

УДК 551.466.66

Анахов П. В.

ДП "НЕК "Укренерго", м. Київ

РУХ ВУЗЛОВОЇ ЛІНІЇ ЗАТУХАЮЧИХ ПРИБЕРЕЖНИХ СЕЙШ

Ключові слова: зсув вузлової лінії; напівзамкнутий басейн; прибережні сейші; сейшова течія; циркуляція течії.

Вступ. Водоймам властиві коливання стоячих хвиль (сейш), довжина λ і період T яких є функціями морфометричних характеристик басейну, зокрема довжини L і глибини D басейну. Звертає на себе увагу розподіл водойм на замкнуті (озера) і напівзамкнуті (бухти). Основною відмінною рисою є чверть-періодна різниця між довжинами їх хвиль, причому нижчою модою напівзамкнутого басейну є нульова, чверть періоду якої укладається в довжину водойми. Судячи з цього, вузлова лінія повинна перетинати гирло бухти [1].

Проте, повідомляється про формування вузла прибережних сейш поза межами бухти, у відкритому морі [1, 2], як це показано на рис. 1.

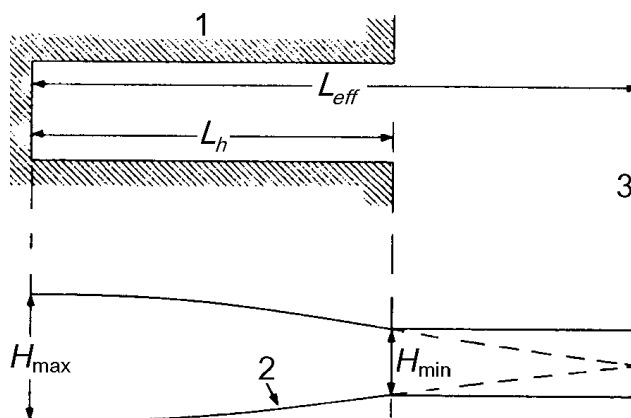


Рис. 1. Нульова мода сейш у напівзамкнутому басейні: 1 – план бухти, де L_h , L_{eff} – фізична і ефективна довжини бухти, відповідно; 2 – профіль хвилі, де H_{max} , H_{min} – максимальна і мінімальна висоти хвилі в бухті, відповідно; 3 – вузлова лінія [2]

Ефективна довжина напівзамкнутої акваторії є функцією швидкості поширення сейш і їх періоду. Вона розраховується за формулою [2]:

$$L_{eff} = V_w \frac{T}{4}. \quad (1)$$

Мінімальна висота хвилі в залежності від максимальної [2]:

$$H_{min} = H_{max} \cos\left(\frac{2\pi L_h}{V_w T}\right). \quad (2)$$

Горизонтальна швидкість поширення довгоперіодних стоячих хвиль розраховується за формулою [1-6]:

$$V_w = \sqrt{gD}, \quad D \ll \lambda, \quad (3)$$

де $g=9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Повідомляється про приріст періоду сейшових хвиль, зумовлений їх затуханням [7].

Метою статті є дослідження можливих змін ефективної довжини напівзамкнутого водного басейну, зумовлених затуханням сейш, і визначення наслідків цього явища.

Автор не має інформації щодо досліджень описаного феномену.

Методика. Виходячи з положення про залежність ефективної довжини водойми від періодів затухаючих сейшових хвиль (див. формулу (1)), розглядатимемо зміни у водному середовищі (амплітуда A і період T коливань; ефективна довжина бухти L_{eff}) в інтервалі часу коливань t . Для цього визначимо характерні миттєвості – час початку коливань t_0 ; час релаксації коливань t_d ; деякий час завершення коливань t_r .

За час релаксації коливань t_d висота хвилі H зменшується в e разів від початкової H_0 [8]:

$$H_d = \exp(-1)H_0. \quad (4)$$

За час завершення коливань приймемо час реверберації, за який інтенсивність коливань зменшується в 10^6 разів, а рівень – на 60 дБ [9]:

$$H_r = 10^{-6} H_0. \quad (5)$$

На кінець інтервалу релаксації t_d період коливань T_d становитиме [8]:

$$T_d = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 - \beta^2}}, \quad (6)$$

де T_0 – початковий період коливань нульової моди; β – коефіцієнт затухання.

Оцінимо приріст періоду сейш функцією виду [7]:

$$T_t = T_0 \exp(k_T t), \quad (7)$$

де T_t – період коливань в довільний момент часу; $k_T = \beta \ln(T_d/T_0)$ – коефіцієнт періоду затухаючих сейш.

Тоді формула (1) перепишеться наступним чином:

$$L_{eff_t} = V_w \frac{T_t}{4}. \quad (8)$$

Остаточно, зміна ефективної довжини бухти за рахунок приросту періоду сейш на довільний момент часу t становитиме:

$$\Delta L_{eff}(T) = L_{eff_t} - L_{eff_0} \quad (9)$$

$\Delta L_{eff}(T)$ – зсув вузлової лінії за рахунок зростання періоду сейш.

Проте, поширення хвилі зі швидкістю V_w не є єдиною в системі горизонтальних рухів сейшових коливань. Т. Кравець у своїй теорії поширення сейш по річці [5] розглядає витрату води через живий переріз, як суму двох швидкостей – власне поширення хвилі V_w і течії річки V :

$$Q = (V_w + V)WA \quad (10)$$

де $A=H/2$; A – амплітуда коливань; W – ширина басейну.

Амплітуда хвиль у будь-який момент часу розраховується за формулою [1, 8]:

$$A_t = A_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t), \quad (11)$$

де $A_t=H/2$; A_0 – амплітуда на початку коливань $t=0$; $\omega=2\pi/T$ – кутова частота коливань.

В нашому випадку до руху хвиль у бік відкритого моря додаються властиві прибережними сейшам рухи води з бухти і назад [6, 10, 11].

На рис. 2 показано горизонтальні циркуляції води, які утворюються під дією вертикальних коливань (хвиль).

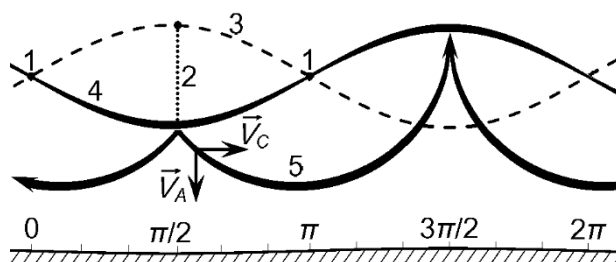


Рис. 2. Коливання стоячої хвилі на ділянці довжиною більше довжини хвилі 2π нестратифікованої водойми: 1, 2 – вузли і пучності, відповідно; 3 – амплітуда падаючої хвилі в момент часу $t=0$; 4 – амплітуда відбитої хвилі, без втрат, в момент часу $t=\pi$; 5 – напрямок течії безпосередньо перед досягненням хвилею максимуму в пучності ($t \rightarrow \pi$); \vec{V}_A , \vec{V}_C – вертикальна і горизонтальна складові коливань, відповідно (з [12], змінений)

Сейша з часовим інтервалом її півперіоду π змінює напрям коливань на протилежний.

Таким чином, до горизонтального переміщення хвилі додаються незалежні від нього циркуляції течії. Швидкість горизонтальних циркуляцій сейшової течії (коливального руху води на вузловій лінії) розраховується за формулою [1, 3, 4]:

$$V_C = A_t \sqrt{\frac{g}{D}} = A_0 \sqrt{\frac{g}{D}} \exp(-\beta t) \cos(\omega t). \quad (12)$$

Функцію пройденого стовпом води в околиці вузлової лінії шляху $L_C=V_C t$ складають відрізки одиночних прямих і зворотних коливань, як це показано на рис. 3.

Згідно умови (11), амплітуда хвилі протягом інтервалу часу $t=t_0 \div \pi$ падає, зменшуючись від максимуму позитивного значення до мінімуму негативного. Течія в цей час прямує в сторону відкритого моря, спочатку зростаючи до найбільшого свого значення, потім – спадаючи до нуля. Протягом наступного півперіоду $t=\pi \div 2\pi$

течія прямує в сторону берега. За рахунок згасання амплітуди хвилі течія згасає (див. формулу (12)); пройдений за цей час шлях зменшується по відношенню до попереднього згідно умови $LC=VCt$. Такі цикли згасаючих амплітуд/течій повторюються до повного згасання коливань. Оскільки функція амплітуди згасаючих хвиль несиметрична по відношенню до нульового рівня моря, вона стає причиною несиметричних по відношенню до вузлової лінії коливань згасаючої течії і, відповідно, зсуву вузлової лінії у відкрите море.

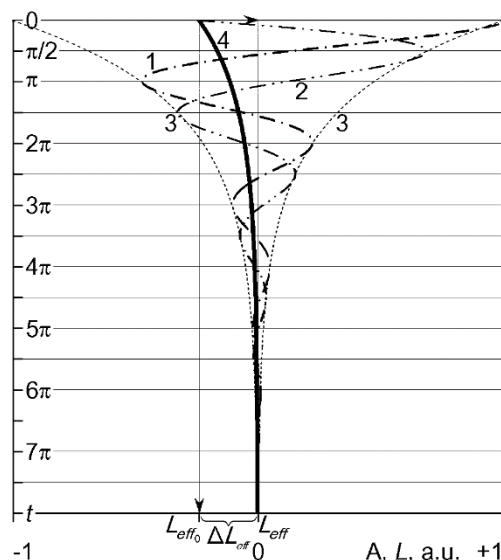


Рис 3. Рух вузлової лінії згасаючих прибережних сейш під дією горизонтальних циркуляцій води: 1 – амплітуда згасаючих коливань; 2 – варіації пройденого течією шляху в околицях вузлової лінії; 3 – огинаюча амплітуди і шляху; 4 – зсув вузлової лінії

Приріст ефективної довжини бухти на довільний момент часу t є результатом обчислення інтегралу від швидкості течії:

$$\Delta L_{eff_t}(V_C) = \int_{t_0}^{t_{res}} v_C(t) dt = k_A \exp(-\beta t) \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right) + \Delta L_{eff}(V_C) \exp(-\beta t) \cos\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right), \quad (13)$$

де k_A – коефіцієнт амплітуди згасаючих сейш; $\Delta L_{eff}(V_C)$ – зсув вузлової лінії за рахунок коливального руху (за рахунок циркуляції сейшової течії).

Сумарний зсув розраховується за формулою:

$$\Delta L_{eff}(T, V_C) = \Delta L_{eff}(T) + \Delta L_{eff}(V_C). \quad (14)$$

Область дослідження і дані. Розглянемо рух вузлової лінії згасаючих прибережних сейш на прикладі напівзамкнутого басейну, бухти порту Сьюдадела (Ciudadella), Іспанія. Довідкові дані водойми представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Довідкові дані бухти порту Сьюдадела

Параметр	Значення
Довжина бухти L_h , м [1]	1 000,0
Середня глибина \bar{D} , м [1]	5,0
Період на початку коливань T_0 , с [1]	630
Коефіцієнт згасання β , c^{-1} [7]	$0,951 \times 10^{-3}$
Час релаксації t_d , с [7]	1 052

Результати числового аналізу. В табл. 2 зведені результати розрахунків щодо зсуву вузлової лінії затухаючих прибережних сейш.

Таблиця 2. Результати розрахунків щодо зсуву вузлової лінії затухаючих сейш в бухті порту Сьюдадела

Параметр	Значення
Горизонтальна швидкість руху хвилі V_w , за незмінної середньої глибини \bar{D} , м/с	7,0
Час реверберації t_r , с	14 533
Коефіцієнт зростання періоду k_T , од.	$2,74 \times 10^{-3}$
Коефіцієнт амплітуди затухаючих сейш k_A , м	139,2
Зсув вузлової лінії за рахунок коливального руху (циркуляції сейшової течії) $\Delta L_{eff}(V_C)$, м	13,3
Пройдений хвилею за час релаксації шлях L_d , км	7,4
Пройдений хвилею за час реверберації шлях L_r , км	101,8

Коливання затухаючих сейш в бухті порту Сьюдадела показані на рис. 4.

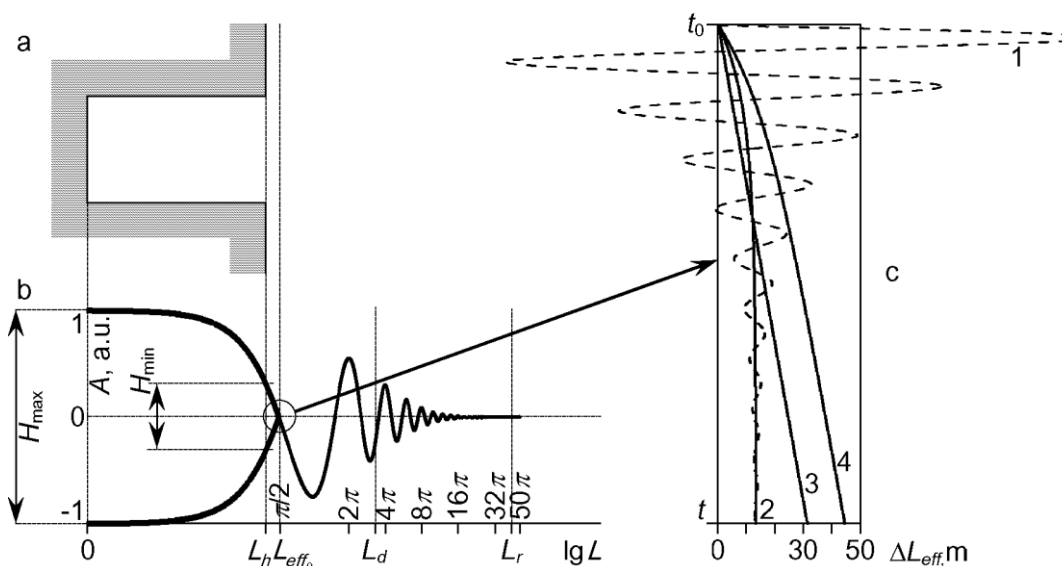


Рис. 4. Коливання затухаючих прибережних сейш в бухті порту Сьюдадела: **а** – план бухти; **б** – профіль нульової моди (позначення як на рис. 1); **с** – зсув вузлової лінії, де **1, 2** – варіації ефективної довжини бухти (горизонтальні коливання) і зсув за рахунок коливального руху, відповідно, **3** – зсув за рахунок зростання періоду сейш, **4** – сумарний зсув вузлової лінії

Затухання коливань на 60 дБ відбудеться за час реверберації $t_r = H_r \ln(H_r / H_0) / (-\beta) = 14\,533 \text{ с} = 4 \text{ год. } 2 \text{ хв. } 13 \text{ с}$ (див. рис. 4б). За цей час хвиля здійснить 21 повне коливання (42π) на шляху довжиною $L_r = V_w t = 101,8 \text{ км}$, що більш ніж у 100 разів перевищує довжину бухти L , в якій хвиля зародилася ($L_r \gg L_h$).

Зсув вузлової лінії показано на інтервалі часу $10T$ (див. рис. 4с), протягом якого амплітуда хвилі зменшується на -26,8 дБ (до $2,11 \times 10^{-3} H_0$).

Обговорення результатів. Дослідження показали приріст ефективної довжини водного басейну. Причому, виявлено два самостійні процеси, відповідальні за це, із порівняними результатами.

По-перше, ефективна довжина бухти зростає при горизонтальному поширенні сейш в сторону відкритого моря, за рахунок приросту періоду. В табл. 3 представлені значення періодів хвиль в характерні моменти, – на початку коливань t_0 , в час релаксації t_d і час реверберації t_r , – а також зсув вузлової лінії за рахунок зростання періоду сейш.

Таблиця 3. Порівняльні значення показників зсуву вузлової лінії затухаючих сейш в бухті порту Сьюдадела в характерні моменти часу

Параметр	Значення в момент:			
	t_0	$t_d \approx 1,7T$	$t_r = 10T$	$t_r \approx 21,7T$
Період хвилі T , с	630,0	632,9	648,0	671,0
Зсув вузлової лінії за рахунок зростання періоду сейш $\Delta L_{eff}(T)$, м	0,0	5,0	31,5	71,8
Зсув вузлової лінії за рахунок циркуляції сейшової течії $\Delta L_{eff}(V_C)$, м	0,0	8,4	13,2	13,3
Сумарний зсув вузлової лінії $\Delta L_{eff}(T, V_C)$, м	0,0	13,4	44,7	85,1

По-друге, вузол переміщується при реверсивних коливаннях затухаючої течії, за рахунок несиметричних по відношенню до вузлової лінії коливань. Результати розрахунків представлені в табл. 3.

Виконані дослідження дозволяють зробити попередні висновки щодо наслідків дії затухаючих прибережних сейш.

1. В міру поширення сейшових коливань, за межами бухти виникають ділянки течії змінних напрямків довжиною півперіоду коливань; при цьому відбійну течію сейшового походження з часом, що дорівнює півперіоду коливань, змінює прибійна.

2. За рахунок затухання сейшових хвиль зростає їх період; проте зменшуються амплітуда, швидкість і довжини пройденого супутньою течією шляху.

3. За рахунок зсуву вузлової лінії все, що потрапляє в сейшову течію, відносить від берега.

Наукова новизна. На основі отриманих даних висунуто гіпотезу щодо зсуву вузлової лінії затухаючих прибережних сейш в напрямі відкритого моря, яка полягає в тому, що величина зсуву, по-перше, пропорційна зростаючому періоду сейш і обумовлена їх рухом від берегової лінії, по-друге, пропорційна спадаючій швидкості течії сейш і обумовлена одиночними рухами води, що скорочуються по довжині і періодично змінюють напрям на протилежний.

Практична значущість. Виявлено небезпеку зсуву вузлової лінії затухаючих прибережних сейш. Небезпека полягає в тому, що плавців і плавзасоби, які потрапляють в сейшову течію, відносить від берега.

Отримані результати можуть бути використані для побудови карт сейшових течій. Це дозволить якщо не повністю запобігти їх негативній дії, то принаймні зменшити негативні наслідки. Робота знайде застосування при проектуванні гідротехнічних споруд та оптимізації їх роботи; розробці рекомендацій для пловців і водного транспорту.

Все це також стосується вкрай небезпечних для портів, які побудовані в захищених від хвилювання моря напівзамкнених басейнах, стоячих хвиль іншого типу – тягуну.

Висновки. Вважається, що бухта являє собою резонатор, який має стійку просторову структуру положення пучностей і вузлових ліній хвильової поверхні.

На основі отриманих даних висунуто гіпотезу щодо руху вузлової лінії затухаючих прибережних сейш в напрямі відкритого моря. Зсув вузлової лінії можуть обумовлювати щонайменше дві незалежні причини:

- зростання періоду хвилі, що рухається в сторону відкритого моря;
- одиночні реверсивні рухи течії, що скорочуються по довжині пропорційно спадаючій амплітуді хвиль.

Розроблено метод розрахунку зсуву вузлової лінії затухаючих прибережних сейш, який випробувано на прикладі бухти порту Сьюдадела.

Виявлено небезпеку зсуву вузлової лінії, яка полягає в тому, що плавців і плавзасоби, які потрапляють в сейшову течію, відносить від берега. Грамотна оцінка поведінки течії дозволить якщо не повністю запобігти її негативній дії, то принаймні зменшить негативні наслідки. Це також стосується вкрай небезпечного для портів тягуну.

Список літератури

1. *Rabinovich A. B.* Seiches and Harbor Oscillations / Handbook of Coastal and Ocean Engineering (ed. by Y. C. Kim). Singapoure: World Scientific Publ., 2009. P. 193-236. 2. *Forrester W. D.* Canadian Tidal Manual. Ottawa: Department of fisheries and oceans, 1983. 138 p. 3. *Судольский А. С.* Динамические явления в водоемах. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 263 с. 4. Волны, течения и водные массы водоемов. Конспект лекций / Под ред. проф. Б. Б. Богословского. Л.: Ленинградский гидрометеорологический институт, 1980. 57 с. 5. *Кравец Т. П., Топорец А. С.* Распространение байкальских сейш по реке Ангаре. Труды по физике. М.-Л.: изд-во АН СССР, 1959. с. 273-295. 6. *Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В.* Исследование сейшевых колебаний в бухте со свободным входом. Морской гидрофизический журнал, 2017. №4. С. 16-25. DOI: 10.22449/0233-7584-2017-4-16-25. 7. *Анахов П. В.* Гліссандо затухаючих сейш. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2018. № 1 (48). С. 67-73. 8. *Огурцов А.Н.* Физика для студентов. Колебания и волны. URL: <https://sites.google.com/site/anogurtsov/lectures/phys>. 9. Терминологический словарь по строительству на 12 языках: СНиП. [Чинний від 1986-01-01]. М.: Русский язык, 1986. 3015 с. 10. *Лоскутов А. В.* Динамика волн цунами в северо-западной части Тихого океана на основе инструментальных измерений и численного моделирования: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.29 "Физика атмосферы и гидросферы". Южно-Сахалинск, 2016. 115 с. 11. *Железняк М. И., Кантаржи И. Г., Сорокин М. В., Поляков А. И.* Резонансные характеристики акваторий морских портов. Инженерно-строительный журнал. 2015. №5. С. 3-19. DOI: 10.5862/MCE.57.1. 12. *Анахов П.В.* Сейшовий механізм формування руху водних мас. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2017. Т. 1(44). С. 131-135.

References

1. *Rabinovich A. B.* Seiches and Harbor Oscillations / Handbook of Coastal and Ocean Engineering (ed. by Y. C. Kim). Singapoure: World Scientific Publ., 2009. P. 193-236. 2. *Forrester W. D.* Canadian Tidal Manual. Ottawa: Department of fisheries and oceans, 1983. 138 p. 3. *Sudol'skij A. S.* Dinamicheskie javlenija v vodoemah (Dynamic events in water bodies). L.: Gidrometeoizdat, 1991. 263 s. 4. Volny, techenija i vodnye massy vodoemov. Konspekt lekciij (Waves, currents and water masses of water bodies. Lecture notes) / Pod red. prof. B. B. Bogoslovskogo. L.: Leningradskij gidrometeorologicheskij institut, 1980. 57 s. 5. *Kravec T. P., Toporec A. S.* Rasprostranenie bajkal'skih sejsj po reke Angare (Distribution of Baikal seiches along the Angara River). Trudy po fizike. M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1959. S. 273-295. 6. *Maniljuk Ju. V., Cherkesov L. V.* Issledovanie sejshevyh kolebanij v buhte so svobodnym vhomom (Investigation of seiche oscillations in a free entrance bay). Morckoj gidrofizicheskij zhurnal, 2017. №4. P. 16-25. DOI: 10.22449/0233-7584-2017-4-16-25. 7. *Anahov P. V.* Glissando zatuhajuchyh sjejsj (Glissando of damping seiches). Gidrologija, gidrohimija i gidrojekologija, 2018. №. 1(48). S. 67-73. 8. *Ogurcov A. N.* Fizika dlja studentov. Kolebanija i volny (Physics for students. Oscillations and waves) URL: <https://sites.google.com/site/anogurtsov/lectures/phys>. 9. Terminologicheskij slovar' po stroitel'stvu na 12 jazykah: SNiP (Dictionary of building terms:

SNiP). [Chinnij vid 1986-01-01]. M.: Russkij jazyk, 1986. 3015 s. **10.** Loskutov A. V. Dinamika voln cunami v severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana na osnove instrumental'nyh izmerenij i chislennogo modelirovanija (Dynamics of tsunami waves in the northwestern part of the Pacific Ocean based on instrumental measurements and numerical modeling): Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 25.00.29 "Fizika atmosfery i gidrosfery". Juzhno-Sahalinsk, 2016. 115 s. **11.** Zheleznyak M. I., Kantarzi I. G., Sorokin M. V., Poljakov A. I. Rezonansnye harakteristiki akvatorij morskikh portov (Resonance properties of seaport water areas). Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, 2015. №5. S. 3-19. DOI: 10.5862/MCE.57.1. **12.** Anahov P. V. Sjeishovyj mjehanizm formuvannja ruhu vodnyh mas (Seiche mechanism of water mass movement). Gidrologija, gidrohimija i gidrojekologija, 2017. V. 1(44). S. 131-135.

Рух вузлової лінії затухаючих прибережних сейш

Анахов П. В.

На основі отриманих при розрахунках даних висунуто гіпотезу щодо руху вузлової лінії затухаючих прибережних сейш в напрямі відкритого моря. Зсув вузлової лінії можуть обумовлювати щонайменше дві незалежні причини: зростання періоду хвилі та затухання швидкості реверсивних рухів супутньої течії. Отримані результати можуть бути використані для побудови карт сейшових течій. Робота знайде застосування при проектуванні гідротехнічних споруд та оптимізації їх роботи; розробці рекомендацій для пловців і водного транспорту.

Ключові слова: зсув вузлової лінії; напівзамкнутий басейн; прибережні сейші; сейшова течія; циркуляція течії.

Движение узловой линии затухающих прибрежных сейш

Анахов П. В.

На основе полученных при расчетах данных выдвинута гипотеза о движении узловой линии затухающих прибрежных сейш в направлении открытого моря. Смещение узловой линии могут обуславливать минимум две независимые причины: рост периода волны и затухание скорости реверсивных движений сопутствующего течения. Полученные результаты могут быть использованы для построения карт сейшевых течений. Работа найдет применение при проектировании гидротехнических сооружений и оптимизации их работы; разработке рекомендаций для пловцов и водного транспорта.

Ключевые слова: сдвиг узловой линии; полузамкнутый бассейн; прибрежные сейши; сейшевое течение; циркуляция течения.

Movement of the nodal line of damping coastal seiches

Anahov P. V.

*Purpose of manuscript is to study the possible changes in effective length of open-ended water basin, conditioned by damping seiches, and to determine effects of this phenomenon. **Method.** Study was done by analytical and graphical methods of monitoring dynamic of wave, which described by its period and circulations of concomitant seiche current. **Results.** The calculations, performed on the example of the harbor of port of Ciudadela, showed an increase in the effective length due to the shift of the nodal line of damping seiche waves. With the spread of seiche oscillations, outside the harbor originate areas of current of alternating directions with length of half-period of oscillations; at the same time, outflow seiche current over time, which is equal to the half-period of oscillations, changes an inflow one. Due to damping of seiche oscillations, their period increases; the amplitude, velocity and length of the traversed by accompanying current path decreases. As a result of shift of node line everything, that falls into the seiche current, is moves from shore. **Originality.** On the basis of received data, it is put forward the hypothesis concerning the movement of the nodal line of damping coastal seiches. Shift of the nodal line may be caused at least by two independent reasons: growth of wave period and damping of the velocity of reversible movements of concomitant current. **Practical significance.** The obtained results can be used to construction of maps of seiche flows. This will allow, if not completely prevent the negative effects of damping coastal seiches, then at least reduce the negative effects. Work will find application in the design of hydraulic structures and optimize their operation; developing recommendations for swimmers and floating craft.*

Keywords: shift of node line; open-ended basin; harbor seiches; seiche current; circulation of current.

Надійшла до редколегії 23.04.2018