

© Кучеренко Н. В., Капочкін Б.Б., Капочкіна М. Б.

ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ ПОГЛИНАННЯ ЕНЕРГІЇ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У ВОДІ

Навігаційне забезпечення судноплавства базується на штатних гідроакустичних приладах судна, засобах донної інфраструктури позиціонування та зв'язку, берегових та донних засобах висвітлення підводної обстановки. Гідроакустичні засоби гідролокації та шумопеленгації працюють у різних частотних діапазонах. Метою дослідження є визначення фізичних причин змін дальності розповсюдження акустичного сигналу в залежності від частоти випромінювача. Критично розглянуті проблеми впливу на дальність розповсюдження акустичних хвиль в'язкості водного середовища, впливу релаксаційних процесів на поглинання акустичної енергії (дисоціації - рекомбінації розчиненої речовини з порушення термодинамічної рівноваги системи). Показано, що коректні емпіричні формули для розрахунку поглинання звуку у морській воді досі не існують, адже їх фізична суть настільки різна, що складається враження невизначеності розуміння, що саме (який фактор чи процес) є відповідальним за затухання звуку у морській воді. Результатами розрахунків вперше визначено, що для всього діапазону частот акустичних хвиль дальність їх розповсюдження, що виміряна не у одиницях виміру відстані, а у циклах, є константою. Однакова кількість циклів відповідає однаковому поглинанню акустичної енергії. Дальність розповсюдження звуку визначається довжиною хвилі, яка для умов практичної відсутності дисперсії звуку у воді пов'язана з частотою, але тільки статистично, а не фізично. За рахунок цього склалося хибне враження про залежність дальності розповсюдження звуку від частоти. Таким чином, вперше представлено підґрунтя для повноцінного переосмислення теорії процесу поглинання енергії акустичних хвиль у воді. Означений підхід може бути правомірним і для інших типів хвиль у інших середовищах.

Ключові слова: *навігаційне забезпечення судноплавства; поглинання енергії хвиль; гідроакустика; дальність розповсюдження звуку; довжина хвилі; частота хвилі; релаксація звуку; дисперсія звуку; коефіцієнт поглинання звуку.*

Постановка проблеми. Поглинання енергії акустичної хвилі у морській воді - явище незворотного переходу енергії механічної хвилі, що проявляється стисканням-розтягненням практично нестискуваної води, в теплову (в підвищення швидкості кінетичного руху молекул). Поглинання енергії акустичних хвиль у воді пов'язують з такою фізичною властивістю середовища як в'язкість, з процесами дисоціації - рекомбінації розчиненої речовини в умовах змін тиску та порушенням термодинамічної рівноваги системи. Навігаційне забезпечення судноплавства базується на штатних гідроакустичних приладах судна, засобах донної інфраструктури позиціонування та зв'язку, берегових та донних засобах висвітлення підводної обстановки. Гідроакустичні засоби гідролокації та шумопеленгації працюють у різних частотних діапазонах. Метою дослідження є визначення фізичних причин змін дальності розповсюдження акустичного сигналу в залежності від частоти випромінювача.

Вплив в'язкості середовища на поглинання акустичної енергії.

Вважається загальноприйнятим [1], що механізми поглинання звуку у воді пов'язані, в основному, з її в'язкістю. У той же час чіткого фізичного розуміння впливу в'язкості на акустичні хвилі не існує. Це підтверджує той факт, що в'язкість одночасно розглядається у двох типах - здвигова та об'ємна. Така фізична властивість речовини, як в'язкість залежить від температури, і це інтуїтивно зрозуміло та експериментально доведено: при збільшенні температури обидва види в'язкості зменшуються. Тиск також повинен впливати на в'язкість, але вважається, що зміна тиску змінює лише здвигову в'язкість, а об'ємна в'язкість чомусь залишається незмінною. Тобто, об'ємна в'язкість не у повній мірі відповідає

фізичним властивостям в'язкості, як загального поняття. Здвигова в'язкість нібито виникає як результат взаємодії під час руху суміжних шарів води один відносно другого. Цю в'язкість формалізують через коефіцієнт здвигової (Стоксової чи першої) в'язкості. У результаті лабораторних дослідів доведено, що здвигове в'язке поглинання енергії акустичних хвиль у морській воді практично не відбувається і є домінуючим лише у прісній воді. У морській воді поглинання енергії акустичної хвилі за рахунок здвигової в'язкості стає суттєвим лише для ультразвуку (частота > 1 МГц). Причини такої особливості прояву здвигової в'язкості у морській воді для нас не є очевидними.

У морській воді домінує поглинання енергії звуку за рахунок об'ємної в'язкості, яка формалізується через коефіцієнт об'ємної в'язкості. Об'ємна в'язкість проявляється в процесах, що супроводжуються змінами об'єму рідини при проходженні акустичної хвилі. Локальні стискання та розрідження, мабуть, приводять до порушення термодинамічної рівноваги системи. Вважається, що цей механізм викликає витрати акустичної енергії. Об'ємна в'язкість більше здвигової у два - три рази. Тобто логічно вважати, що і поглинання акустичних хвиль у морській воді за рахунок переходу енергії звукової хвилі в тепло, повинно відбуватися не менш, ніж удвічі більше. У той же час загальновідомо, що прісна та морська вода змінюють свій об'єм під дією тиску не більше, ніж на 1%. Тобто, фізичний процес стискання - розтягнення, який у воді фактично не проявлений, удвічі більше впливає на поглинання звуку, ніж фізичне явище здвигової в'язкості.

Якщо у прісній воді домінує здвигова в'язкість, а у морській – об'ємна, то саме розчинені у воді речовини мають бути найвпливовішими у процесі поглинання звукової енергії. Таким чином можна констатувати, що витрати енергії акустичної хвилі відбуваються в процесі дисоціації – рекомбінації розчиненої речовини, що на нашу думку не має відношення до такої фізичної властивості середовища, як в'язкість.

При поширенні звуку у воді, яка характеризується здвиговою і об'ємною в'язкостями (фізичний зміст яких досі не визначений але більш-менш надійно формалізований відповідними коефіцієнтами) та теплопровідністю, коефіцієнт поглинання повздовжньої хвилі дорівнює:

$$\text{Акл} = (\omega^2 / 2\rho c^3) [4\eta / 3 + \xi + \chi(1/C_v - 1/C_p)], \quad (1)$$

де ρ - щільність середовища,

c – швидкість звуку,

$\omega = 2\pi f$ - колова частота звукової хвилі (f – частота, кількість коливань на одну секунду),

η і ξ - коефіцієнти здвигової та об'ємної в'язкості, відповідно,

χ - коефіцієнт теплопровідності,

C_p і C_v - теплоємність середовища при постійних тиску та об'ємі.

У наведеній емпіричній формулі головний вплив на поглинання акустичної хвилі має частота хвилі. Причини того, що коефіцієнти в'язкості на порядки менше впливають на поглинання енергії акустичних хвиль, ніж їх частота, у емпіричних формулах не мають пояснення, в них лише зафіксовано зазначений факт.

Слід зауважити, що в аспекті розповсюдження повздовжніх хвиль у воді, на відміну від інших речовин, є проблеми з поняттям густини води. Відповідно до закону Ньютона-Лапласа повздовжні хвилі, у тому числі звук, розповсюджуються у середовищі зі швидкістю, яка залежить від стискуваності рідини та її густини, яка у даному випадку є показником молекулярної маси речовини. Слід зазначити, що механічні повздовжні хвилі рухають молекули речовини, долаючи інерцію їх маси (у формулу Ньютона-Лапласа входять як щільність) та сили міжмолекулярної взаємодії (у формулу входять як пружність). У воді, на відміну від інших речовин, повздовжні хвилі рухають не тільки поодинокі молекули води з молекулярною масою 18, але й утворені асоціації з декількох молекул (від двох і більше), у яких міра інерції (маса) більша у порівнянні з молекулою води. Нами неодноразово вказувалося на проблематичність визначення густини морської води, про що свідчить факт відсутності узагальненої формули її розрахунку. Невизначеність густини води як характеристики, що входить у формулу швидкості звуку Ньютона-Лапласа, є причиною неможливості її застосування для розрахунку

швидкості звуку у воді. Невизначеність густини (яка суттєво залежить і від структурованості морської води) у формулі (1) призводить до невизначеності коефіцієнту поглинання звуку.

Крім того слід зауважити, що формально швидкість розповсюдження акустичних хвиль є функцією частоти акустичних хвиль, що відповідає терміну - дисперсія звуку. Однак, хоч і з досі невизначених причин, дисперсія звуку у воді не перевищує 1 % (на відміну від інших рідин, де може перевищувати 20 %). Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності також є залежними від структурованості води. Таким чином, члени рівняння розрахунку коефіцієнту поглинання енергії звуку (1) є залежними один від одного і тому не визначеними у повній мірі, а сама емпірична формула не має чіткого фізичного змісту.

У роботі [2] аналітично виведена формула коефіцієнту поглинання звуку у морській воді, у якій також поглинання звуку прямо пропорційне частоті у другому ступені.

Прикладне значення мають рівняння опосередкованого визначення ступеню поглинання звуку, як функції тільки показника частоти. Наприклад, зміну інтенсивності звуку залежно від відстані описують рівнянням:

$$I_x = I_0 e^{-fx}, \quad (2)$$

де I_0 – початкова інтенсивність звуку,

f – частота повздовжніх хвиль,

I_x – інтенсивність звуку на відстані x від випромінювача.

Наявність такого типу рівнянь свідчить про те, що такі аргументи розрахунку поглинання звуку як ρ , c , η , ξ , χ , C_v , C_p не є суттєвими, а можливо, і науково обґрунтованими. Однак слід враховувати, що зазначений тип емпіричних формул не забезпечує необхідну достовірність у всьому діапазоні частот - від інфразвуку до гіперзвуку. Так, для звуку в діапазоні від 60 Гц до 60 кГц коефіцієнт затухання апроксимується залежністю:

$$\alpha = 0,036f^{3/2}, \quad (3)$$

де α – коефіцієнт затухання звуку у воді, в децибелах на кілометр;

f – частота коливань звуку, в кГц.

У гіперзвуковому діапазоні виникає потреба враховувати певні додаткові процеси. У роботі [3] наводиться формула для коефіцієнту поглинання звуку (α) для частот, що перевищують 1 МГц, як функцію частоти (f), температури (T) і глибини (D):

$$\alpha = 0,00049 f^2 e^{-(T/27+D/17)} \quad (4)$$

Альтернативне рівняння, надане у роботах [4, 5], у якому налічується вже 10 констант.

Вплив релаксації на поглинання акустичної енергії.

Для води у гіперзвуковому діапазоні частот коефіцієнт поглинання звуку стає залежним від релаксації - процесу відновлення термодинамічної рівноваги середовища, порушеного через зміну тиску і температури у водному середовищі при проходженні звукової хвилі. Загальновідомо, що релаксація пов'язана з процесами на молекулярному та міжмолекулярному рівні. Вважається, що поглинання акустичних хвиль в рідинах може бути обумовлено коливальною релаксацією, структурною релаксацією, обертово-ізомерною релаксацією, дисоціацією розчинених речовин тощо. Наприклад, за незмінних температури та тиску число дисоційованих та рекомбінованих іонів у морській воді знаходиться в певній рівновазі, але в процесі розповсюдження акустичної хвилі ця рівновага порушується. В зонах підвищеного тиску ступінь дисоціації зростає, а в зонах зниженого тиску рівновага ступінь дисоціації знижується. Рекомбінація іонів потребує певного часу, внаслідок чого відновлення рівноваги запізнюється за фазою відносно хвилі тиску, тому весь процес має релаксаційний характер. Але важливо розуміти, що релаксаційне поглинання акустичних хвиль

завжди супроводжується явищем дисперсії звуку, однак у воді для гіперзвуку дисперсія така само незначна як і для звукового діапазону. Таким чином, пов'язаний з релаксацією коефіцієнт поглинання звуку, що наведений у формулі (5), також не є фізично обґрунтованим:

$$\alpha_p = (c_{\infty}^2 - c_0^2) / 2c_0^3 * \omega^2 \tau / (1 + \omega^2 \tau), \quad (5)$$

де τ – термін релаксації, c_0 – швидкість поширення звуку за низьких частот, c_{∞} – швидкість звуку за високих частот.

Всупереч цьому у роботі [6] вказується, що поглинання звуку у морській воді перевищує поглинання у прісній воді і що це пов'язано з релаксаційними процесами.

Виходячи з того, що наявність процесу релаксації визначається наявністю дисперсії звуку, можна констатувати, що для морської води процеси релаксації, у тому числі структурної релаксації, релаксації, що пов'язана з дисоціацією розчинених речовин, не є впливовими на поглинання звуку. Тобто у морській воді, у якій дисперсія звуку практично не проявляється, поглинання звуку не повинно залежати від релаксації, особливо у гіперзвуковому діапазоні частот.

Таким чином нами показано, що коректні емпіричні формули для розрахунку поглинання звуку у морській воді досі не існують. Вірніше, формул для розрахунку поглинання звуку досить багато, але їх фізична суть настільки різна, що складається враження невизначеності розуміння, що саме (який фактор чи процес) є відповідальним за затухання звуку у морській воді.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Даний аналіз базується на узагальнених даних, представлених у підручнику “Спеціальні розділи фізичної океанології” [7], та статей у напрямку гідроакустики, надрукованих у період з 2015 до 2021 р. [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Також врахована інформація з наукових джерел [3, 4, 5; 14, 15; 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22].

Нажаль, досі загальноприйнятою є хибна, з нашої точки зору, теза про те, що за умов практичної відсутності дисперсії звуку у морській воді, релаксаційні процеси в ній все таки вважаються впливовими на поглинання акустичної енергії. У розвиток цієї тези нібито експериментально визначено, що двома основними хімічними речовинами, з якими пов'язане виникнення релаксаційних процесів за певних звукових частот, є борати і сульфати магнію. Фактично без опису експериментів та обговорення (всесічного аналізу) їх результатів, вважається експериментально встановленим, що борати перестають прогресивно поглинати звук, починаючи з частоти 3,0 - 3,5 кГц, а сульфат магнію - починаючи з частоти 300 кГц. Тобто, борати поглинають акустичну енергію у звуковому діапазоні частот, а сульфати магнію - в ультразвуковому діапазоні частот. У роботі [3] наведено рівняння для розрахунку частот релаксації боратів (f_1) та сульфатів (f_2):

$$f_1 = 0,78(S/35)^{0.5} e^{(T/26)}, \quad (6)$$

де T – температура;
 S – солоність.

$$f_2 = 42 e^{(T/17)}, \quad (7)$$

де T – температура.

Зазначені частоти релаксації сульфатів та боратів входять до формули розрахунку коефіцієнту поглинання звуку [3].

$$\alpha = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{(pH-8)/0.56} + 0.52 \left(1 + \frac{T}{43} \right) \left(\frac{S}{35} \right) \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-D/6} + 0.00049 f^2 e^{-(T/27+D/17)} \quad (8)$$

Однак, слід звернути увагу на формули (6, 7) розрахунку частот релаксації, обумовлені наявністю у воді боратів та сульфату магнію. Частота релаксації сульфатів розраховується без урахування їх концентрації і є функцією виключно температури, що не є логічним. Частота релаксації боратів розраховується за даними солоності, яка згідно закону Дітмара опосередковано враховує концентрацію боратів. Але, враховуючи відсоткове співвідношення загальної концентрації солі до концентрації боратів, зазначений спосіб представлення концентрації боратів у формулі не є коректним.

Таким чином слід зазначити, що діапазон частот, у якому на поглинання звуку впливають релаксаційні процеси боратів та сульфатів, не може бути визнаний науково обґрунтованим. Наведені формули слід розглядати як такі, що не є фізично поясненими та однозначно експериментально підтвердженими, адже у зазначених діапазонах частот досі не зафіксовано фактів прояву дисперсії звуку.

Аналіз аргументів формули (8) дає змогу констатувати, що у всіх трьох складників коефіцієнту поглинання звуку фігурує частота звуку у другому ступені, яка і є головним аргументом функції. Поглинання звуку, від якого залежить дальність дії засобів гідролокації і шумопеленгації, фактично розраховується лише як функція частоти звуку (кГц), початкової амплітуди акустичної хвилі (кПа), і емпіричного коефіцієнту затухання звуку (дБ/км), який також визначається як функція частоти звуку [23].

Виявлення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. У результаті проведеного аналізу наукових досліджень, нами було констатовано суттєві обмеження теоретичних методів розрахунку поглинання звуку у морській воді та відсутність однозначно експериментально підтверджених та фізично обґрунтованих формул таких розрахунків.

У звуковому діапазоні частот процес розповсюдження акустичних хвиль в морському середовищі можна вважати адіабатичним відповідно до припущення Ньютона (без обміну енергією з тією частиною середовища, де звукова хвиля в даний момент не поширюється). Тобто, при збільшенні довжини хвилі збільшується ширина та об'єм фронтальної області з аномально високими характеристиками тиску і, відповідно, збільшується тривалість існування умов стискання/розрідження середовища. Так наприклад, на частоті 25 Гц ширина фронтальної області інтенсивного стискання морського середовища перевищує 30 м, а сам процес стискання триває до 0,1 с. А ось вже при випромінюванні акустичної енергії на мегагерцевих частотах (у міліметровому діапазоні довжин хвиль), у морському середовищі починають реєструватися об'ємні теплові молекулярні акустичні шуми. Слід зазначити, що в процесі експериментальних досліджень важко виділити частини енергії, яка губиться за рахунок виключно поглинання, чи виключно за рахунок розсіяння. З цієї причини, з метою досягнення практичних цілей, було знехтувано фізичною суттю процесів та введено хибне поняття коефіцієнту затухання, що характеризує сумарне ослаблення звуку в певних діапазонах частот [24].

Враховуючи усі перераховані протиріччя (чи вірніше невизначеності) можна констатувати, що процеси релаксації, зміни в'язкості та структурованості можуть бути впливовими на швидкість розповсюдження звуку, але не на його ослаблення у морській воді. Цей факт опосередковано підтверджується тим, що всупереч негативному впливу релаксації, в'язкості, іншим процесам та властивостям води, звук у морській воді, на відміну від інших речовин, здатен розповсюджуватися на тисячі кілометрів, а інфразвук розповсюджується на більші відстані у порівнянні з ультразвуком.

Постановка задачі та її розв'язання. Сучасний стан науки у напрямку дослідження процесів поглинання звуку в океані потребує висунення та опрацювання принципово нових гіпотез з фізики процесів поглинання звуку. Такі гіпотези повинні враховувати те, що:

- довгі акустичні хвилі розповсюджуються на більші відстані;
- дисперсія звуку у морській воді проявлена лише для нижнього діапазону інфразвуку;
- інфразвукові та звукові хвилі розповсюджуються у морській воді адіабатично.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нами у 2019 році було зроблене допущення (висунута гіпотеза), що в процесі розповсюдження хвилі поглинання її енергії протягом одного циклу є константою, тобто не залежить від частоти хвилі. Таким чином, для кожної частоти поглинання звуку на дистанції, яка вимірюється однаковою кількістю циклів (довжин хвиль) також є константою. В таблиці 1 наведені дані про експериментально визначені приблизні кількісні оцінки дальності розповсюдження акустичних хвиль, що відрізняються за ознакою довжини [25].

Таблиця 1 – Дальність дії гідроакустичних систем залежно від довжини хвилі [25] з розрахунками авторів (стовпчик 4)

Частота акустичного сигналу (кГц)	Довжина хвилі акустичного сигналу (м)	Дальність дії (м)	Дальність дії (цикл)
1	2	3	4
0,1	15,3	≥ 1000000	66666
1	1,53	≥ 100000	66666
10	0,153	10000	66666
25	0,061	3000	50000
50	0,031	1000	33333
100	0,015	600	40000
500	0,003	150	50000
1000	0,002	50	33333

Слід зазначити що похибка визначення кількісної оцінки якоїсь величини (у даному випадку дальності розповсюдження акустичних хвиль) збільшується зі зменшенням її абсолютного значення. Можливо тому, для довжин хвиль, що вимірюються від десятків метрів до 15 см, дальність дії гідроакустичних засобів складає 66666 циклів, а для хвиль з меншою довжиною починає коливатися від 50000 до 33333 циклів. Відповідно до таблиці 1 можна висунути постулат про те, що дальність розповсюдження звуку у воді оцінюється 66666 циклами довжини акустичної хвилі. Це дозволяє стверджувати, що для морської води поглинання акустичної енергії на одному циклі однакове для акустичних хвиль незалежно від довжини хвилі і, відповідно, незалежно від частоти коливань. Тоді виникає можливість теоретичного перерахунку дальності дії гідроакустичних систем відповідно до довжини акустичної хвилі, на якій вони працюють. Результати розрахунків представлені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Дальність дії гідроакустичних систем залежно від робочої довжини хвилі

Частота акустичного сигналу (кГц)	Довжина хвилі акустичного сигналу (м)	Дальність дії теоретична (м)
1	2	3
0,01	153	10 199 898
0,025	61,2	4 079 959
0,05	30,6	2 039 979
0,075	20,4	1 369 986
0,1	15,3	1 019 989
0,125	12,24	815 991
0,250	6,12	407 995
0,5	3,06	203 997
0,75	2,04	135 998
1	1,53	101 998
5	0,306	20 399
10	0,153	10 200
25	0,061	4 066
50	0,031	2 066
100	0,015	1 000
500	0,003	200
1000	0,002	133

Розглянемо відповідність теоретично визначених значень максимальної дальності розповсюдження звуку експериментально зафіксованим оціночним значенням для акустичних хвиль різної довжини (рис.1).

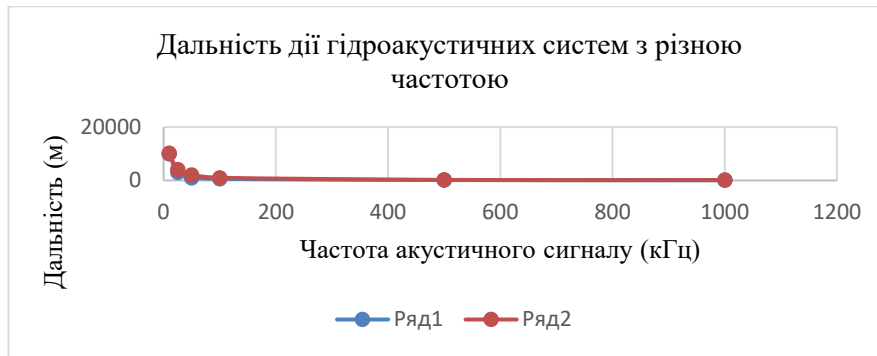


Рисунок 1 – Дальність дії гідроакустичних систем (розрахована – червона; експериментальна – синя) залежно від довжини хвилі (наведено діапазон 10 - 1000 кГц).

Для 10 кГц теоретична дальність складає 10,2 км, а експериментальна оцінка - 10 км; на частоті 500 кГц - 0,2 км і 0,15 км відповідно. Слід звернути увагу, що суттєвою різницею у бік зменшення експериментальних значень дальності дії гідроакустичних систем залежно від довжини хвилі відносно теоретичних, характеризується ультразвуковий діапазон частот 25 - 100 кГц. У цьому частотному діапазоні знаходяться резонансні частоти газових бульбашок різного розміру, що можуть бути у морському середовищі. Вони не враховуються у теоретичних розрахунках, але негативно впливають на експериментальні данні, бо під час виконання гідроакустичного експериментального оцінювання дальності дії гідроакустичного засобу, усунути вплив бульбашок практично неможливо. За результатами наших експериментів, які були проведені в натурних умовах в 2019 р. видно, що опромінювання води ультразвуком протягом певного часу призводить до дегазації води, тобто, створення газових бульбашок, які послаблюють звук за рахунок його поглинання та розсіяння, що фізично не є процесом поглинання звуку саме морською водою як субстанцією.

Висновки. Вважається загальновідомим, що дальність розповсюдження акустичних хвиль залежить від їх частоти. В результаті виконаних досліджень показано, що існуючий кореляційний зв'язок між дальністю розповсюдження акустичних хвиль і їх частотою є хибною кореляцією. Навігаційне забезпечення судноплавства базується на штатних гідроакустичних приладах судна, засобах донної інфраструктури, позиціонування та зв'язку, берегових та донних засобах висвітлення підводної обстановки. Гідроакустичні засоби гідролокації та шумопеленгації працюють у різних частотних діапазонах. Акустичні хвилі звукового та інфразвукового частотного діапазону використовуються для звукопідводного зв'язку, тому що мають дальність розповсюдження, що вимірюється в кілометрах. Недоліком звукового та інфразвукового каналу зв'язку є його низька пропускна здатність. Передачу великих об'ємів інформації забезпечують ультразвукові канали зв'язку. Недоліком ультразвукового каналу зв'язку є мала дальність розповсюдження звуку, що обмежена сотнями метрів. В напрямку гідролокації ультразвукові прилади забезпечують, на відміну від звукового діапазону, значну просторову розподільчу здатність, але на обмеженій відстані. Таким чином особливості фізики розповсюдження звуку з різною частотою на різну дальність не сприяють уніфікації засобів зв'язку та гідролокації. Причина зазначених особливостей розповсюдження акустичних хвиль у морській воді розглядається у зазначеній статті вперше, що має пріоритетне значення для навігації та підводного сегменту автономного сегменту ідентифікації АІС.

У роботі нами розглянуті проблеми впливу на дальність розповсюдження акустичних хвиль в'язкості морської води та процесів дисоціації - рекомбінації розчиненої речовини, що супроводжуються порушенням термодинамічної рівноваги системи. Критичний огляд цього впливу на процес затухання звуку показав фізичну необґрунтованість такого підходу до визначення дальності розповсюдження звуку у морському середовищі. Результатами наших розрахунків вперше визначено, що для всього діапазону

частот акустичних хвиль дальність їх розповсюдження, що виміряна не у одиницях виміру відстані, а у циклах, є константою: однакова кількість циклів відповідає однаковому поглинанню акустичної енергії. І ця кількість циклів нами оцінена у 66666. За рахунок різниці довжин акустичних хвиль, дальність розповсюдження звуку визначається довжиною хвилі, яка для умов практичної відсутності дисперсії звуку у воді, має статистичний зв'язок з частотою хвилі. За рахунок цього у дослідників склалося хибне враження про залежність дальності розповсюдження звуку від частоти. Але наявність кореляції у даному випадку не пов'язана з наявністю причинно наслідкового зв'язку між частотою акустичних хвиль і дальністю їх розповсюдження. Таким чином, вперше представлено підґрунтя для повноцінного переосмислення теорії процесу поглинання енергії акустичних хвиль у воді. Означений нами підхід може бути правомірним і для інших типів хвиль у воді чи інших середовищах.

Література

1. Беруков Ю. Ф. Поглощение и рассеяние звука в море. Реверберация. *Океанология. Часть I. Физические явления и процессы в океане*. С. 29 URL <https://studfile.net/preview/1093214/page:29/> (дата звернення 10.12.2024).
2. Шулейкин В.В. *Физика моря*, Наука, Москва, 1968 г., 1090 с.
3. Ainslie M. A., McColm J. G., A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water, *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3), 1671-1672, Mar.1998.
4. Francois RE, Garrison GR Sound absorption based on ocean measurements: *Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions* *The Journal of the Acoustical Society of America* 72, 896-907, 1982; doi:10.1121/1.388170
5. Francois RE, Garrison GR Sound absorption based on ocean measurements. *Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption* *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6), 1879-1890, 1982 doi:10.1121/1.388673
6. Енциклопедія фізики і техніки URL: http://femto.com.ua/articles/part_2/2919.html (дата звернення 15.12.2024).
7. Михайлов В.І., Кучеренко Н.В. *Спеціальні розділи фізичної океанології: підручник* – Одеса : Екологія, 2011.– 238 с. ISBN 966-87407-6-3: 24.00.
8. Гладких І.І., Капочкін Б.Б., Кучеренко Н.В., Капочкіна М.Б. Вплив аномальних властивостей води на гідроакустичні технології. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» № 7 (1229) 2017, с. 164-172 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23
9. Гладких И.И., Капочкина М.Б., Зорин В.Ю. Современный уровень технологий, использующих гидроакустические методы для обеспечения навигации и морских поисково-спасательных работ. *Первый независимый научный вестник «технические науки»* №1/2015, Т. 2000, - с. 47-54.
10. Гладких І.І., Кучеренко Н.В., Капочкіна М.Б., Зорін В.Ю. Перспективы технологий, использующих гидроакустические методы, для обеспечения навигации и морских поисково-спасательных работ. *«Первый независимый научный вестник (технические науки) №2/2015»* Т. 2000, - с. 60-66.
11. Гладких І.І., Н.В. Кучеренко, М.Б. Капочкіна, Нізамутдінов І.Ф. Причини виникнення підводного звукового каналу *збірник наукових праць науково-дослідного центру Збройних Сил України «Державний океанаріум»* № 1 (2) - Одеса: Фенікс, 2018. - С.194 – 206.
12. Кучеренко Н.В., Капочкін Б.Б., Капочкіна М.Б., Барган О.Г Проблемні питання застосування гідроакустичних засобів гідролокації та пеленгації підводних цілей *Збірник наукових праць науково-дослідного центру Збройних Сил України «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»* № 1 (3) – 2020, Одеса. С. 124-131.
13. Капочкіна М.Б, Гладких І.І., Кучеренко Н.В Математичне моделювання акустичного поля корабля. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Графічні технології моделювання об'єктів, процесів та явищ», (23-24квітня 2020 року – Одеса)*. м. Одеса. С.39
14. Михайлов И. Г., Соловьев В. А., Сырников Ю. П., Основы молекулярной акустики, том XII вып. 1 М., 1964 год.

15. Мэзона У. Физическая акустика, том 2, часть А и Б, М., 1968-69.
16. Herzfeld K.F., Litovitz T.A., Absorption and dispersion of ultrasonic waves, 1st Edition - January 1, 1959, eBook ISBN: 9781483275703.
17. Вадов Р.А. Поглощение и затухание низкочастотного звука в морской среде *Акустический журнал*, 2000, том 46, № 5, 1999 год С. 624 -631.
18. Ерохин Н.Ф. Изучение свойств воды в критической области акустическими методами *Вестник Таганрогского института имени А. П. Чехова* раздел 4. С. 96-101.
19. Протасов В.Р. Особенности распространения и излучения звука в воде Биоакустика рыб. – М.: Наука, 1965. – 208 с. URL: <https://collectedpapers.com.ua/ru/bioacoustics-of-fishes/osoblivosti-poshirennyata-viprominyuvannya-zvuku-u-vodi> (дата звернення 10.01.2025).
20. Fisher F. and Simmons V., Sound absorption in sea water, *J. Acoustic. Soc. Am.*62, 558—564 (1977) doi:10.1121/1.381574.
21. Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. and Sanders J.V. (1982) *Fundamentals of Acoustics*. 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
22. Мандельштам Л. И., Леонтович М. А., К теории поглощения звука в воде, «ЖЭТФ», 1937, т. 7, в. 3, 438 с.
23. Митько А.В., Попов Н.Н. Лабораторный практикум по дисциплине «Морские информационные системы». – СПб.; РГГМУ, 2013. – 64 с. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_4f5f0a12f8f24a6a91407edf50774d41.pdf (дата звернення 20.01.2025).
24. Лисютин В. А., Ярошенко А.А. Вертикальное распределение скорости звука в океане *Севастопольский национальный технический университет* URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/10720/1/12%2858%29_1_13.doc (дата звернення 01.02.2025).
25. Калькулятор звукової частоти та довжини хвилі URL: <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/sound-frequency-wavelength/> (дата звернення 01.02.2025).

REFERENCES

1. Berukov Yu. F. Absorption and scattering of sound in the sea. Reverberation. Oceanology. Part I. Physical phenomena and processes in the ocean. pp. 29 URL: <https://studfile.net/preview/1093214/page:29/> (date of application 10.12.2024)
2. Shuleikin V.V. *Physics of the sea*, Nauka, Moscow, 1968, 1090 p.
3. Ainslie M. A., McColm J. G., A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water, *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3), 1671-1672, Mar.1998.
4. Francois RE, Garrison GR Sound absorption based on ocean measurements: *Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions* *The Journal of the Acoustical Society of America* 72, 896-907, 1982; doi:10.1121/1.388170
5. Francois RE, Garrison GR Sound absorption based on ocean measurements. *Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption* *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6), 1879-1890, 1982 doi:10.1121/1.388673
6. *Encyclopedia of physics and technology* URL: http://femto.com.ua/articles/part_2/2919.html (date of application 15.12.2024).
7. Mykhaylov V.I., Kucherenko N.V. *Special sections of physical oceanology: textbook* - Odesa: Ekologiya, 2011. - 238 p. . ISBN 966-87407-6-3: 24.00.
8. Gladkikh I.I., Kapochkin B.B., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B. The influence of anomalous properties of water on hydroacoustic technologies *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. Series: "New solutions in modern technologies" No. 7 (1229) 2017, p. 164-172 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23
9. Gladkikh I.Y., Kapochkina M.B., Zorin V.Yu. Modern level of technologies using hydroacoustic methods for navigation and marine search and rescue operations *First independent scientific journal "Technical sciences"* No. 1/2015, Vol. 2000, - p. 47-54.

10. Gladkikh I.I., Kucherenko N.V., Kapochkina M.B., Zorin V.Yu. Perspectives of technologies using hydroacoustic methods to ensure navigation and marine search and rescue operations "First independent scientific journal (technical sciences) No. 2/2015" Vol. 2000, - p. 60-66.
11. Gladkikh I.I., N.V. Kucherenko, M.B. Kapochkina, Nizamutdinov I.F. The causes of the underwater sound channel, a collection of scientific works of the research center of the Ukrainian Armed Forces "State Oceanarium" No. 1 (2) - Odesa: Phoenix, 2018. - P.194 - 206.
12. Kucherenko N.V., Kapochkin B.B., Kapochkina M.B., Bargan O.G. Problematic issues of the use of hydroacoustic means of hydrolocation and direction finding of underwater targets. Collection of scientific works of the research center of the Ukrainian Armed Forces "State Oceanarium" of the Military Institute - Maritime Forces of the National University "Odesa Maritime Academy" No. 1 (3) - 2020, Odesa, - P. 124-131.
13. Kapochkina M.B., Gladkikh I.I., Kucherenko N.V. Mathematical modeling of the acoustic field of a ship. Collection of theses of reports of the International Scientific and Practical Conference "Graphic Technologies for Modeling Objects, Processes and Phenomena", (April 23-24, 2020 - Odesa). Odesa. - P.39
14. Mykhailov I.G., Solov'ev V.A., Symikov Yu.P., Fundamentals of molecular acoustics, volume XII, issue 1 M., 1964 h.
15. Mazona U. Physical acoustics, volume 2, part A and B, M., 1968-69.
16. Herzfeld K.F., Litovitz T.A., Absorption and dispersion of ultrasonic waves, 1st Edition - January 1, 1959, eBook ISBN: 9781483275703.
17. Vadov R.A. Absorption and attenuation of low-frequency sound in the marine environment Acoustic journal, 2000, volume 46, number 5, 1999 p. 624-631.
18. Erokhin N.F. Study of the properties of water in the critical region by acoustic methods Bulletin of the Taganrog Institute named after A.P. Chekhov Radel 4, pp. 96-101.
19. Protasov V.R. Peculiarities of propagation and emission of sound in water Bioacoustics of fish. - M.: Nauka, 1965. - 208 p. URL: <https://collectedpapers.com.ua/ru/bioacoustics-of-fishes/osoblivosti-poshirennya-ta-viprominyuvannya-zvuku-u-vodi> (date of application 10.01.2025).
20. Fisher F. and Simmons V., Sound absorption in sea water, J. Acoustic. Soc. Am.62, 558—564 (1977) doi:10.1121/1.381574.
21. Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. and Sanders J.V. (1982) Fundamentals of Acoustics. 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
22. Mandelstam L. I., Leontovich M. A., To the theory of sound absorption in water, ZhETF, 1937, v. 7, v. 3, 438 p.
23. Mytko A.V., Popov N.N. Laboratory workshop on the discipline "Marine Information Systems". – St. Petersburg; RGSMU, 2013. – 64 p. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_4f5f0a12f8f24a6a91407edf50774d41.pdf (date of application 20.01.2025).
24. Lysyutin V. A., Yaroshenko A. A. Vertical distribution of sound speed in the ocean Sevastopol National Technical University URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/10720/1/12%2858%29_1_13.doc (date of application 01.02.2025)
25. Sound frequency and wavelength calculator URL: <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/sound-frequency-wavelength/> (date of application 01.02.2025).

Kucherenko N., Kapochkin B., Kapochkina M.

APPLIED ASPECTS OF THE LAW OF THE PROCESS OF ABSORPTION OF ACOUSTIC WAVE ENERGY IN WATER

Navigation support for shipping is based on the standard hydroacoustic devices of the ship, means of the bottom infrastructure of positioning and communication, shore and bottom means of lighting the underwater situation. Hydroacoustic sonar and direction finding facilities operate in different frequency ranges. The purpose of the study is to determine the physical reasons for changes in the propagation range of an acoustic signal depending on the frequency of the emitter. The problems of the influence of the viscosity of the water medium on the propagation distance of acoustic waves, the influence of relaxation processes on the absorption of acoustic energy (dissociation - recombination of a dissolved substance due to a violation of the thermodynamic equilibrium of the system) are critically considered. It is shown that correct empirical formulas for calculating sound absorption in seawater still do not exist, because their physical essence is so different that there is an impression of uncertainty in understanding what exactly (which factor or process) is responsible for the attenuation of sound in seawater. The results of the calculations determined for the first time that for the entire frequency range of acoustic waves, the range of their propagation, which is measured not in units of measurement of distance, but in cycles, is a constant. The same number of cycles corresponds to the same absorption of acoustic energy. The range of sound propagation is determined by the wavelength, which for the conditions of the practical absence of sound dispersion in water is related to frequency, but only statistically, not physically. Due to this, a false impression was formed about the dependence of the sound propagation distance on the frequency. Thus, for the first time, the basis for a complete rethinking of the theory of the process of absorbing the energy of acoustic waves in water is presented. The defined approach may be valid for other types of waves in other environments.

Keywords: *navigation support for shipping; absorption of wave energy; hydroacoustics; sound propagation distance; wavelength; wave frequency; sound relaxation; dispersion of the sound; sound absorption coefficient.*

Стаття прийнята 15.03.2025