

УДК 620.91: 627.1

Лісовенко Є. П., к.т.н., доцент, Філіпович Ю. Ю., к.т.н., доцент  
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## **СПОСІБ І УСТАНОВКА ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ І БРИЖІВ ВОДОСХОВИЩ У ЕЛЕКТРИЧНУ ЕНЕРГІЮ**

**Описано спосіб та установку для перетворення енергії вітрових хвиль і брижів, що виникають на морях та водосховищах, у електричну енергію. Виконано аналітичний розрахунок режимів роботи запропонованої установки.**

**Ключові слова:** енергія хвилі, хвильова енергетична установка, ківшева гідротурбіна, насос.

На великих гідроенергетичних водосховищах, а також на морях виникають вітрові хвилі із значними енергетичними параметрами. Запропонована установка призначена для перетворення енергії вітрових хвиль і брижів, що виникають на водосховищах, у електричну енергію. Останнім часом розвиток хвильової енергетики пішов шляхом розробки особливих конструкцій потужних поплавків, енергію качання яких передбачається перетворювати в електричну енергію за допомогою гідравлічних систем.

Установка відноситься до систем хвильових енергетичних установок, а саме таких, у яких у якості хвильових перетворювачів прийняті плаваючі тіла – судно, пліт, понтон тощо, що коливаються відносно нерухомої опори або відносно один одного [1; 4].

**Аналіз останніх досягнень.** Загальновідома хвильова енергетична установка «Пірнаюча качка» англійського винахідника Стефана Солтера [2] або хвильова енергетична установка «Шарнірний пліт» Крістофера Коккерела [2; 3].

Перетворювач «Пірнаюча качка» включає ексцентричні поплавки, що розкачуються на хвилях під дією зміни форми поверхні моря і тиску набігаючої хвилі. Зміна кутового положення поплавка відносно валу, що проходить через нього, перетворюється у роботу насоса, що перекачує робочу рідину у гідравлічний механізм, або за допомогою зубчатої передачі перетворюється у оберти вала генератора.

Суттєвий недолік «качки» той, що стаціонарна установка не може відслідковувати зміну напрямку підходу хвилі, що суттєво знижує її

ефективність. До того ж досить складна і ненадійна гідромашина, що приводиться у дію поплавком, шарнірно закріпленим на довгому (1 миля) і нерухомому валу діаметром 15 м. Однак, головний недолік системи Солтера – важкість практичного виконання. На загальну вісь довжиною в милю і діаметром 15 м лягає величезне навантаження. Тому міцність системи Солтера викликало сумніви у експертів, і фінансування англійським урядом було припинене [2].

Інший пристрій отримав назву плота Крістофера Коккерела. Перша ланка цієї системи – приймач енергії хвиль у вигляді плота із декількох ланок, що шарнірно з'єднані між собою. При проходженні вздовж плота поверхневих хвиль, його ланки змінюють нахил одна відносно іншої, намагаючись розташуватися по рівню вільної поверхні чергової хвилі. При цьому виконується робота, що використовується другим перетворювачем (насосами односторонньої дії, що качають робочу рідину у гідравлічний акумулятор). Звідти робоча рідина надходить у гідравлічний двигун, що обертає генератор електричної енергії [3].

Основною невирішеною проблемою для плота Коккерела є його закорювання. Головний недолік плота Коккерела – складні умови експлуатації і висока вартість обслуговування. Саме з цих причин англійський уряд припинив з 1982 року подальше фінансування робіт у цьому напрямку [4].

**Недоліки відомих установок** наступні [1; 2]: практично не вирішена проблема передачі енергії хвиль першим перетворювачем (крило «качки», пліт Коккерела) другому перетворювачу (насос, гідромашина); не вирішена проблема практичного перетворення змінних пульсацій хвиль у однонаправлений рух обертів електрогенератора; стаціонарне закріплення плотів не може ефективно відслідковувати зміну напрямку хвиль; пліт Коккерела має значну трудомісткість і вимагає створення нових складних пристроїв невідомих на даний час науці і техніці; усі перетворювачі енергії хвиль плота Коккерела перебувають під впливом штормових хвиль, оскільки знаходяться на його поверхні і піддаються дії морської води, що значно знижує термін їх експлуатації; практично не вирішене питання закорювання плота Коккерела і умови переміщення на нове робоче місце прибережної акваторії водосховища або моря; не вирішений практично спосіб управління перетворювачем енергії хвиль шарнірного плота; не вирішені питання забезпечення живучості перетворювачів плота на випадок екстремальних вітрових навантажень, які значно перевищують розрахункові режими.

**Завдання запропонованої установки** – усунення відмічених вище

недоліків відомих хвильових електростанцій і створення способу та пристрою для ефективного і надійного перетворення вітрових хвиль і брижів у електричну енергію.

Поставлена мета досягається за рахунок того, що запропонований спосіб та установка вирішують задачу перетворення енергії вітрових хвиль і брижів у електричну енергію шляхом сукупності послідовного виконання взаємопов'язаних дій, відомих науці і техніці пристроїв, що характеризуються тим, що основний функціональний принцип запропонованого способу полягає у перетворенні енергії хвилі і оформленні змінних пульсацій у однонаправлений рух гідротурбіни і електрогенератора.

На рис. 1 показано схему установки. **Установка складається** із двох частин: надводної круглої або граненої 13 і підводної частини 14. Даний об'єкт має п'ять різних перетворювачів енергії вітрових хвиль і брижів. Перетворювач № 1 – це судно-понтон 1 водовитісненням 200 т (у нашому випадку). Перетворювач № 2 – гірлянди двохходових насосів 2, які практично вирішують проблему перетворення змінної енергії хвиль у однонаправлену подачу під великим напором (у нашому випадку  $H=300$  м) у перетворювач № 3 – бак-акумулятор 3. Активна ківшева гідротурбіна 4 (перетворювач № 4) має загальний вал із ротором генератора 5 (перетворювач № 5), тобто вони з'єднані загальним валом, і частота їх обертів однакова. Важіль першого-другого роду 6 передає енергію першого перетворювача енергії через вертикальну штангу 7, зв'язану шарнірно 8, на шток гірлянди насосів двохсторонньої дії 2. Три таких гірлянди об'єднані на один напірний трубопровід, що під'єднаний до бака-акумулятора 3, який є нижнім б'єфом. Верхній б'єф представлений кільцевою повітряною камерою, з тиском нижче величини (висоти) рідини у баці-акумуляторі. Мета такого вирішення – підвищення економічності і надійності роботи активної ківшевої гідротурбіни 4 і генератора 5. Поставлена мета досягається тим, що бак-акумулятор 3 у верхньому б'єфі оснащений кільцевою повітрянепроникною діафрагмою, розташованою на межі вода-стиснене повітря. Повітрянепроникна діафрагма виконана із матеріалу з питомою вагою меншою питомої ваги води. Повітряна камера постачається від баків-акумуляторів стисненого повітря, які, у свою чергу, постачає компресорна станція, що не показана на кресленнях. Обидві установки знаходяться в приміщеннях (рисунок).

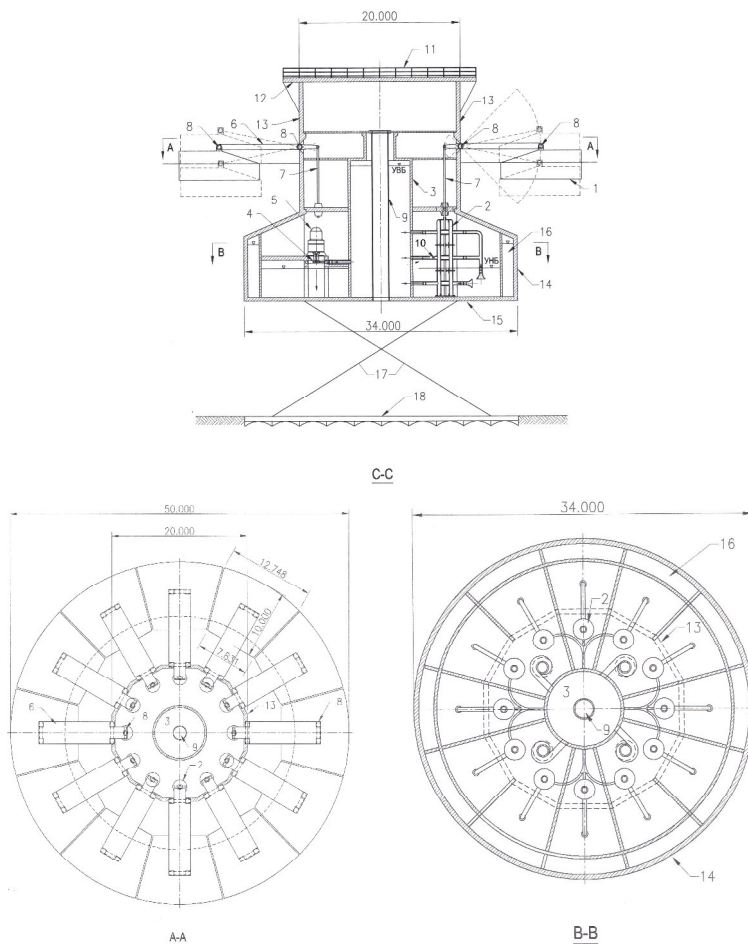


Рисунок. Схема установки для перетворення енергії хвиль і брижів у електричну енергію:

- 1 – судно-понтон; 2 – гірлянда із двохходових насосів; 3 – бак-акумулятор;
- 4 – активна ківшева гідротурбіна; 5 – генератор; 6 – важіль першого і другого роду; 7 – вертикальна штанга; 8 – шарніри; 9 – наскрізна труба;
- 10 – напірні трубопроводи; 11 – огорожа надводної частини;
- 12 – перекриття надводної частини; 13 – надводна частина (кругла або гранена); 14 – підводна частина; 15 – фундамент споруди;
- 16 – ніші кільцевого фундаменту; 17 – троси;
- 18 – кільцевий залізобетонний фундамент

У якості першого перетворювача енергії хвиль приймається плаваюче тіло (судно, понтон, пліт, поплавков тощо). Хвиля, що має однако-ве значення потенційної і кінетичної енергії, наближуючись до перешкоди, перетворює кінетичну енергію у потенційну, внаслідок чого висота хвилі збільшується удвічі, крім того, поплавков, що коливається на хвилях, має приєднану масу води, яка рівна близько половині його водовиштовхування, тому перетворювач енергії хвилі у вигляді плаваючого тіла є найбільш надійним і вигідним у порівнянні із іншими типами відомих перетворювачів. Для передачі змінної енергії плаваючого тіла прийнято простий і надійний важіль першого і другого роду, зв'язаний шарнірно із вертикальною штангою, яка, у свою чергу, також шарнірно зв'язана зі штоком другого перетворювача (№ 2) – високонапірним поршневим насосом двохсторонньої дії.

Насос двохсторонньої дії перетворює змінні пульсації енергії плаваючого тіла, тобто перетворювача № 1 за допомогою робочого тіла (рідини) у постійно направлену високонапірну струмину робочого тіла в напірний бак-акумулятор, що практично вирішує проблему перетворення змінних пульсацій енергії хвиль у однонаправлений рух рідини.

Напірний бак-акумулятор акумулює високонапірну робочу рідину усіх насосів установки. З цією метою верхній б'єф бака-акумулятора оснащено повітрянепроникною діафрагмою із питомою вагою меншою питомої ваги води – вище діафрагми знаходиться заданий підвищений тиск повітря у спеціальному ковпаку. У центрі бака-акумулятора установлюється наскрізна труба оптимального діаметру для пропуску технічних напірних комунікацій, необхідних для управління перетворювачами і їхнім допоміжним обладнанням.

Названі вище перетворювачі і їхнє допоміжне обладнання та прилади розташовуються у спеціальній плаваючій споруді, що являє собою об'єкт, який складається із двох частин: надводної і частково підводної круглої або граненої труби, що служить для кріплення і швартування на її зовнішній стороні перетворювачів хвильової енергії (перетворювач № 1), а внутрішня частина труби забезпечує постачання і експлуатацію підводної розширеної частини машинного залу, розташованого на глибині, що не піддається впливу штормових хвиль, до того ж розташування перетворювачів (зокрема гідротурбіни) нижче статичного рівня моря збільшує потужність і виробіток електроенергії відповідно до її заглиблення.

Заякорювання об'єкта здійснюється за допомогою кільцевого залізобетонного фундаменту по периметру дна об'єкта, що зв'язаний із кільцевим фундаментом тросами. Низ фундаменту має ніші, перекриті еластичним матеріалом, при транспортуванні об'єкта вони заповню-

ються стисненим повітрям, і пересуваються за допомогою спеціальних окремих тросів, зв'язаних із лебідкою. Фундамент спливає і притискається до днища споруди. На місці установаження споруди повітря із них відкачується – і фундамент щільно притискається до поверхні дна моря. Крім того, слід відмітити, що конструкція запропонованої споруди вільно обтікається, і наскрізна для поверхневих хвиль, тому відсутня зворотна (скидна) хвиля, яка йде назустріч наступаючої основної хвилі і зменшує її енергію (недолік «качки» С. Солтера і нагадує деякі позитивні якості плота Коккерела).

Для наочності розглянемо приклад використання запропонованого способу і установки перетворення енергії вітрових хвиль і брижів у електричну енергію. Для цього визначимо енергетичні параметри невеликого судна оптимального водовитіснення  $m_c \approx 200$  т. Таких суден – перетворювачів енергії хвиль на даному об'єкті прийнято 12. Усі вони розташовуються і швартуються у надводному положенні навколо вертикальної круглої або граненої горловини надводної частини споруди (рисунок).

Для розрахунків використаємо формулу потужності

$$N_1 = \frac{2 \cdot m_c \cdot h_e \cdot g}{T}, \quad \text{кВт}, \quad (1)$$

де  $m_c$  – водовитіснення судна, кг;  $h_e = 0,5; 1; 2; 3; 4; 5$  та  $6$  м – висота підйому центру ваги судна на хвилі;  $T$  – період коливання судна, с. Невідоме значення періоду  $T$  визначаємо за залежностями, отриманими згідно натурних досліджень [4], які відповідають характеру хвильових умов водосховищ та Чорного моря

$$h_\lambda \approx \frac{0,2 \cdot v_{em}^2}{T}, \quad (2)$$

де  $v_{em}$  – швидкість вітру;

$$\lambda \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot v_{em}^2}{g}, \quad (3)$$

$$T_\lambda \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot v_{em}}{g}. \quad (4)$$

Із залежності (2) отримаємо швидкість вітру  $v_{em} \approx \sqrt{5 \cdot h_e \cdot T_\lambda}$  для усіх значень  $h_e$ . Підставивши отримане значення  $v_{em}$  у формулу (4), отримаємо

$$T_{\lambda} \approx 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{h_6}{g}}. \quad (5)$$

Підставивши отримані значення  $T_{\lambda}$  в залежність (1), отримаємо значення  $T_{\lambda}$ ,  $\lambda$ ,  $N_I$  для усіх значень  $h_{\lambda}$ . Результати розрахунків зводимо у таблицю 1.

Таблиця 1

Розрахунок значень  $T_{\lambda}$ ,  $\lambda$ ,  $N_I$  для усіх значень  $h_{\lambda}$ .

$h_{\lambda}$ , м	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
$T_{\lambda}$ , с	3,2	4,5	6,4	8,0	9,0	10,0	11,0
$\lambda$ , м	15	30	60	76	120	160	200
$N_I$ , кВт	613	990	1264	1500	1700	1960	2400
$v_{от}$ , м/с	5	7	10	12,24	14,14	16,00	18,00

Результати наведених у таблиці 1 розрахунків більше характеризують брижі, які часто зустрічаються внаслідок частих штормових вітрів у певній частині моря або водосховища. Вітрові хвилі можуть посилити, понизити або перетворити їх у хаотичні хвилі.

Передача енергії перетворювача № 1 (судна-понтону), перетворювачу № 2 (високонапірному поршневному насосу двохсторонньої дії) відбувається за допомогою важеля першого-другого роду і вертикальної штанги, зв'язаних шарнірно (рисунок). ККД передачі енергії перетворювача № 1 перетворювачу № 2 приймаємо  $\eta_{пер} \approx 0,96$ .

Насос двохсторонньої дії за один подвійний хід поршня виконує два процеси усмоктування і два нагнітання – для цього є два усмоктувальних і два нагнітальних клапани. При переміщенні поршня вгору, у нижній частині робоча рідина (прісна вода) усмоктується  $v_{усм} = F \cdot s$ , а у верхній – виштовхується  $v_{наг} = (F - f) \cdot s$ , де  $f$  – площа штока;  $F$  – площа поршня;  $s$  – хід поршня.

За один подвійний хід поршня подача насоса двохразової дії рівна

$$v_2 = v_{наг} + v_{усм} = (2 \cdot F - f) \cdot s, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6)$$

Середня подача, не враховуючи площі штока ( $f$ ) становить

$$Q_{сеп} = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot s \cdot \frac{n}{60}, \quad (7)$$

де  $D_1$  – діаметр поршня, приймається  $D_1=1,2$  м (менший діаметр не за-

безпечує подачу робочої рідини, а більший вимагає влаштування громіздкого пристрою);  $n$  – число періодів хвилі за хвилину; значення ходу поршня  $s$  і подачі  $Q_{нас}$  наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Значення ходу поршня $s$ і подачі $Q_{нас}$							
$h_6$ , м	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
$s$ , м	0,125	0,25	0,45	0,65	0,85	1,05	1,25
$n$	18,7	13,33	9,37	7,5	6,66	6,00	5,45
$Q_{нас}$ , м <sup>3</sup> /с	0,048	0,068	0,086	0,1	0,115	0,13	0,14

Подача двохстороннього насоса злегка пульсуюча. Для зменшення цих небажаних явищ насос подвійної дії оснащується повітряними ковпаками, що являють собою резервуари із повітрям. Вони установлюються у безпосередній близькості від насоса. Один – у кінці усмоктувального трубопроводу, другий – на початку напірного. Повітряні ковпаки відіграють роль швидкодіючих акумуляторів які, маючи достатні об’єми, можуть значно підвишити рівномірність подачі насоса [6]. ККД двохстороннього насоса приймаємо  $\eta_n=0,8$ .

Однак попередній аналіз роботи одного насоса двохсторонньої дії з напором  $H=230$  м показав, що він не забезпечує використання енергії, яку надає перший перетворювач енергії хвиль (судно-понтон водовитісненням  $m_c=200$  т). Причина – мала кількість періодів хвилі за хвилину, згідно формули середньої подачі насоса двохсторонньої дії (7).

У якості другого перетворювача приймаємо гірлянду декількох насосів двохсторонньої дії, поршні яких розташовані і працюють на одному вертикальному штоці об’єднаних насосів. Таке вирішення зберігає попереднє місце розташування одного насоса, але дозволяє збільшити у декілька разів об’ємну подачу і повністю використовувати енергію першого перетворювача. Остаточо приймаємо напір у третьому перетворювачі (баці-акумуляторі) рівним  $H=300$  м. ККД бакакумулятора приймаємо  $\eta_6=0,98$ .

У якості четвертого перетворювача хвиль приймаємо ківшеву гідротурбінну з напором  $H=300$  м (рис. 1). Переваги активної ківшевої турбіни перед радіально-осьовими полягають у тому, що вони у вказаній області ( $H=300$  м) мають більш високий ККД, мають більш полого робочу характеристику, прості конструктивно і мають низьку вартість. У даному випадку доцільна вертикальна компоновка агрегату із шістьма розподільниками кільцевого типу. Така компоновка є класичною для багатосоплових ківшевих гідротурбін. ККД активної гідротурбіни приймаємо  $\eta_7=0,9$ . П’ятий перетворювач енергії хвиль – електрогене-



ратор устаноулюється на одному валу з гідротурбіною  $\eta_{ел.г.}=0,94$ ,  $\eta_{заг.}=0,65$ .

Елементи пристрою, що забезпечують використання енергії вітрових хвиль і брижів розташовуються у споруді, стіни якої складаються із двох частин. Посередині стіни знаходиться силовий каркас, що складається (з метою економії) із відпрацювавших ресурс залізничних рейок. Товщина стін споруди 1 м. Напружений шар стіни товщиною 0,5 м виконується із залізобетону за допомогою опалубки, виконаної із чавунних плит і відливок, що опираються на силовий каркас. Чавун стійкий до впливу морської води на залізо. Внутрішня частина стіни також має опалубку із чавуну, але заповнена під тиском пресованою глиною. Це викликане тим, що глина має менший коефіцієнт фільтрації, ніж залізобетон. Це надійно забезпечує герметичність споруди від вологи.

**Підводячи підсумки** і визначаючи можливості практичного використання запропонованої установки для перетворення енергії вітрових хвиль і брижів у електричну енергію, результати розрахунків наводимо у таблиці 3.

Таблиця 3

Розрахунки режимів роботи пристрою для перетворення енергії вітрових хвиль і брижів у електричну енергію

1	$h_{\lambda} \approx \frac{0,2 \cdot v_{em}^2}{T}$ , м	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
2	$N_c = \frac{2 \cdot m_c \cdot h_e \cdot g}{T}$ , кВт	613	990	1264	1500	1700	1960	2400
3	$N_{нов} = N_c \cdot \eta_{об}$ , кВт	400	643	784	975	1105	1274	1560
4	$Q_{нов} = \frac{400 \cdot N_{пол}}{9,81 \cdot 300}$ , м <sup>3</sup> /с	0,136	0,22	0,27	0,33	0,375	0,43	0,53
5	$Q_n = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot s \cdot \frac{n}{60}$ , м <sup>3</sup> /с	0,048	0,068	0,096	0,1	0,115	0,13	0,14
6	$3 \cdot Q_n$ , м <sup>3</sup> /с	0,144	0,2	0,29	0,3	0,345	0,4	0,42
7	$3 \cdot N_n$ , кВт	423	600	846	882	1014	1146	1236
8	$\Sigma 12 \cdot N_n$ , кВт	2292	3320	4828	5094	5700	6550	7670

У рядку (1) наведена висота хвилі; у рядку (2) – потужність перетворювача № 1, кВт; рядок (3) – потужність із втратами енергії  $\eta_{заг.}=0,65$ ; рядок (4) – необхідна подача двохразового насоса; рядок (5) – дійсна подача одного двохразового насоса; рядок (6) – подача трьох двохразових насосів; рядок (7) – потужність, необхідна для трьох насосів; рядок (8) – загальна потужність 12-ти перетворювачів № 1 із

урахуванням  $\eta_{зас}=0,65$ .

Спосіб та пристрій перетворення енергії вітрових хвиль і брижів у електричну енергію ґрунтуються на використанні сукупності послідовного виконання взаємопов'язаних дій, відомих науці і техніці пристроїв, що характеризуються тим, що основний функціональний принцип запропонованого способу полягає у перетворенні енергії хвилі і оформленні змінних пульсацій у однонаправлений рух гідротурбіни і електрогенератора.

**Крім постачання електроенергією** прибережних населених пунктів, промислових і сільськогосподарських підприємств, створюються сприятливі умови експлуатації і використання берегів, значно зменшується розмив прибережної зони штормовими хвилями, створюються сприятливі умови для прибережного судноплавства тощо. Також вони можуть виконувати охоронну і захисну роль у акваторії водосховища або моря.

1. Кривченко Г. И. Гидроэлектрические станции / Кривченко Г. И., Карелин В. Я. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 464 с. 2. Росс Д. Энергия волн / Д. Росс. – Л. : Метеоиздат, 1981. – 112 с. 3. Коробков В. А. Преобразование энергии океана / В. А. Коробков. – СПб. : Судостроение, 1986. – 279 с. 4. Вершинский Н. В. Энергия океана / Н. В. Вершинский. – М. : Наука, 1986. – 152 с. 5. Кривченко Г. И. Гидравлические машины: турбины и насосы / Г. И. Кривченко. – М. : Энергия, 1978. – 320 с. 6. Степанов М. Н. Гидравлические машины / М. Н. Степанов. – К. : Вища школа, 1994. – 168 с. 7. Карелин В. Я. Сооружения и оборудование малых гидроэлектростанций / Карелин В. Я., Волшаник В. В. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 200 с. 8. Гидроэнергетическое и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций. Справочное руководство / под ред. Ю. С. Васильева и Д. С. Щавелева. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. Основное оборудование ГЭС. – 400 с.

Рецензент: д.т.н., професор Хлапук М. М. (НУВГП)

---

**Lisovenko Y. P., Candidate of Engineering, Associate Professor,  
Filipovych Y. Y., Candidate of Engineering, Associate Professor,  
(National University of Water Management and Nature Resources Use,  
Rivne)**

**METHOD AND DEVICE FOR ENERGY CONVERSION OF WIND  
WAVES AND SWELL OF WATER RESERVOIRS INTO  
ELECTRICAL ENERGY**

**Discloses a method and device for converting energy of wind-generated waves and swell, resulting in reservoirs, into electrical energy.**

**Completed analytical calculation modes of operation of the proposed installation.**

**Keywords:** wave energy, wave power plant, Pelton turbine, pump.

---

Лисовенко Е. П., к.т.н., доцент, Филипович Ю. Ю., к.т.н., доцент  
(Национальный университет водного хозяйства и природопользования,  
г. Ровно)

### **СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРОВЫХ ВОЛН И ЗЫБИ ВОДОХРАНИЛИЩ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ**

**Описан способ и устройство для преобразования энергии ветровых волн и зыби, возникающих на морях и водохранилищах, в электрическую энергию. Выполнен аналитический расчет режимов работы предложенной установки.**

**Ключевые слова:** энергия волны, волновая энергетическая установка, ковшевая гидротурбина, насос.

---