

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МОРСЬКОГО ХВИЛЮВАННЯ, ЯКІ МАЮТЬ ВПЛИВ НА БЕЗПЕКУ ПЛАВАННЯ

Кубіцький Р. О.

*старший викладач кафедри кораблеводіння та штурманського озброєння
Інституту Військово-Морських Сил
Національного університету «Одеська морська академія»
ORCID ID: 0009-0007-9077-6185*

Буга А. О.

*старший викладач кафедри кораблеводіння та штурманського озброєння
Інституту Військово-Морських Сил
Національного університету «Одеська морська академія»
ORCID ID: 0009-0006-8322-7252*

Корніюк В. Я.

*викладач кафедри кораблеводіння та штурманського озброєння
Інституту Військово-Морських Сил
Національного університету «Одеська морська академія»
ORCID ID: 0000-0003-4373-5237*

Анотація. У статті розглядаються характеристики процесу хвилювання, яке є однією з основних складових динаміки Світового океану. Хвилі в океанах і морях представляють собою періодичні коливання частинок води навколо положення їх рівноваги. Причини утворення та умови розповсюдження хвиль в океанах і морях доволі різноманітні, тому їх класифікують за різними ознаками. В залежності від сил, що їх викликають, (тобто, за походженням) виділяють наступні види хвиль: вітрові, анемобаричні, сейсмічні, припливні, корабельні. Вивчення хвиль впродовж багатьох років проводилось на основі положень класичної гідромеханіки. На даний момент існує значна кількість різних теорій морських хвиль, серед яких однією з найбільш наочних є так звана трохоїдальна теорія, яка наводиться у статті. У цій теорії розглядаються ідеалізовані хвилі, профіль яких описується кривою, що носить назву трохоїда. На поверхні океанів та морів переважають вітрові хвилі, що відрізняються великим різноманіттям. Як показали спостереження, це різноманіття характеризується, тим не менше, певними статистичними закономірностями, що дає можливість вивчати не тільки окремі хвилі, але й одночасно всю сукупність вітрових хвиль. Розподіл вітрових хвиль в океанах та морях визначається здебільшого особливостями вітрового режиму. Великий вплив на хвилі також мають ступені розчленованості водойми, рельєф дна, наявність льодового покриву. Незважаючи на досягнуті успіхи у розвитку теорії вітрових хвиль, основні питання поки не отримали достатньо повного та строгого вирішення, що пояснюється великою складністю самого вирішення.

Елементи морських хвиль, що виникають під дією вітру в океанах і морях, залежать не тільки від сили вітру, але й від тривалості його дії, довжини розгону, рельєфу дна. Тому вітер однієї й тієї ж сили при різних конкретних умовах може утворювати різні хвилі. Максимальні висоти хвиль, що спостерігаються в океанах, значно більші, ніж у морях. Географічний розподіл хвиль у різних районах Світового океану по сезонах (місяцях) наводиться у спеціальних посібниках.

Забезпечення безпеки плавання в умовах сильного хвилювання і вітру, особливо у штормових умовах, багато в чому залежить від розуміння судноводієм закономірностей їх впливу на судно.

Ключові слова: хвилювання, коливання, вітрові хвилі, зиб, елементи хвилі, двовимірні хвилі, тривимірні хвилі, уособлені хвилі, поступальні хвилі, стоячі хвилі, довгі хвилі, короткі хвилі, хвильові пакети.

Kubitskyi R. O., Buga A. O., Korniyuk V. J. ANALYSIS OF SEA WAVE PARAMETERS THAT AFFECT SAFETY OF NAVIGATION

Abstract. The article considers the characteristics of the process of sea swell, which is one of the main dynamic components of the World Ocean. Waves in the oceans and seas are periodic oscillations of water particles around their position of equilibrium. The causes of formation and conditions for the propagation of waves in the oceans and seas are quite diverse, so they are classified according to various characteristics. Depending on the forces that cause them (i.e., by origin), the following types of waves are distinguished: wind waves, anemobaric waves, seismic waves, tidal

waves, ship waves. The study of waves for many years has been carried out on the basis of the provisions of classical hydromechanics. At the moment, there are significant number of different theories of sea waves, among which one of the most illustrative is the so-called trochoidal theory, which is given in the article, exist. This theory considers ideal waves, the profile of which is described by a curve called a trochoid. Wind waves, which are distinguished by great diversity, prevail on the sea surface. As observations have shown, this diversity is characterized, nevertheless, by certain statistical regularities, which makes it possible to study not only individual waves, but also the entire set of wind waves at the same time. The distribution of wind waves in the oceans and seas is determined largely by the characteristics of the wind regime. The degree of dismemberment of the water body, the relief of the bottom, and the presence of ice cover also have a great influence on the waves. Despite the successes achieved in the development of the theory of wind waves, the main issues have not yet received a sufficiently complete and rigorous solution, which is explained by the great complexity of the solution itself. The elements of sea waves that arise under the action of the wind in the oceans and seas depend not only on the strength of the wind, but also on the duration of its action, the length of the acceleration, and the relief of the bottom. Therefore, a wind of the same force under different specific conditions can form different waves. The maximum heights of waves observed in the oceans are much greater than in the seas. The geographical distribution of waves in different areas of the World Ocean by season (month) is given in special publications. Ensuring the safety of navigation in conditions of rough seas, especially in stormy conditions, largely depends on navigator's understanding of the patterns of their influence on ship.

Key words: wave, sea swell, oscillation, wind waves, swell, elements of wave, two-dimensional waves, three-dimensional waves, single waves, progressive waves, standing waves, long waves, short waves, wave packets.

Природне явище, з яким мореплавці стикаються постійно – хвилювання на поверхні води. Хвилюванням взагалі називають процес розповсюдження у воді коливального руху, а виникаючі при цьому збурення води – хвилями. Під морськими хвилями розуміють таку форму періодичного руху, який безперервно змінюється, при якому частинки води здійснюють коливання навкруги свого положення рівноваги.

Основна частина літератури для суднової дії містить відомості про хвилювання, що стосуються його впливу на керованість судна, забезпечення безпеки плавання на хвилюванні та безпечного штормування суден. Питанням природи утворення та розповсюдження хвиль приділяється менше уваги. Метою статті є систематизація цих відомостей для практичного використання при забезпеченні безпеки плавання.

За причинами утворення морські хвилі поділяють на [1, 2, 5]:

- вітрові, які утворюються під дією вітру;
- припливні, які виникають під дією періодичних сил тяжіння Сонця та Місяця;
- анемобаричні, які утворюються при відхиленні рівня поверхні моря від положення рівноваги, що відбувається під дією вітру та зміною атмосферного тиску;
- сейсмічні (цунамі), що виникають в результаті динамічних процесів, які відбуваються в земній корі, і в першу чергу підвод-

них землетрусів, а також вивержень підводних та прибережних вулканів;

- одиночні хвилі-вбивці;
- корабельні, що утворюються під час руху судна.

Найбільш розповсюдженим видом хвиль є вітрові хвилі – вимушені коливальні рухи поверхневих шарів води. Вони утворюються за рахунок енергії вітру, яка передається поверхневим частинкам води шляхом аеродинамічного тиску повітряного потоку на навітряні схили гребенів та його тертя по поверхні хвилі (рис. 1). Розвиток вітрових хвиль починається з утворення капілярних бриж при швидкості вітру біля 0,7 м/с. Зростаючи, капілярні хвилі перетворюються у гравітаційні, які поступово збільшуються у довжину та ширину. Схвилювана вітром поверхня води має досить складний рельєф, який безперервно змінюється з часом. На поверхні моря завжди існують вітрові хвилі довжиною до декількох перших сотень метрів та висотою до 25–30 метрів.

Якщо вітер, що викликав хвилювання, стихає, вітрові хвилі поступово перетворюються у вільні хвилі, які називають зиб. Вони мають більш правильну форму, ніж вітрові хвилі, та більшу довжину гребнів. В реальних умовах найбільш часто зустрічається змішане хвилювання, яке формується з зибу та вітрових хвиль.

Хвилі характеризуються наступними елементами (рис. 2) [2, 5]:

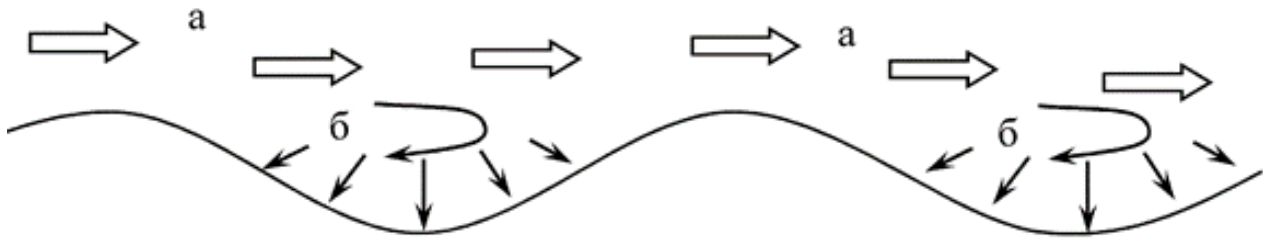


Рис. 1. Швидкість (а) та аеродинамічний тиск (б) вітру на хвильову поверхню

Гребінь хвилі – частина хвилі, що розташована вище спокійного рівня.

Вершина хвилі – найвища точка гребеня хвилі.

Улоговина хвилі – частина хвилі, що розташована нижче спокійного рівня.

Підосва – нижня точка улоговини хвилі.

Крутість – відношення висоти хвилі до її довжини ($\frac{h}{\lambda}$).

Хвильове число k – кількість довжин хвиль, що вкладаються у 2π метрів ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$).

Період T По силах, що прагнуть повернути частинку води в положення рівноваги, розрізняють *капілярні* та *гравітаційні* хвилі. В капілярних хвилях силою, що відновлює, є сила поверхневого натягу, в гравітаційних – сила тяжіння.

По дії сили після утворення хвилі виділяють хвилі *вільні*, коли сила припиняє дію після утворення хвилі, та *вимушені*, коли дія сили не припиняється.

По мінливості елементів (висоти, довжини та ін.) у часі хвилі поділяють на ті, що встановились, або *регулярні*, які не змінюють своїх елементів, та ті, що не встановились, або *нерегулярні*, які розвиваються або, навпаки, згасають, змінюючи свої елементи з часом.

По розташуванню у товщі води розрізняють *поверхневі* хвилі, які виникають на поверхні моря, та *внутрішні*, що виникають на глибині.

За формою хвилі бувають двовимірні, тривимірні та уособлені (одиначні). *Двовимірні* мають більшу протяжність гребеня, у багато разів більшу за довжину хвилі, та представляють собою довгі вали, які ясно помітні і йдуть друг за другом (рис. 3). *Тривимірні* хвилі (рис. 4) не утворюють паралельних валів і мають довжину гребеня L , співмірну з довжиною хвилі λ . Гребені та підосви тривимірних хвиль розташовуються без будь-якої певної системи, часто у шаховому порядку.

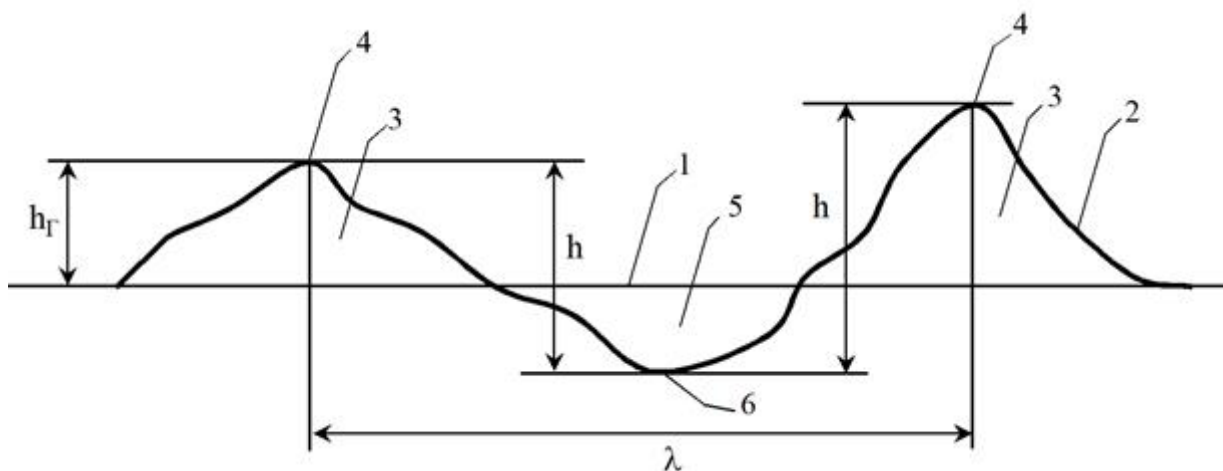


Рис. 2. Елементи хвилі: 1 – середня хвильова лінія; 2 – профіль хвилі; 3 – гребінь хвилі; 4 – вершина хвилі; 5 – улоговина хвилі; 6 – підосва хвилі; h – висота хвилі; h_g – висота гребеня; λ довжина хвилі



Рис. 3. Двовимірні хвилі

Уособлені хвилі мають тільки куполоподібний гребінь і не мають підосви. Вітрове хвилювання частіше за все буває тривимірним.

За переміщенням форми хвилі виділяють *поступальні* та *стоячі* хвилі. Перші характеризуються видимим переміщенням форми (профілю) хвилі. Частинки води при цьому рухаються по круговим, майже замкнутим орбітам, радіус яких зменшується з віддаленням від поверхні (рис. 5). Стоячі хвилі, або сейші (рис. 6), характеризуються тим, що частинки води здійснюють періодичні рухи тільки у вертикальному напрямку, видима форма яких у просторі не переміщується.

З початком впливу вітру на поверхню води в результаті сил тертя утворюються дрібні хвилі – капілярні, або бриж. При подальшій дії вітру окрім сил тертя з'являється нерівномірний аеродинамічний тиск на хвилову поверхню (рис. 1), що сприяє збільшенню

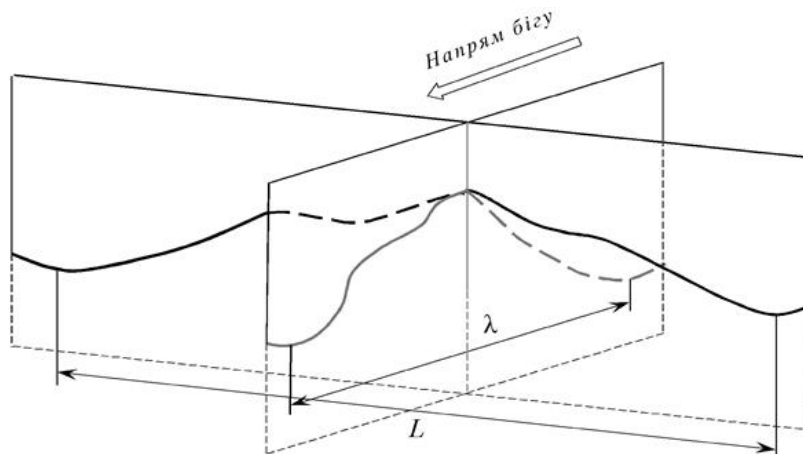


Рис. 4. Схема тривимірної хвилі

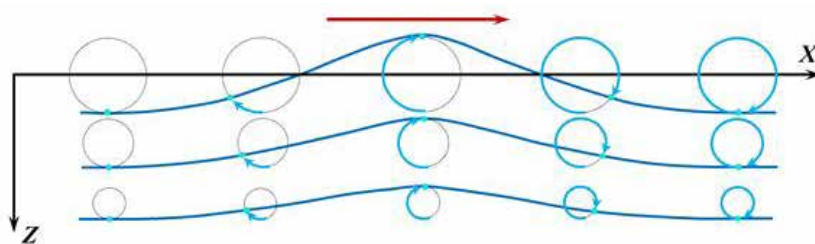


Рис. 5. Поступальна хвиля і траєкторії руху частинок

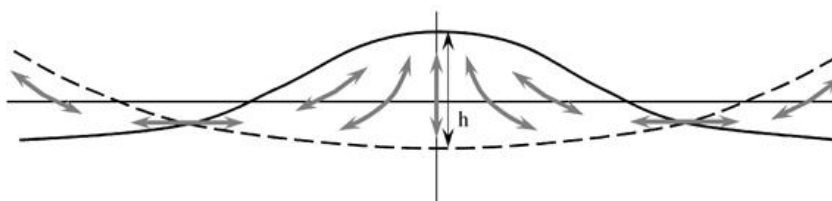


Рис. 6. Схема стоячої хвилі

висоти та швидкості хвиль. Зі збільшенням швидкості c хвиль росте і їх довжина λ ці параметри пов'язані формулою [1, 5]:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \approx 1,25\sqrt{\lambda} \quad (1)$$

При цьому внаслідок збільшення швидкості переміщення хвиль і з ростом їх довжини під час шторму, хвилі більшої довжини обганяють більш короткі хвилі, які до того ж швидше затухають. Це приводить до того, що довгі хвилі можуть виходити за межі району, охопленого штормом, та утворювати хвилювання у вигляді мертвого зибу у сусідніх районах моря.

Висота та крутість хвиль швидко збільшуються. З певного моменту гребені нахилиються вперед та розбиваються у білу піну, утворюючи баранці. При подальшому посиленні вітру до штормового спостерігається проходження більш або менш довгих та високих хвиль з дуже змінними у просторі та часі гребенями і западинами. На поверхні таких великих валів та западин постійно виникають та зростають менші, утворюючи послідовність і велике різноманіття розмірів хвиль. Довгі хвилі наздоганяють та обходять короткі. Відмінність швидкостей хвиль приводить до частого накладення їх одна на одну (інтерференції). Утворюються *хвильові пакети* – послідовність хвиль, висота яких поступово збільшується, досягає максимального значення, а потім поступово зменшується [5].

Швидкість руху окремого гребеня хвилі c в два рази вище швидкості руху групи хвиль u (групової швидкості пакету). Відмінність між швидкостями пояснюється тим, що при русі групи хвиль кожний окремий гребінь не

залишається постійним, – він зростає, забираючи енергію з загальної групи, потім зменшується, передаючи енергію наступному за ним гребеню, і нарешті, зникає (рис. 7).

При досягненні хвилями швидкості вітру аеродинамічний тиск припиняється. Зростання висоти хвиль зупиняється, починається процес їх згасання. Спочатку гасяться дрібні хвилі, потім більші, найбільш великі гасяться повільніше і можуть існувати після припинення вітру впродовж багатьох годин (до декількох діб).

Внаслідок нерегулярності поривів вітру та зміни його напрямку хвилювання також є нерегулярним. Проте випадкові відхилення швидкості та напрямку вітру відбуваються відносно деяких середніх значень. Тому при тривалому впливі вітру хаотичне хвилювання набуває структури, що близька до регулярної, яка описується теорією синусоїдальної хвилі.

Теорія [1, 2, 5] та безпосередні спостереження показують, що при проходженні хвилі частинки води рухаються по приблизно круговим траєкторіям з рівномірною круговою швидкістю ωr , причому частинки у різних місцях вздовж довжини хвилі знаходяться у різних фазах руху (рис. 5). З глибиною радіуси орбіт швидко зменшуються згідно закону:

$$r = r_0 \cdot e^{-2\pi z/\lambda}, \quad (2)$$

де z – глибина частинки у стані рівноваги.

Оскільки довжина хвилі залишається постійною по глибині, згідно тому ж закону зменшуються і кути хвильового схилу хвилі.

Радіус орбіти частинок дорівнює половині висоти хвилі на даній глибині. Тому, заміною

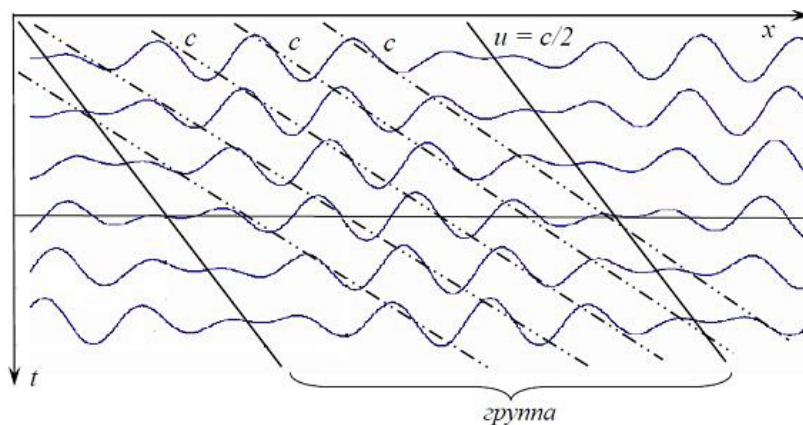


Рис. 7. Рух груп хвиль

ючи $r_o = h_o/2$, отримаємо формулу, що визначає змінення висоти хвилі з глибиною:

$$h = \frac{h_o}{2} e^{-2\pi/\lambda}, \quad (3)$$

де h_o – висота хвилі на поверхні моря.

Тобто, згідно зменшенню радіусів орбіт частинок зменшується також висота хвилі.

З формули витікає, що на глибині, яка дорівнює половині довжини хвилі ($z = \lambda/2$), висота хвилі зменшується у 23 рази, а на глибині, що дорівнює довжині хвилі ($z = \lambda$) – у 535 разів.

Отриманий зв'язок дозволяє оцінити глибину, на якій хвилювання практично зникає. Ця глибина може бути прийнята такою, що дорівнює половині довжини хвилі. Отже, можна вважати, що на глибині, яка дорівнює довжині хвилі на поверхні, хвилювання практично відсутнє. В океані, де зустрічаються вітрові хвилі, що мають звичайно довжину не більше 100 м, на глибині 50 м хвилювання практично відсутнє.

Відносна висота хвилі не має однозначного зв'язку з її довжиною, але не може бути більше значень $1/10 - 1/8$, так як при подальшому зростанні висоти відбувається руйнування вершин хвиль. Згідно спостережень, середнє значення крутості хвилі падає зі зростанням її довжини. Для орієнтовної оцінки висоту хвилі можна визначити за форму-

лою, що отримана на основі статистичних даних [1]:

$$h = 0,17 \cdot \lambda^{3/4} \quad (4)$$

У розглянутій трохоїдальній теорії вплив глибини моря на хвилі не враховувався. Разом з тим тertia о дно суттєво змінює геометричні та кінематичні характеристики хвиль. Про них можна судити на основі висновків, що дає теорія хвиль для мілководного моря, яка розглядає двовимірне хвилювання, що встановилося.

З формули (2) випливає, що зменшення радіусів орбіт залежить від відношення глибини до довжини хвилі. Тому, чим менше глибина моря і більше довжина хвилі, тим слабніше повинен змінюватись радіус орбіти, але дно перешкоджає розвитку вертикальних коливань. В результаті орбіти часток мають еліптичну форму з великою віссю, витягнутою в напрямку розповсюдження хвилі. Розміри осей еліпсів залежать від відношення довжини хвилі до глибини моря та зменшуються з наближенням до дна (рис. 8б).

При дуже великих довжинах хвиль ($H > 0,5\lambda$) горизонтальна вісь еліпса практично не зменшується з глибиною (рис. 8а).

Швидкість хвилі залежить не тільки від її довжини, але й від глибини моря і виражається формулою:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \tanh \frac{2\pi}{\lambda} H \quad (5)$$

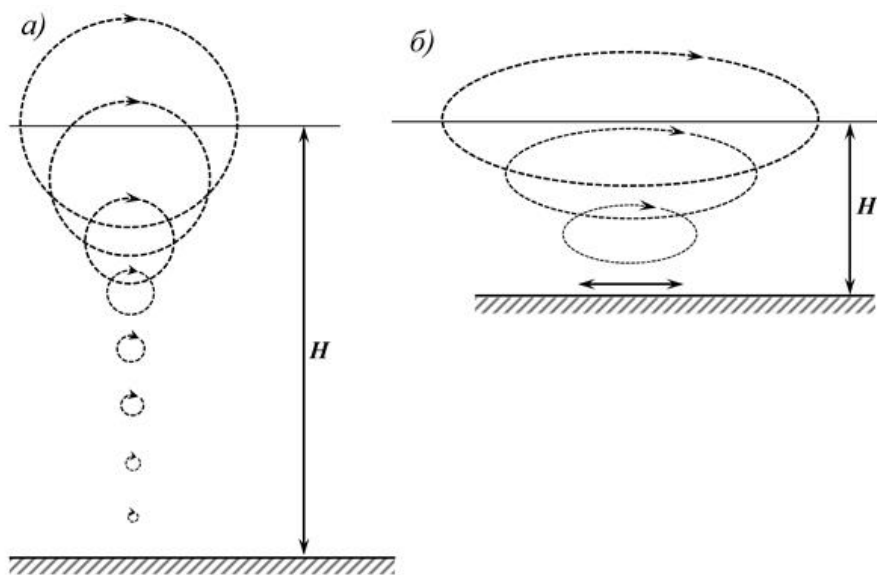


Рис. 8. Вплив глибини моря на форму орбіт часток у хвилі:
а) $H > 0,5\lambda$; б) $H < 0,5\lambda$

У випадку, коли H/λ велике, гіперболічний тангенс наближається до одиниці і формула (5) приймає вигляд формули (1).

Хвилі, що задовольняють відношенню $H > 0,5\lambda$, називаються *короткими*. Отже, для хвиль, які мають довжину менше подвоєної глибини моря, при визначенні елементів поверхневих хвиль можуть вживатися формули троходальної теорії. До них відносяться вітрові хвилі, які спостерігаються на деякому віддаленні від берегової лінії.

Для відношення $H < 0,1\lambda$ значення гіперболічного тангенса та його аргумента з достатньою точністю стають рівними один одному. Враховуючи це, з формули (5) отримують базову формулу для фазової швидкості таких хвиль:

$$c_\phi = \sqrt{gH} \quad (6)$$

З формули (6) видно, що швидкість розповсюдження цих хвиль залежить тільки від глибини моря. Хвилі, у яких $H < 0,1\lambda$, називаються *довгими*. Прикладом довгих хвиль служать припливні хвилі.

В інтервалі відношень $H/\lambda = 0,5 \div 0,1$ хвилі знаходяться у перехідній стадії від коротких до довгих, і їх називають хвилями *мілководдя* або *довгими короткоперіодними*. До цього

виду хвиль відносяться вітрові, що розповсюджуються у прибережній зоні, та цунамі.

Питання про те, чи є хвиля довгою або короткою, має практичне значення. При підході хвиль до прибережного мілководдя вони стають довгими, розмивають дно, переміщують величезні маси наносів, змінюючи дно та береги. Тому для інженерної практики встановлені критерії переходу хвиль від коротких до довгих.

Висновки теорії хвиль для мілкового моря можуть бути використані при вивченні припливних хвиль, для яких добре виконується формула (6) і профіль яких близький до синусоїдального, а також частково при вивченні вітрових хвиль і хвиль зибу при їх розповсюдженні з відкритої частини моря до узбережжя в умовах глибини моря, що поступово зменшується.

Висновки. Хвилювання є невід'ємною частиною динаміки Світового океану. Сильне хвилювання, особливо під час шторму, може викликати різні небезпечні ситуації і навіть катастрофи кораблів і суден. Знання та розуміння процесів хвилеутворення та природи хвиль дозволяє визначати методи управління кораблем та розробляти раціональні дії з попередження або пом'якшення небезпечних та хибних наслідків впливу хвилювання на корабель.

Література:

1. Robert H. Stewart. Introduction to Physical Oceanography. Department of Oceanography, Texas A & M University, September 2008 Edition.
2. Jay Lehr, Jack Keeley, Janet Lehr, Thomas B. Kingery III. Water encyclopedia. Oceanography; Meteorology; Physics and Chemistry; Water Law; and Water History, Art, and Culture. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
3. Pub. No. 9 American Practical Navigator. An Epitome of Navigation. Volume I. 2024 Edition. National Geospatial-Intelligence Agency, Springfield, Virginia.
4. Czeslaw Dyrz. Oceanography for Students of the Polish Naval Academy. Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2022.
5. Михайлов В. І. Спеціальні розділи фізичної океанології: підручник / В. І. Михайлов, Н. В. Кучеренко. Одеса: «Екологія», 2011. 220 с.
6. Хільчевський В. К. Основи океанології: підручник / В. К. Хільчевський, С. С. Дубняк. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. 255 с.

References:

1. Robert H. Stewart (2008). Introduction to Physical Oceanography. Department of Oceanography, Texas A & M University.
2. Jay Lehr, Jack Keeley, Janet Lehr, Thomas B. Kingery III (2005). Water encyclopedia. Oceanography; Meteorology; Physics and Chemistry; Water Law; and Water History, Art, and Culture. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
3. Pub. No. 9 American Practical Navigator. An Epitome of Navigation. Volume I. 2024 Edition. National Geospatial-Intelligence Agency, Springfield, Virginia.
4. Czeslaw Dyrz (2022). Oceanography for Students of the Polish Naval Academy. Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia.
5. Mykhailov, V. I., & Kucherenko, N. V. (2011). *Spetsialni rozdiily fizychnoi okeanolohii: pidruchnyk* [Special sections of physical oceanology: textbook]. Odessa: "Ekolohiia" [in Ukrainian].
6. Khilchevskiy, V. K., & Dubniak, S. S. (2008). *Osnovy okeanolohii: pidruchnyk* [Fundamentals of oceanology: textbook]. Kyiv: Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr "Kyivskiy universytet" [in Ukrainian].