

DOI: 10.18372/2310-5461.45.14574

УДК 551.466.6.001.57

**К. І. Капітанчук**, канд. техн. наук, доц.  
Національний авіаційний університет  
orcid.org/0000-0003-3605-0977  
e-mail: k.kapitanchuk@ukr.net;

**М. П. Андріішин**, канд. техн. наук, доц.  
Національний авіаційний університет  
orcid.org/0000-0002-4439-3526  
e-mail: andriishinmp@gmail.com

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ МОРСЬКОЇ ХВИЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ГНУЧКИМ ЕНЕРГОПОГЛИНАЛЬНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

### Вступ

Розвиток світової енергетики в останні десятиліття все більше орієнтується на нові, екологічно чисті технології, які базуються на відновлювальних джерелах енергії. Енергія морських хвиль — найбільш розповсюджена відновлювальна енергія, яка представлена природою в найбільш сконцентрованому вигляді. Спроможність реалізувати енергію морської хвилі шляхом перетворення механічної роботи з переміщення в любий інший вид роботи для відтворення нетрадиційного джерела енергії — задача найважливіша [1].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Усі типи морських хвильових електростанцій, що будуються і діють в наш час, розподіляють на два типи перетворення енергії хвиль: такі, що відслідковують профіль хвилі, і такі, що використовують коливання водного стовпа [2].

До першого типу відноситься передусім розробка професора Единбургського університету Солтера — «утка Солтера» (рис. 1, *a*).

Хвилі, що діють на «утку», примушують її коливатися, потужність знімається на осі коливальної системи.

Гірлянда з двадцятиметрових «уток Солтера» загальною вагою 16 тон досліджувалась протягом чотирьох місяців у різних хвильових умовах озера Лох-Нес з ККД — 0,5 %.

Основні недоліки — складність виготовлення і монтажу, великі ударні навантаження під впливом максимальних хвиль.

Другий варіант перетворювачів енергії хвиль такого типу — контурний пліт Коккереля (рис. 1, *б*), який був досліджений в проливі Солент поблизу м. Саутгемптон. Хвильова електростанція за принципом плота Коккереля реалізована в проекті «Хвильова ферма» (Wave Farm) шотландською фірмою Pelamis Wave Power. Чотири секції, з'єднані шарнірно, під впливом хвиль згинаються, що приводить у дію гідроциліндри, які перекачують масло на гідромотори приводу генераторів. Створена електроенергія по кабелю, опущеному на дно, передається на берег.

До другого типу перетворювачів, що використовують енергію коливання водного стовпа, належать «стовп Масуди» (Японія) та «турбіна Уельсу» (Англія), які представлено на рис. 1, *в*. При набіганні хвилі на частково занурену порожнину відкриту під водою, стовп води в ній коливається, змінюючи тиск повітря зверху, який створює рух турбіни. В експериментальних електростанціях навіть невеликі хвилі висотою 35 см примушують турбіну розвивати швидкість понад 2 тис. обертів за хвилину. Потік може регулюватися таким чином, щоб проходити через турбіну в одному напрямку.

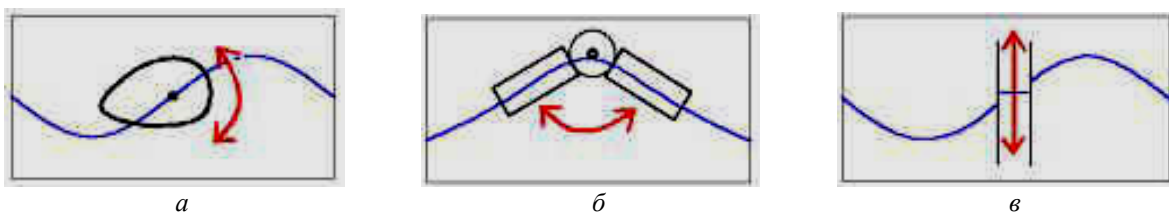


Рис. 1. Основні реалізовані типи морських хвильових електростанцій:  
*a* — «утка Солтера»; *б* — пліт Коккереля; *в* — «стовп Масуди» та «турбіна Уельсу»

Три перетворювача такого типу, збудовано біля прибережжя Португалії. Кожен перетворювач за довжиною та перерізом можна порівняти з невеликим залізничним составом довжиною 120 м і вагою 700 т. Потужність одного такого перетворювача — 700 кВт.

Основні недоліки таких перетворювачів: велика матеріалоемність; великий рівень питомих капітальних витрат — біля 5000 \$/кВт, середньорічний коефіцієнт використання потужності не більше — 0,4.

Іншим різновидом таких електростанцій є установки, що перетворюють енергію морського прибою. Крім згаданого поплавкового принципу, такі станції використовують також принцип

накачки сильним прибоєм морської води в резервуар, розташований вище рівня моря. Звідти вода спускається вниз, обертаючи турбіни енергоустановок [2].

Спільними зусиллями науковців Національного авіаційного університету, Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова та Інституту гідромеханіки НАН України за ініціативою НВФ «Крок-1» (м. Київ) створена, виготовлена та випробувана конструкція хвильової електростанції з гнучким енергопоглинальним елементом, яка принципово відрізняється від всіх сучасних аналогів [39]. Модуль хвильової електростанції з гнучким енергопоглинальним елементом представлено на рис. 2.



Рис. 2. Хвильова електростанція з гнучким енергопоглинальним елементом

### Мета статті (постановка завдання)

Хвильова електростанція з гнучким енергопоглинальним елементом складається з декількох модулів залежно від запланованої потужності. Отже, існує проблема з визначенням геометричних параметрів окремого модуля (довжина, радіус енергопоглинального елемента та ін.) залежно від акваторії моря, сезонного впливу атмосфери та потреби споживачів електроенергії з метою створення максимально можливої запланованої потужності. Крім того, при заданих габаритних параметрах хвильової електростанції форма її енергопоглинального елемента трансформується від спіралі на розрахунковому режимі до гофрованої поверхні з переходом у форму стрічки при незбуреному стані поверхні моря [8], що суттєво зменшує розрахункову потужність.

### Постановка завдання на дослідження

Для визначення геометричних параметрів енергопоглинального елемента хвильової електро-

станції необхідно розробити методику визначення розрахункового режиму при найбільш вірогідному стані збурення поверхні моря та потреби споживача.

### Результати досліджень

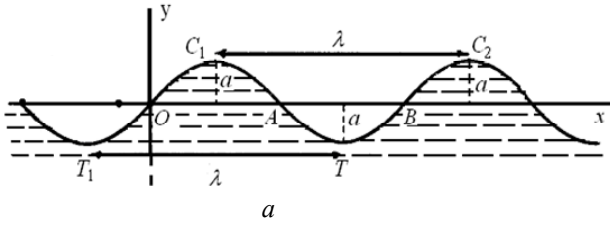
Представлено аналіз потужності, яка створюється хвилею на етапі підйому залежно від амплітуди прогресивних хвиль. Представлено графічні залежності потужності модуля хвильової електростанції від геометричних розмірів енергопоглинального елемента під впливом енергії морської хвилі.

### Енергія прогресивних хвиль

Профіль вільної поверхні прогресивної хвилі в момент часу  $t = 0$  описується синусоїдальною кривою  $y = a \sin(mx)$ , яка представлена на рис. 3, а. У довільний момент часу  $t \neq 0$  профіль пересовується на величину відрізка  $OO'$  відносно початку системи координат, що відображено на рис. 3, б. Величину  $a$  називають *амплітудою хвилі*.

Вона визначає максимальне відхилення вільної поверхні у вільний момент часу від середнього рівня.

Точки  $C_1, C_2, \dots$  — максимальні підвищення вільної поверхні, які називають *гребнями хвилі*.



Точки  $T_1, T_2, \dots$  — максимальні зниження вільної поверхні, які називають *впадинами*.

Відстань між двома послідовно розташованими гребнями називають *довжиною хвилі*  $\lambda$ .

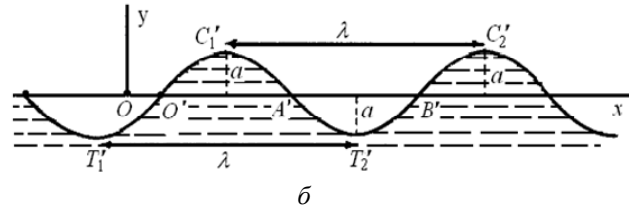


Рис. 3. Профіль вільної поверхні прогресивної гармонічної хвилі:

$a$  —  $O, A, B$  — вузлові точки;  $C_1, C_2$  — розташування гребнів;

$T_1, T_2$  — розташування впадин у момент часу  $t = 0$ ;  $b$  —  $O', A', B'$  — вузлові точки;

$C'_1, C'_2$  — розташування гребнів;  $T'_1, T'_2$  — розташування впадин

Представимо рівняння  $y = a \sin(mx)$ , у вигляді

$$y = \sin m(x-kt/m) = a \sin(x-ct), \quad (1)$$

де  $c = k/m$  — швидкість розповсюдження хвилі.

Отже, рівняння (1) характеризує хвильовий рух, при якому крива  $y = a \sin(mx)$  рухається у напрямку осі  $x$  зі швидкістю  $c$ , а форма вільної поверхні однакова як в момент часу  $t$ , так і в момент часу  $t + 2\pi/k$ . При цьому довжина хвилі визначається як  $\lambda = 2\pi/m$ , а період, як  $\tau = 2\pi/k$ .

Величину, зворотну періоду, називають *частотою* та позначають  $f = k/2\pi$ .

Кут  $(mx-kt)$  називають *фазовим кутом*, а число  $k$  — фазовою швидкістю. Довжина, період та швидкість розповсюдження хвилі зв'язані співвідношенням  $\lambda = c/\tau$ .

Кінетичною енергією  $T$ , згідно з працею [2], називається кінетична енергія об'єму рідини, віднесеного до одиниці товщини між двома вертикальними перетинами, розташованими на відстані довжини хвилі один від одного і перпендикулярними напрямку розповсюдження хвилі.

Кінетична енергія прогресивної хвилі визначається за формулою

$$T = -\frac{1}{8} i \rho \frac{a^2 c^2 m}{sh^2(mh)} \int_0^\lambda i \cdot sh(2mh) dx = \frac{1}{4} a^2 g \rho \lambda, \quad (2)$$

а потенційна енергія, віднесена до одиниці товщини, зумовлена збільшенням рівня води на інтервалі довжини хвилі, розраховується від рівня незбуреної поверхні і визначається за формулою

$$\int_0^\lambda \frac{1}{2} h \cdot g \rho h dx = \frac{1}{4} a^2 g \rho \int_0^\lambda 2 \sin^2(mx - nt) dx = \frac{1}{4} a^2 g \rho \lambda. \quad (3)$$

Отже, потенційна енергія дорівнює за величиною кінетичній енергії. Таким чином, повна енергія прогресивної синусоїдальної хвилі дорівнює величині  $0,5 a^2 g \rho \lambda$  на одиницю довжини, половина цієї енергії є кінетичною, а половина — потенційною енергією, зумовленою підвищенням води над незбуреною поверхнею.

Енергія морської хвилі, впливаючи на поверхню, яка розташована на еластичній площині, здатна виконувати механічну роботу з переміщення її у максимально можливе вертикальне положення, тобто виконувати роботу з піднімання тіла на інтервалі довжини хвилі.

Під дією потенційної сили хвилі на поверхню відбувається її переміщення на висоту хвилі за половину періоду. У зв'язку з цим можна оцінити питому потужність хвилі, як силу, яка здатна перемістити одиницю поверхні на висоту хвилі. Результати розрахунку величини питомої потужності хвилі показано на рис. 4.

**Потужність, яку створює поверхня енергопоглинального елемента, та фактори, що впливають на її величину**

Потужність, яку створює поверхня енергопоглинального елемента, визначається за формулою [6]

$$N = 2\pi n M_{об}, \quad (4)$$

де  $n$  — частота обертання ротора, об/с;  $M_{об}$  — обертальний момент, кНм.

Величину  $n$  можна визначити з умови

$$d\phi/dt = 2\pi n = 2\pi c/\lambda.$$

Звідки

$$n = c/\lambda. \quad (5)$$

Отже, частота обертання, яку можна реалізувати в установці з енергопоглинальним елементом, залежить тільки від параметрів хвилі. За відомих параметрах хвилі частоту обертання можна визначити, використовуючи дані рис. 5.

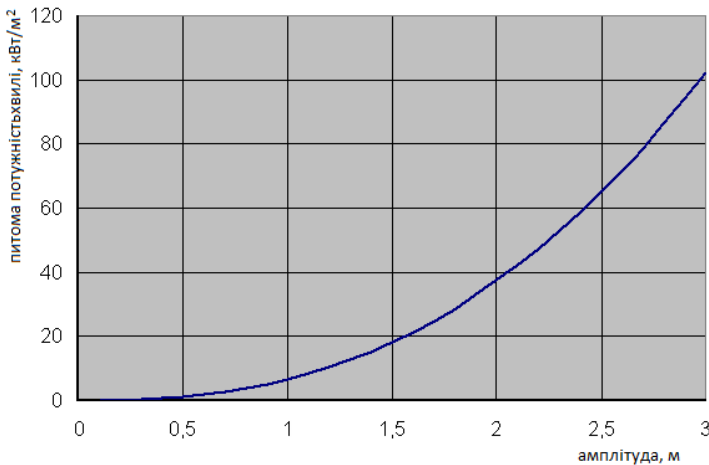


Рис. 4. Питома потужність сили, яка створюється хвилею на етапі підйому залежно від амплітуди

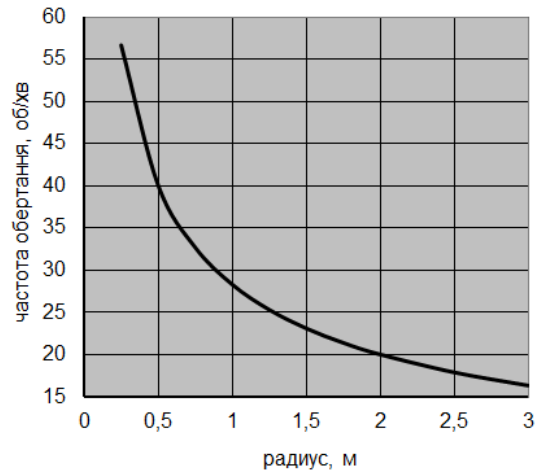


Рис. 5. Залежність частоти обертання від радіуса енергопоглинального елемента за умові  $R = a$

Обертальний момент становить величину суми складових, методика розрахунку яких представлено у праці [7], а саме  $M_{об} = M_y + M_z$ .

Величину обертального моменту визначають за формулою

$$M_{вр} = 2 \frac{\rho g R^2 b \lambda}{\pi} A(1-2A), \quad (6)$$

де  $b$  — ширина поверхні енергопоглинального елемента;  $R$  — максимальний радіус обертання; параметр  $A = 1 - b/2R$  [7].

Результати розрахунку обертального моменту складової сили енергопоглинального елемента на поверхню  $Ozx$  від радіуса при умові  $R = a$  та різних величинах  $R/b$  представлено на рис. 6 та рис. 7. Таким чином, потужність, яку створює поверхня енергопоглинального елемента, визначається з формули

$$N = 4\rho g R^2 b c A(1-2A). \quad (6)$$

Результати розрахунку потужності, яку створює поверхня енергопоглинального елемента, від його радіуса за умові  $R = a$  та різних величинах  $R/b$  представлено на рис. 8 та рис. 9.

Відзначимо, що потужність, яку створює поверхня енергопоглинального елемента на розрахунковому режимі, залежить від радіуса в кубі та від величини  $b/R$  в квадраті.

При значенні  $b/R \geq 0,5$  потужність, яку створює поверхня енергопоглинального елемента на розрахунковому режимі, значно зменшується.

Як приклад, на рис. 10 представлено розрахунок змінення потужності морської станції довжиною 9 м та  $R/b = 2$  при проектуванні її на хвилі з діапазоном змінення амплітуди до  $a = 1,5$  м.

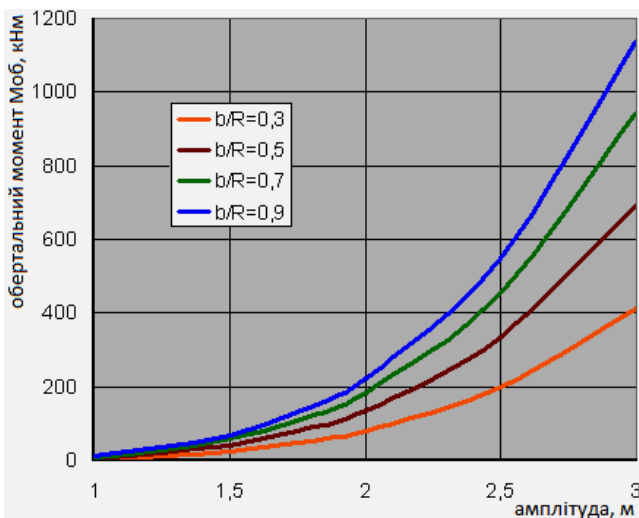


Рис. 6. Залежність обертального моменту від радіуса енергопоглинального елемента за умові  $R = a$  та різних величинах  $R/b$

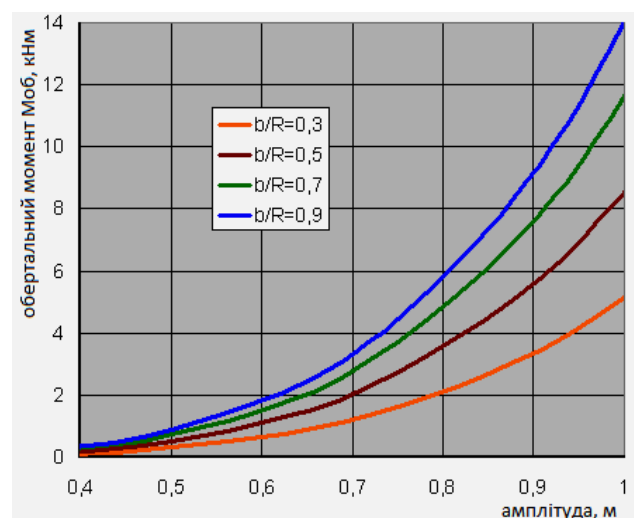


Рис. 7. Залежність обертального моменту від радіуса (до 1 м) енергопоглинального елемента за умові  $R = a$  та різних величинах  $R/b$

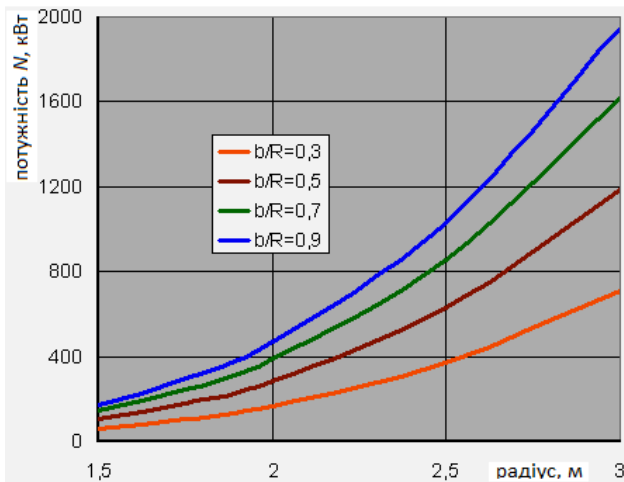


Рис. 8. Залежність потужності модуля морської станції від радіусу енергопоглинального елемента за умови  $R = a$  та різних величинах  $R/b$

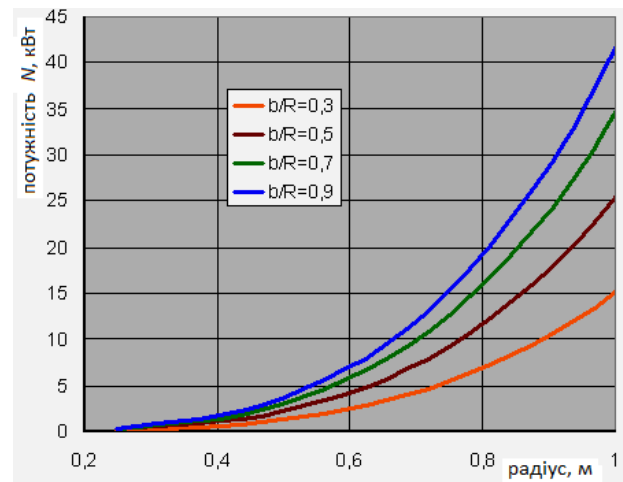


Рис. 9. Залежність потужності модуля морської станції від радіусу (до 1 м) енергопоглинального елемента за умови  $R = a$  та різних величинах  $R/b$

Питома потужність одного робочого витка установки з енергопоглинальним елементом при збільшенні амплітуди хвилі відносно розрахункової величини можна представити у вигляді

$$N_{\text{yo}} = \frac{N}{\lambda R} = 4\rho g R^2 \frac{c}{\lambda} A(1-2A). \quad (7)$$

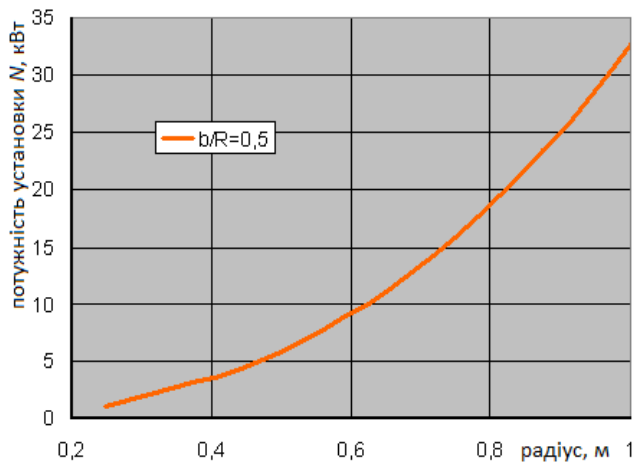


Рис. 10. Залежність потужності морської енергетичної установки довжиною  $L = 9$  м від радіуса за умови  $R = a$  та  $R/b = 2$

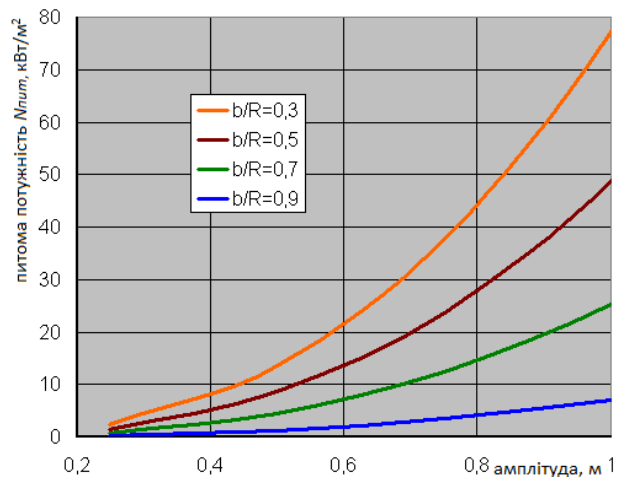


Рис. 11. Залежність питомої потужності енергопоглинального елемента від радіуса (до 1 м) за умови  $R = a$  та різних величинах  $R/b$

## Висновки

Уперше розроблено методика визначення потужності модуля морської хвильової електростанції з енергопоглинального елемента, яка дозволяє виконувати розрахунки таких станцій при будь-якій комбінації геометричних параметрів для хвиль стандартної форми, а саме:

1. Залежності змінення потужності, що створюється поверхнею енергопоглинального елемента, дають змогу визначитись з енергетичними та геометричними параметрами станції.

2. Залежно від акваторії моря, сезонного впливу атмосфери, потреби споживачів електроенергії приймається рішення на визначення геометричних параметрів станції (довжина, радіус енергопоглинального елемента та ін.).

3. Користуючись методикою, визначаються обертальний момент та частота обертання залежно від радіусу енергопоглинального елемента за умови  $R = a$  та різних величинах  $R/b$  з метою підбору відповідного обладнання та виробництва окремих вузлів хвильової електростанції.

### Перспективи подальших досліджень

Будь-яка енергетична установка відповідно до умов експлуатації розраховується на один найбільш доцільний режим роботи. Відхилення умов експлуатації від розрахункового режиму, як правило, суттєво зменшують бажані вихідні дані. Енергія морських хвиль суттєво залежить від кліматичних умов і може різко змінюватися протягом короткотривалого часу залежно від погоди. Для визначення габаритних та енергетичних параметрів, конструкційних матеріалів основних елементів хвильової електростанції, що здатні довготривало витримувати руйнівну силу морських хвиль, проведення розрахунків на міцність необхідно вивчити її енергетичні характеристики в умовах, що відрізняються від розрахункових.

### ЛІТЕРАТУРА

1. **Енергетичні** ресурси та потоки. К.: Українські енциклопедичні знання, 2003. 472 с.
2. **Ищенко Ю.А.** Захват энергии взаимодействия глубин и волн Мирового океана. *Энергия*. 2003. №3. С. 28–36.
3. **Капітанчук К. І.,** Овсянкін В. В. Досвід розробки та впровадження хвильової електричної станції. *Промислова гідроліка і пневматика: XIV Міжнар. наук.-тех. конф.* (Одеса, 2013). Одеса: «ГЛОБУС-ПРЕС». 2013. С. 126–127.
4. **Патент** України №56481. Пристрій для перетворення енергії хвиль водної поверхні. МКИ7 F03B13/12.
5. **Греков П. І.,** Капітанчук К. І., Овсянкін В. В. Методика розрахунку глибини занурення морської енергетичної станції при збільшенні висоти хвиль. *Вісник НАУ*. 2006. №4(30). С. 166–168. doi.org/10.18372/2306-1472.30.1399.
6. **Капітанчук К. І.,** Сотников А. В., Овсянкін В. В. Один из путей независимого энергетического обеспечения подразделений Вооруженных Сил Украины приморского базирования. *Арсенал—XXI*. 2007. №1. С. 37–41.
7. **Капітанчук К. І.,** Овсянкін В. В., Ластивка І. А., Греков П. І. Децентрализованное энергетическое обеспечение жизнедеятельности населения прибрежных областей Украины. *Васильків — південні ворота столиці: тези доповідей I Всеукр. наук.-практ. конф.* Ч. І. Васильків: вид-во Сяйво, 2008. С. 87–88.
8. **Капітанчук К. І.,** Андрієшин М. П. Розрахунок подовження енергопоглинального елемента морської хвильової електростанції трансформації спіралі у площину. *Наукоємні технології*. 2018. №3 (39). С.387-392. doi.org/10.18372/2310-5461.39.13097.
9. **Капітанчук К. І.,** Андрієшин М. П. Методика визначення сил та моментів, що діють на поверхню енергопоглинального елемента морської хвильової електростанції при різному збуренні поверхні моря. *Наукоємні технології*. 2018. №4 (40). С. 443–449. doi.org/10.18372/2310—5461.40.13270.

**Капітанчук К. І., Андрієшин М. П.**

### МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ МОРСЬКОЇ ХВИЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ГНУЧКИМ ЕНЕРГОПОГЛИНАЛЬНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

*Енергія морських хвиль — найбільш розповсюджена відновлювальна енергія, яка представлена природою в найбільш сконцентрованому вигляді. Спроможність реалізувати енергію морської хвилі шляхом перетворення механічної роботи з переміщення в любий інший вид роботи для відтворення нетрадиційного джерела енергії — задача найважливіша.*

*Спільними зусиллями науковців Національного авіаційного університету, Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова та Інституту гідромеханіки НАН України за ініціативою НВФ «Крок-1» (м. Київ) створена, виготовлена та випробувана конструкція хвильової електростанції з гнучким енергопоглинальним елементом, яка принципово відрізняється від всіх сучасних аналогів.*

*Енергія морської хвилі, впливаючи на поверхню, яка розташована на еластичній площині, здатна виконувати механічну роботу з переміщення її у максимально можливе вертикальне положення, тобто виконувати роботу з піднімання тіла на інтервалі довжини хвилі. Під дією потенційної сили на поверхню проходить переміщення на висоту хвилі за половину періоду. У зв'язку з цим можна оцінити питому потужність хвилі, як енергію, яка здатна перемістити одиницю поверхні на висоту хвилі. Представлено результати розрахунку величини питомої потужності хвилі.*

*Визначено, що потужність, яку створює поверхня енергопоглинального елемента на розрахунковому режимі, залежить від радіусу в кубі та від величини  $b/R$  в квадраті. При значенні  $b/R \geq 0,5$  потужність, яку створює поверхня енергопоглинального елемента на розрахунковому режимі, значно зменшується. Як приклад, на рис. 10 представлено розрахунок змінення потужності морської станції довжиною 9 м та  $R/b = 2$  при проектуванні її на хвилі з діапазоном змінення амплітуди до  $a=1,5$  м.*

*Представлено результати розрахунку розрахунок змінення потужності морської станції довжиною 9 м та  $R/b = 2$  при проектуванні її на хвилі з діапазоном змінення амплітуди до  $a = 1,5$  м..*

**Ключові слова:** морська хвильова електростанція, енергопоглинальний елемент, композитні матеріали.

**Капитанчук К. І., Андришын М. П.**

## **METHODOLOGY OF DETERMINING WATER ENERGY CONVERTER OUTPUT FOR CONVERTERS WITH FLEXIBLE POWER TAKE-OFF ELEMENT**

*Marine energy is most abundant source of non-traditional energy. It is vital to collect this clean energy by converting mechanical movement of energy converter structural element to any other form of power and create device to harvest the most concentrated source of raw energy provided by nature.*

*With combined effort from members of National Aviation University, Admiral Makarov National University of Shipbuilding and Institute of Hydromechanics of NAS Ukraine a breakthrough version of water energy converter was successfully designed, created and tested in a field. Designing a marine energy converter that will be durable, efficient and easy to install/maintain has been the ultimate goal of research teams across the globe for a while.*

*Marine energy applied on flexible surface will apply mechanical force to move physical body in maximum length of wave amplitude. Thus that is possible to determine power density as a value of energy that is required to move a unit of surface to wave height.*

*This specific design of marine energy converter can be used both on surface and submerged states and power output that is provided by energy converter can be calculated for any requested set up by following algorithm provided in article. Authors pointed out that power of water energy converter will be subjected by take-off element unit area to radius ratio and will drastically drop with  $b/R \geq 0.5$ . Article offers calculations and graphs for water energy converter with of 9m length and power take-off element unit area to radius ratio  $b/R = 2$  that are designed for wave amplitude of  $a = 1,5$  m. Taking presented graphs for power output in mind, geometrical dimensions of energy converter can be calculated for specific wave amplitude.*

**Keywords:** wave energy converter, flexible power take-off element, composite materials.

**Капитанчук К.И., Андришин М.П.**

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ МОРСКОЙ ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ГИБКИМ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ**

*Энергия морских волн — наиболее распространенная нетрадиционная энергия, которая представлена природой в наиболее сконцентрированном виде. Возможность реализовать энергию морской волны путем преобразования механической работы при перемещении в любой другой вид работы для создания нетрадиционного источника энергии — задача первостепенной важности.*

*Совместными усилиями ученых Национального авиационного университета, Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова и Института гидромеханики НАН Украины создана, изготовлена и испытана конструкция волновой электростанции с гибким энергопоглощающим элементом, которая принципиально отличается от всех современных аналогов.*

*Энергия морской волны, воздействуя на поверхность, которая расположена на эластичной площади, способна выполнить механическую работу по перемещению ее в максимально возможное вертикальное положение, то есть выполнить работу по подъему тела в интервале длины волны. Под действием потенциальной силы на поверхность происходит перемещение на высоту волны за половину периода. У связи с этим можно оценить удельную мощность волны, как энергию, которая способна переместить единицу поверхности на высоту волны.*

*Определено, что мощность, которую создает поверхность энергопоглощающего элемента на расчетном режиме, зависит от радиуса в кубе и от величины  $b/R$  в квадрате. При значении  $b/R \geq 0,5$  мощность, которую создает поверхность энергопоглощающего элемента на расчетном режиме, значительно уменьшается.*

*Представлено результаты расчета изменения мощности морской станции длиной 9 м и  $R/b = 2$  при проектировании ее на волны с диапазоном изменения амплитуды до  $a = 1,5$  м.*

**Ключевые слова:** морская волновая электростанция, энергопоглощающий элемент, композитные материалы.

Стаття надійшла до редакції 28.01.2020 р.

Прийнято до друку 10.02.2020 р.