Hidrote-khnichni sporudy. Hrunтова hreblia z bashtovym vodoskydom: Metodychni vkazivky do vykonannya kursovoho proiektu/roboty. Kyiv: KNUBA, 42 s. Retrieved from <https://surl.li/recdfu> [in Ukrainian]

Comparative evaluation of empirical approaches for wind wave prediction in a small mountain reservoir

Svitlana Velychko, Olena Dupliak

Abstract. Prediction of wind-generated waves in reservoirs is a key component in the design of earthfill dams, as wave action directly affects slope stability, slope height and structural safety. In Ukraine, the design practice is still based on SNiP 2.06.04-82, which relies on empirical relationships developed several decades ago. This study aims to evaluate and compare empirical methods for determining the height, period and length of the wave operating in Ukraine and abroad such as CEM, SPM, ASABE and STN. The evaluation was conducted for a dry mountain reservoir on the Irshava River (Ukraine), considering site-specific wind conditions and reservoir geometry. Results show that different methodological approaches lead to significant variations in predicted wave parameters. The lowest 1 % probability wave height was obtained using the CEM method (0.60 m), while the highest value was produced by the ASABE method (0.93 m). The current Ukrainian standard yielded an intermediate value of 0.84 m, closely matching ASABE results. It was found that methods developed for inland reservoirs (SNiP, ASABE) tend to produce higher wave heights compared to coastal-based methods (CEM, SPM). These differences affect calculated wave run-up and set-up, which are essential for determining dam crest elevation. The study confirms that, despite the increasing use of numerical wave models, empirical methods remain practical and reliable tools for engineering design, particularly for small and medium-sized reservoirs.

Key words: wind waves, mean wave height, significant wave height, wave length, wave period, reservoir.

Дата першого надходження рукопису 24.02.2026

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування 10.03.2026

Дата публікації 31.03.2026