

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

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

РОЗРАХУНОК ПОДОВЖЕННЯ ЕНЕРГОПОГЛИНАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА МОРСЬКОЇ ХВИЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ПРИ ТРАНСФОРМАЦІЇ СПРАЛІ У ПЛОЩИНУ

Вступ

Потужність хвиль Світового океану оцінюється приблизно у 10...90 млрд кВт, з яких 2,7 млрд кВт може бути реально використано людством. Енергія морської хвилі, впливаючи на поверхні тіл, може нести не тільки руйнівну дію, але також здатна створювати механічну роботу по пересовуванню цих поверхонь.

Уміння реалізовувати енергію морської хвилі в любий інший вид роботи для відтворення нетрадиційного джерела енергії — найважливіше завдання.

Сучасний рівень розвитку техніки дозволяє використати енергію морських хвиль лише у прибережних зонах, де вона в середньому складає величину у 80 кВт/м. Потужність морських хвиль Чорного та Азовського морів ще менша і складає величину чуть більше 40 кВт/м [1].

Таким чином, з кожного погонного метра фронту хвилі можна відтворити електроенергію для забезпечення 8 будинків, а з фронту у 1000 м можна відтворити електроенергію для 10 енергоємних об'єктів, що знаходяться як на рейді, так і на березі, наприклад, плавзасоби, маяки, локатори та ін.

Питома потужність хвиль, яка відтворюється на великих глибинах при значній віддаленості від берега, на порядок вища за питому потужність хвиль у прибережній зоні. Крім того, процес перетворення енергії морських хвиль в електричну енергію у цьому випадку не пов'язаний з руйнівним екологічним впливом на природу. Тому використання енергії морських хвиль на «глибокій воді» є вкрай необхідними, а наукові розробки для створення хвильових електростанцій — актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Використання енергії морських хвиль поки що знаходиться на стадії створення дослідних установок різних конструкцій. Вони класифікуються залежно від типу носія, призначення, розташування, способу перетворення енергії, діапазону висот хвиль. У сучасних хвильових установках енергія хвиль може або безпосередньо перетворюватись в енергію обертання валу генератора, або слугувати основою для привода турбіни з генератором на одному валу з нею. Всі відомі хвильові установки складаються з п'яти основних частин: несної конструкції, робочого органу — енергопоглинального елемента, робочого тіла, силового перетворювача та системи кріплення [2; 3].

За ініціативою НВФ «Крок-1» (м. Київ), спільними зусиллями науковців Національного авіаційного університету, Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова та Інституту гідромеханіки НАН України створена, виготовлена та випробувана конструкція хвильової електростанції (ХЕС) з гнучким енергопоглинальним елементом (рис. 1), яка принципово відрізняється від усіх сучасних аналогів [4].

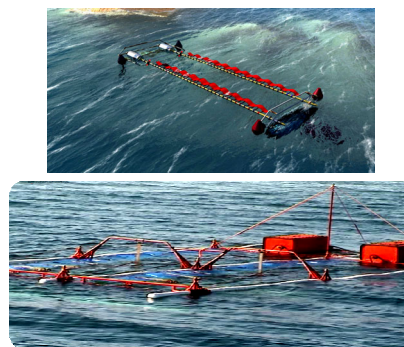


Рис. 1. Загальний вид хвильової електростанції НВФ «Крок-1»

Унікальність установки в тому, що вона здатна ефективно працювати за будь-якого коливання морської поверхні за рахунок саморегулювання форми енергопоглинального елемента під впливом хвиль і занурення станції на необхідну глибину відповідно до погодних умов на поверхні. Собівартість електричної енергії, яка створюється станцією, не перевищує 0,1 цент/кВт.

Мета статті (постановка завдання)

Існує проблема з визначенням довжини енергопоглинального елемента, оскільки при заданих габаритних параметрах хвильової електростанції, його форма трансформується від спіралі на розрахунковому режимі до гофрованої поверхні з переходом у форму стрічки при незбуреному стані поверхні моря. При цьому довжина енергопоглинального елемента повинна збільшуватися. Проблема розв'язана [4] шляхом використання окремих фрагментів (ласти) енергопоглинального елемента з перекриттям їх в навхрест у момент монтажу на величину подовження. На розрахунковому режимі роботи хвильової електростанції це подовження повинно бути використано для трансформації енергопоглинального елемента у вид спіралі.

Постановка завдання на дослідження

Для визначення довжини енергопоглинального елемента хвильової електростанції, при зміні збурення поверхні моря, необхідно розробити методику розрахунку залежно від умов подальшої експлуатації станції.

Результати досліджень

Форма та геометричні розміри залежать від траєкторії руху кожної окремо взятої елементарної точки поверхні енергопоглинального елемента станції в процесі переміщення її під впливом енергії морської хвилі. Кожна окремо взята елементарна точка поверхні бере участь у складному русі вздовж поверхні циліндра з радіусом R_i і поверхні хвилі з амплітудою a та довжиною хвилі λ [2; 3]. Необхідно визначити основні рівняння траєкторії руху та зміни площі контакту енергопоглинального елемента при коливанні поверхні моря для визначення габаритних та енергетичних параметрів станції.

За умови $R_i \leq a$ траєкторія руху являє собою складну гвинтову лінію, рівняння якої представимо у вигляді:

$$y_i = R_i \sin \varphi, \quad z_i = R_i \cos \varphi, \quad x = \lambda \varphi / 2\pi. \quad (1)$$

Виключимо з системи рівнянь (1) параметр φ шляхом уведення в квадрат перших двох рівнянь з подальшим їх додаванням. Дістанемо

$$y_i^2 + z_i^2 = R_i^2. \quad (2)$$

Рівняння (2) являє собою рівняння циліндра, на якому розташована гвинтова лінія траєкторії руху елементарної точки.

Поділивши послідовно друге рівняння в системі (1) на перше і підставивши результат в значення φ із третього рівняння, знайдемо рівняння поверхні, на якій розташована гвинтова лінія:

$$\frac{y_i}{z_i} = \operatorname{tg} \frac{2\pi x}{\lambda}. \quad (3)$$

Рівняння (3) описує синусоїдальну гвинтову поверхню — синусоїдальний гелікоїд. Таким чином, пошукова гвинтова лінія є лінією перетину поверхонь (2) та (3).

Відстань, яку проходить елементарна точка вздовж гвинтової лінії за повний період від 0 до 2π , визначається довжиною дуги за формулою:

$$l_i = \int_0^{2\pi} \sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2 + (dz/d\varphi)^2} d\varphi = \sqrt{(2\pi R_i)^2 + \lambda^2} \quad (4)$$

Кривизна кривої в довільній точці лінії є змінною за радіусом кривизни:

$$R^* = R_i [1 + (\lambda/2\pi R_i)^2]. \quad (5)$$

Оскільки енергопоглинальний елемент розглядається у вигляді стрічки кінцевої ширини b [2, 3], то можна констатувати, що зовнішні (найбільш віддалені від центра обертання) точки за повний період проходять відстань

$$l_R = \int_0^{2\pi} \sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2 + (dz/d\varphi)^2} d\varphi = \sqrt{(2\pi R)^2 + \lambda^2}, \quad (6)$$

а внутрішні (найбільш наближені до центра обертання) точки за повний період проходять відстань

$$l_{R-b} = \int_0^{2\pi} \sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2 + (dz/d\varphi)^2} d\varphi = \sqrt{[2\pi(R-b)]^2 + \lambda^2}. \quad (7)$$

Отже, енергопоглинальний елемент повинен мати довжину поверхні контакту з хвилею в $l_R/\lambda = \sqrt{[2\pi(R-b)/\lambda]^2 + 1}$ раз більшу за довжину хвилі λ та забезпечити подовження зовнішньої сторони стрічки відносно внутрішньої без зміни її ширини на величину

$$\Delta l = l_R \left(1 - \sqrt{1 - 8\pi^2 RbA/l_R^2} \right), \quad (8)$$

де $A = 1 - b/2R$.

За умови $R_i = a$ без перевероту ця величина зменшиться вдвічі, а за умови $R_i \geq a$ відбувається режим «гойдалки» за якого подовження зовніш-

ньої сторони стрічки відносно внутрішньої визначається за формулою

$$\Delta l = 2\phi l_R \left(1 - \sqrt{1 - 8\pi^2 R b A / l_R^2} \right) / \pi. \quad (9)$$

Величина Δl визначає мінімальну кількість напрямних n_n на довжині хвилі λ енергопоглинального елемента з умови

$$l_{гр} = \Delta l / n_n, \quad (10)$$

де $l_{гр}$ — граничнодопустиме подовження матеріалу (з умови міцності), що з'єднує окремі частини енергопоглинального елемента.

Відмітимо, що робоча частина енергопоглинального елемента визначається з умови його зачеплення з валом через напрямні, тому довжина робочої частини менша за довжину хвилі за умови перпендикулярного розташування до фронту хвилі.

За умови $Ri \geq a$ довжина робочої частини становить половину довжина хвилі. При заданій величині довжини енергетичної станції L кількість робочих частин складає величину L/λ .

У прямокутній системі координат $Oxyz$ поверхня (3) синусоїдального гелікоїда обмежена циліндричними поверхнями з радіусами $R-b$ та R . Під дією знакозмінного за часом t тиску морської хвилі в кожній точці даної поверхні визначений вектор сили

$$\vec{F} = p_y(x, y, z, t)\vec{i} + p_z(x, y, z, t)\vec{j} + p_x(x, y, z, t)\vec{k}, \quad (11)$$

де p_y — неперервна функція надлишкового тиску стовпа води.

Величина сили визначається за допомогою обчислення поверхового інтеграла векторного поля \vec{F} через поверхню синусоїдального гелікоїда при $t = 0$ з подальшим пересовуванням величини \vec{F} в часі

$$\iint \vec{F} ndS = \iint p_y dydz + p_z dzdx + p_x dxdy. \quad (12)$$

Таким чином, для визначення величини сили, що діє у довільній точці поверхні енергопоглинального елемента, необхідно знати закони змінення площ проекцій її поверхонь уздовж всіх осей.

Відмітимо, що енергопоглинальний елемент займає площу поверхонь (3) синусоїдального гелікоїда в межах від $R-b$ до R . Різниця площ від проекцій зовнішнього та внутрішнього радіусів гелікоїда на всі поверхні системи координат є проекції площі енергопоглинального елемента на ці поверхні.

Результати розрахунку величини Δl при умові $R_i = a$ без перевероту, при $\lambda/a = 7$ та різних величинах R/b показані на рис. 2, а.

Відзначимо, що подовження збільшується пропорційно радіусу. Зі збільшенням величини R/b нахил залежності збільшується за степеневу залежністю.

Розглянемо змінення площі проекцій енергопоглинального елемента на всі поверхні прямокутної системи координат у межах однієї довжини хвилі при фіксованому часі.

Проекція поверхні енергопоглинального елемента на поверхню Ozx обмежена поверхнями:

$$y = R \cos(2\pi/\lambda)(x - ct),$$

$$y = (R - b) \cos(2\pi/\lambda)(x - ct). \quad (13)$$

Площа проекції енергопоглинального елемента на поверхню Ozx визначається у вигляді

$$S_y = \int_{x_1}^{x_2} R \cos(2\pi/\lambda)(x - ct) dx -$$

$$- \int_{x_1}^{x_2} (R - b) \cos(2\pi/\lambda)(x - ct) dx =$$

$$= \int_{x_1}^{x_2} b \cos(2\pi/\lambda)(x - ct) dx.$$

де x_1, x_2 — границі діапазону змінення параметра x в межах λ .

Оскільки енергопоглинальний елемент виконує обертальний рух, то підінтегральна функція залежить від параметра ϕ і для розв'язання представленої інтеграла необхідно використовувати формулу Лейбніца.

Для енергопоглинального елемента діапазон змінення параметра x в межах λ (від x_1 до x_2) визначається з умови контакту напрямних з валом через храповик. При цьому величина ϕ змінюється за законом:

$$\phi = \arcsin(y/R) = \arcsin \frac{a}{R} \sin(2\pi/\lambda)x. \quad (14)$$

За умови $R_i = a$ діапазон змінення параметрів хвилі і руху енергопоглинального елемента визначають як: $x_1 = \lambda/4$, $x_2 = 3\lambda/4$ та $\phi_1 = \pi/2$, $\phi_2 = 3\pi/2$.

У цьому випадку

$$S_y = \int_{\lambda/4}^{3\lambda/4} b \cos \phi dx = b(2 + \cos \phi_1 + \cos \phi_2) \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{b\lambda}{\pi}. \quad (15)$$

Таким чином, закон змінення площі S_y вздовж x представляється у вигляді

$$dS_y/dx = b \cos \phi. \quad (16)$$

Результати розрахунку змінення площі проекції енергопоглинального елемента на поверхню Ozx вздовж радіусу за різних величин R/b представлені на рис. 2, б.

Відзначимо, що площа проекції енергопоглинального елемента на поверхню Ozx збільшується пропорційно ширині та квадрату радіусу.

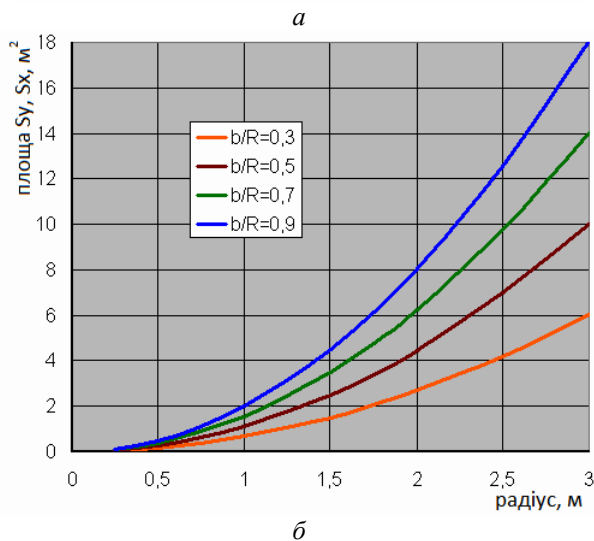
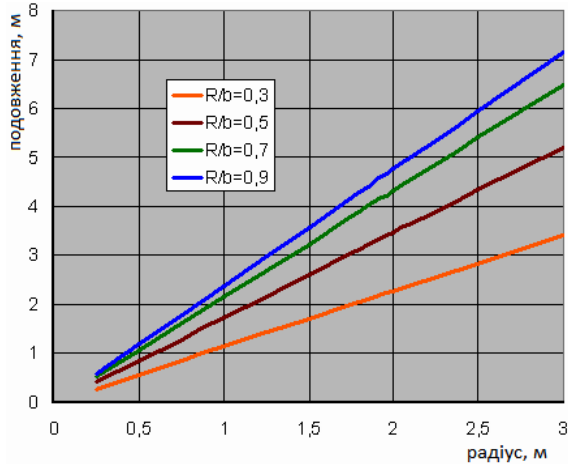


Рис. 2. Залежність подовження зовнішньої сторони стрічки без перевероту (а) відносно внутрішньої сторони без зміни її ширини та площі проекцій енергопоглинального елемента на площину Ozx та Oyx (б) від радіуса за умови $R = a$, $\lambda/a = 7$ та різних величин R/b

Проекція поверхні енергопоглинального елемента на поверхню Oyx обмежена поверхнями:

$$y = R \sin(2\pi/\lambda)(x - ct),$$

$$y = (R - b) \sin(2\pi/\lambda)(x - ct). \quad (17)$$

Площа проекції енергопоглинального елемента на поверхню Oyx визначається як

$$S_z = \int_{x_1}^{x_2} R \sin(2\pi/\lambda)(x - ct) dx -$$

$$- \int_{x_1}^{x_2} (R - b) \sin(2\pi/\lambda)(x - ct) dx =$$

$$= \int_{x_1}^{x_2} b \sin(2\pi/\lambda)(x - ct) dx.$$

За умови $R_i = a$

$$S_z = \int_{\lambda/4}^{3\lambda/4} b \sin \varphi dx = -b(\sin \varphi_1 + |\sin \varphi_2|) \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{b\lambda}{\pi}. \quad (18)$$

Відзначимо, що величина площі проекції енергопоглинального елемента на поверхню Oyx за умови $R_i = a$ дорівнює за величиною площі проекції енергопоглинального елемента на поверхню Ozx .

Тому для визначення величини площі проекції енергопоглинального елемента на поверхню Oyx можна використовувати дані рис. 2, б.

Таким чином, закон змінення площі S_z вздовж осі x представляється у вигляді

$$dS_z / dx = b \sin \varphi. \quad (19)$$

Проекція поверхні енергопоглинального елемента на поверхню Oyx являє собою поверхню, яка створюється шляхом перетину цієї поверхні двома циліндричними поверхнями з радіусами R та $R - b$. При умові $R_i \leq a$ вона являє собою кільце, а при $R_i > a$ тільки його частину.

Площа проекції енергопоглинального елемента на поверхню Oyx визначається у вигляді

$$S_x = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{Rb}{4} A d\varphi. \quad (20)$$

При $R_i \leq a$ $S_x = \frac{\pi Rb}{4} A. \quad (21)$

Під час роботи енергопоглинального елемента в режимі «гойдалки»

$$S_x = \frac{\varphi Rb}{2} A. \quad (22)$$

Таким чином, закон змінення площі S_x за φ представляється у вигляді

$$dS_x / d\varphi = \frac{Rb}{2} A. \quad (23)$$

Висновки

Аналіз змінення подовження зовнішньої сторони стрічки без перевероту та площі проекцій енергопоглинального елемента на поверхні прямокутної системи координат показує, що:

1. Подовження збільшується пропорційно радіусу. Зі збільшенням величини R/b нахил залежності збільшується за степеневою залежністю

2. За умови $R_i = a$ площі проекцій енергопоглинального елемента на поверхню Oyx та поверхню Ozx рівні. Величини їх прямо пропорційні ширині енергопоглинального елемента та довжині хвилі.

3. Площа Sz змінюється вздовж осі x від максимального значення, що дорівнює величині $Szi/dx = b$ при $x_1 = \lambda/4$, до нуля при $x = \lambda/2$, а потім знов збільшується до максимального значення при $x_2 = 3\lambda/4$.

4. Площа Sy змінюється вздовж осі x асиметрично площі Sz при аналогічних зміненнях.

5. При $R_i \leq a$ площа Sx не залежить від x .

Перспективи подальших досліджень. Для визначення конструкційних матеріалів основних елементів хвильової електростанції, що здатні довготривало витримувати руйнівну силу морських хвиль, проведення розрахунків з визначення габаритних та енергетичних параметрів станції необхідно вивчити закони змінення складових сил та моментів, що діють на поверхню енергопоглинального елемента.

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 // Матеріали XIV Міжнар. наук.-тех. конф. АС Промислова гідраліка і пневматика. — 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—ХІ. — 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 І Всеукр. наук.-практ. конф. — Ч. І. — Васильків: вид-во Сяйво, 2008. — С. 87–88.

Капітанчук К. І., Андрійшин М. П.

РОЗРАХУНОК ПОДОВЖЕННЯ ЕНЕРГОПОГЛИНАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА МОРСЬКОЇ ХВИЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ СПІРАЛІ У ПЛОЩИНУ

Використання енергії морських хвиль на «глибокій воді» є вкрай необхідним, а наукові розробки для створення хвильових електростанцій — актуальним. Унікальність створеної установки в тому, що вона здатна ефективно працювати при будь-якому коливанні морської поверхні за рахунок саморегулювання форми енергопоглинального елемента під впливом хвиль і занурення станції на необхідну глибину відповідно до погодних умов на поверхні.

Проблема руйнівного впливу хвиль в період різкого змінення сили вітру і, відповідно, амплітуди коливань поверхні моря, вирішено шляхом підтоплення станції на глибину, де коливання хвиль відповідають розрахунковим значенням, без зміни режиму роботи самої станції. При цьому споживачі стабільно отримують заявлену кількість електроенергії за любых погодних умов.

Існує проблема з визначенням довжини енергопоглинального елемента, оскільки при заданих габаритних параметрах хвильової електростанції, його форма трансформується від спіралі на розрахунковому режимі до гофрованої поверхні з переходом у форму стрічки при незбуреному стані поверхні моря. При цьому довжина енергопоглинального елемента збільшується.

Уперше визначено довжину енергопоглинального елемента хвильової електростанції при зміні збурення поверхні та розроблено методику розрахунку залежно від умов експлуатації станції. Виявлено змінення подовження зовнішньої сторони стрічки без перевероту та площ проєкцій енергопоглинального елемента на поверхні прямокутної системи координат.

Ключові слова: морські хвилі, електростанція, енергопоглинальний елемент, подовження, площа.

Kapitanchuk K. I., Andriyishyn M. P.

CALCULATIONS OF POWER TAKE-OFF ELEMENT LENGTH VALUES DURING SHAPE CHANGES CAUSED BY WEATHER

Use of sea wave's energy is the extremely necessary. Scientific development for creation of wave energy stations, are extraordinarily actual. Wave energy station is able effectively to work at any size of waves, because form of energetically absorbing element is self-regulated under the action of waves.

Problem of destructive influence of waves during sharp change of force of a wind and as consequence of amplitude of fluctuations of a surface of the sea, it is solved by flooding is a energetically absorbing element and a platform of

station on depth, where fluctuations of waves correspond to calculation values, without change of an operating mode of the station. Thus consumers stably receive the declared quantity of the electric power.

In article for the first time calculations of power take-off element length dependencies of wave length during WEC submersion and algorithms of such calculations are presented. Changes of length in power take-off element on working surface are in belt form are accounted for.

Keywords: waves energy, wave energy converter, power take-off element modifications

Капитанчук К. И., Андришин М. П.

РАСЧЕТ УДЛИНЕНИЯ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА МОРСКОЙ ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ СПИРАЛИ В ПЛОСКОСТЬ

Использование энергии морских волн на «глубокой воде» является крайне необходимым, а научные разработки по созданию волновых электростанций — актуальными. Уникальность созданной установки состоит в том, что она способна эффективно работать при любом колебании морской поверхности за счет саморегулирования формы энергопоглощающего элемента под воздействием волн и погружения станции на необходимую глубину в соответствии с погодными условиями на поверхности.

Проблема разрушительного воздействия волн в период резкого изменения силы ветра и, соответственно, амплитуды колебаний поверхности моря, решена путем подтопления энергопоглощающего элемента и платформы станции на глубину, где колебания волн соответствуют расчетным значениям, без изменения режима работы самой станции. При этом потребители стабильно получают заявленное количество электроэнергии при любых погодных условиях.

Существует проблема с определением длины энергопоглощающего элемента, так как при заданных габаритных параметрах волновой электростанции, его форма трансформируется от спирали на расчетном режиме до гофрированной поверхности с переходом у форму ленты при невозбужденном состоянии поверхности моря. При этом длина энергопоглощающего элемента увеличивается.

Впервые определено длину энергопоглощающего элемента волновой электростанции при изменении возбужденности поверхности моря и создана методика расчета в зависимости от условий эксплуатации станции. Выявлено изменение удлинения внешней стороны ленты без переворота та площади проекций энергопоглощающего элемента на поверхности прямоугольной системы координат.

Ключевые слова: морские волны, электростанция, энергопоглощающий элемент, удлинение площадь

Стаття надійшла до редакції 26.06. 2018 р.

Прийнято до друку 27.08.2018 р.

Рецензент — канд. техн. наук, доц. Єнчев С. В.