

УДК 532.528

# ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОЙ ПОПЛАВКОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Г. Ю. САВЧЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

ул. Желябова, 8/4, 03680, ГСП, Киев-180

\*E-mail: savch@kiev ldc.net

Получено 10.03.2016

С использованием статистических данных наблюдений параметров морских волн, линейной теории волн и теории волновых спектров оценивается располагаемая энергия морских волн с максимальной амплитудой до 3 м. На основе трехпоплавкового модуля изгибной плавучей ВЭС оценивается средняя за период мощность, приходящаяся на ширину 1 м фронта волны и ширины станции. Предложены простые расчетные формулы для оценки максимально возможной мощности модуля с учетом водоизмещения поплавков, длины рычагов и изменения осадки поплавка в работе. Приводятся рекомендации для выбора оптимальных параметров модуля ВЭС при адаптации к параметрам волнения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** энергия плавучей волновой станции, модуль ВЭС, оценка мощности

З використанням статистичних даних спостережень параметрів морських хвиль, лінійної теорії хвиль і теорії хвильових спектрів оцінюється наявна енергія морських хвиль з максимальною амплітудою до 3 м. На основі трьохпоплавцевого модуля вигинистої плавучої ХЕС оцінюється середня за період потужність, що припадає на ширину 1 м фронту хвилі і ширини станції. Запропоновано прості розрахункові формули для оцінки максимально можливої потужності модуля з урахуванням водотонажності поплавців, довжини важелів і зміни занурення поплавця в роботі. Наводяться рекомендації для вибору оптимальних параметрів модуля ХЕС при адаптації до параметрів хвилювання.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** енергія плавучої хвильової станції, модуль ХЕС, оцінка потужності

Using statistic data of observations of sea wave parameters, the linear theory of waves and the theory of wave spectrums, the available energy of sea waves with maximal amplitude up to 3 m is estimated. On the basis of a three-float module of the flexural floating WES the average power for a period is estimated. This power corresponds to 1 m of the wave front width and of the station width. Simple calculation formulae to estimate the maximally possible power of the module with taking into account the float displacement, lengths of levers and variation of float draught in-process are proposed. Recommendations for choice of optimal parameters of the WES module during adaptation to the sea roughness parameters are given.

**KEY WORDS:** energy of floating wave station, WES module, power estimation

## ВВЕДЕНИЕ

По данным Государственного управления гидрометслужбы протяженность береговой линии Украины у берегов Черного и Азовского морей составляет около 3 тысяч километров.

При этом ресурс волновой энергии всей береговой линии Украины оценивается величиной 200 млрд. кВт·ч в год при средней плотности  $5 \div 7.5$  кВт/м.

Для сравнения: плотность потока солнечной энергии для Украины составляет  $0.5$  кВт/м<sup>2</sup>, а ветровой энергии –  $0.2 \div 1.6$  кВт/м<sup>2</sup>.

Помимо относительно высокой концентрации энергии волновая энергетика имеет сравнительно низкие затраты на капитальное строительство среди других видов возобновляемой энергии:

ВЭУ – 1000 \$/кВт

СолнЭУ – 1400 – ” –

ВетрЭУ – 1600 – ” –

Волновые станции разделяются по своему расположению на береговые, прибрежные, донные и плавучие. По принципу отбора энергии – переливные, компрессионные, колебательные, гидростатические. По типу преобразования энергии – турбинные, механические, электромагнитные.

Среди волновых станций плавучие-поплавковые станции имеют самые низкие капитальные затраты и стоимость обслуживания.

Обычно поплавковая волновая станция состоит из системы плотиков, шарнирно соединенных между собой, которая удерживается якорем на определенной глубине. Такая станция работает в режиме огибания волны и ее рабочими ходами являются угловые повороты плотиков относительно друг друга на волнении. Впервые предложена в 1935 г. К.Э. Циолковским [4].

Рабочим элементом волновой поплавковой станции является "модуль", состоящий минимум из двух плотиков. Из таких модулей монтируется

волновая станция, в которой системы модулей могут быть скомпонованы и развернуты как вдоль движения волн, так и поперек.

Поскольку станции состоят из одинаковых элементов – модулей, то, в первую очередь, необходимо указать основные параметры модуля и соотношения для выбора оптимальных параметров, когда трансформация энергии волн будет максимальной для заданных амплитуды  $A_0$  и длины  $\lambda_0$  волны.

Для оценки энергии вырабатываемой модулем поплавковой электростанции необходимо знать характеристики волнения в районе постановки волновой электростанции (ВЭС). К ним относятся амплитуда  $A$ , длина  $L$ , период  $T$  волны и количество часов в год  $O$  ч/год наличия волн заданных параметров. Существования волн амплитудой не менее  $A_0$  называется "обеспеченностью" волн амплитуды  $A_0$ :

$$O(A_0) = \frac{T(A_0)}{364 \cdot 24} = \frac{T(A_0)}{8736}.$$

Несмотря на относительно невысокую плотность потока энергии, волны Черного моря создают поток волновой энергии  $\bar{E}$  с одного метра береговой линии:

$$\begin{aligned} \bar{E} &\geq 1.7 \text{ кВт/м в течение } 7000 \text{ часов/год,} \\ \bar{E} &\geq 13.5 \text{ кВт/м в течение } 2450 \text{ часов/год.} \end{aligned}$$

## 1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯ ПЛАВУЧЕЙ ПОПЛАВКОВОЙ ВЭС

Среди предложенных конструкций поплавковых ВЭС можно указать плот Коккерелла и волновой насос Мак Кэйба [4]. ВЭС Мак Кэйба имела два прямоугольных понтона, полную длину 40 м и была установлена в Ирландии в 1996 г.

Другая плавучая ВЭС "Пеламис" мощностью 750 кВт имела водоизмещение 700 тонн и длину 150 м, четыре подвижных сегмента диаметром 3.5 м и три преобразователя энергии в местах соединения сегментов. В мае 2013 "Пеламис" прошел успешное испытание в Европейском центре морской энергетики (ЕМЕС) [5].

На рис. 1, *a* показана схема модуля ВЭС из двух плотиков, совершающих угловые колебания относительно друг друга при огибании волн. На схемах 1, *b*, *в* показаны кинематические равноценные схемы. Схема *b* – четырехпоплавковый модуль, где каждый плотик заменен двумя поплавками при сохранении длины –  $L$ . Схема *в* – трехпоплавковый модуль, где соседние поплавки заменены одним центральным, плавучесть и вес которого в 2–4 раза выше. При этом левый поплавок жестко связан с

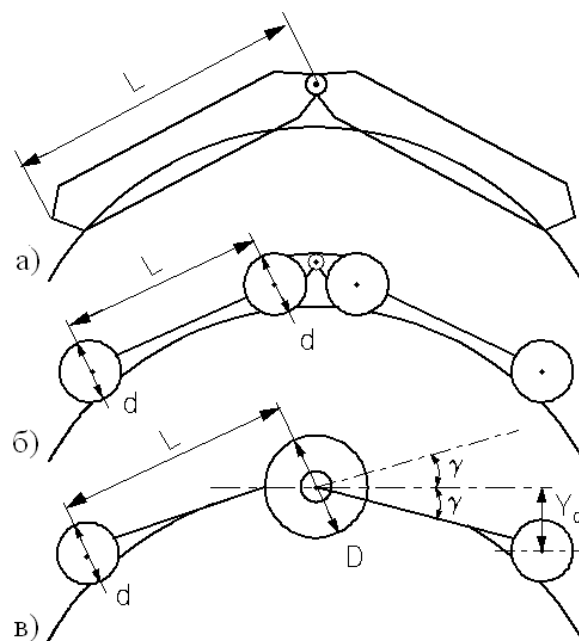


Рис. 1. Модули изгибной ВЭС:

*a* – 2<sup>х</sup> плотиковый модуль Циолковского (1935) г.;  
*б* – 2<sup>х</sup> плотиковый 4<sup>х</sup> поплавковый модуль (аналог);  
*в* – 2<sup>х</sup> элементный, 3<sup>х</sup> поплавковый модуль (аналог)

центральным, а правый имеет шарнирное соединение и длину рычага –  $L$ .

В качестве кинематических особенностей следует отметить, что в работе левый и правый поплавки создают моменты, уравнивающие друг друга. При этом вертикальные силы плавучести и веса боковых поплавков в каждый момент компенсируются силой плавучести и веса центрального поплавка.

Параметрами согласования волновой энергии с нагрузкой электрогенератора будут момент и угловая скорость на рычаге поплавка с моментом и угловой скоростью на валу редуктора электрогенератора.

К основным параметрам модуля рис. 1 относятся:

- $L_M$  – длина модуля по ходу волны;
- $B_M$  – ширина модуля по фронту волны;
- $D$  – диаметр центрального поплавка;
- $L_d = \frac{L_M}{2}$  – длина рычагов боковых поплавков;
- $W_d = \frac{\pi D_d^2}{4} \cdot B$  – объем боковых поплавков;
- $G_d$  – вес бокового поплавка;
- $P_d$  – запас плавучести бокового поплавка;
- $Q_d$  – водоизмещение бокового поплавка;

$h_0$  – осадка бокового поплавка в покое;

$W_D = \frac{\pi D_d^2}{4} \cdot B_M$  – объем центрального поплавка;

$G_D$  – вес центрального поплавка;

$Q_D$  – водоизмещение центрального поплавка.

## 2. ОЦЕНКА РАСПОЛАГАЕМОЙ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Характеристики ветровых волн в общем случае зависят от:

- скорости ветра;
- времени действия ветра;
- длины разгона волн ветром.

В ветровом волнении различают три состояния:

- состояние развития волн;
- состояние полностью развитого волнения;
- состояние затухания волнения.

В ветровом волнении присутствуют волны различных высот и длин, однако период  $T$ , длина  $L$  и скорость  $V$  единичных волновых составляющих оказываются связаны простыми соотношениями [2]:

$$V = 1.34\sqrt{L} = 3/0.3T; \quad L = 0.557V^2 = 5.12T^2;$$

$$T = 0.33V,$$

где  $V$  – выражена в узлах,  $L$  – в футах,  $T$  – в секундах.

### 2.1. Теория кумулятивных спектров волн

Согласно этой теории [2], состояние полностью развитого волнения для данной скорости ветра характеризуется спектром, где квадраты амплитуд волн поставлены в соответствие собственным частотам  $a^2(f)$ .

Если просуммировать квадраты амплитуд в спектре в диапазоне частот  $0 < f < f_a$ , то можно построить кумулятивный энергетический спектр  $E_K = E(f_a)$ .

Кумулятивные спектры имеют размерность  $[M^2]$  и позволяют оценивать высоту волн  $H$  по их величине:

$$\text{средняя высота волн } H_c = 1.71\sqrt{E_K};$$

$$\text{значительная высота волн } H_z = 2.83\sqrt{E_K};$$

$$1/10 \text{ наиболее высоких волн } H_{1/10} = 3.6\sqrt{E_K}.$$

Кумулятивные энергетические спектры для различных скоростей ветра приведены в справочниках [2]. Там же приводились таблицы  $H(E_K)$  и  $T(V_B)$  для расчета и прогнозирования развития волн.

Теория волновых спектров  $H_{cpF} = 1.7/\sqrt{E}$ ,  
 $\tilde{T} = 0.285V_B \text{ узл.}, \tilde{L} = 3.41T^2.$

### 2.2. Наблюдаемые параметра ветровых волн

В литературе накоплены большие статические данные о параметрах ветровых волн. Средние величины максимальных наблюдаемых волн указаны в табл. 1:

Ветер		Волны			
Баллы	$V$ , м/сек	$H$ , м	$L$ , м	$V$ , м/сек	$T$ , сек
5	8	1.2	25	6.2	4.0
6	10	2.6	39	7.8	5.0
7	13	4.0	87	11.8	7.4
8	16	5.0	85	11.5	7.4
9	16	5.8	129	14.2	9.1
9	19	8.4	138	14.7	9.4
10	22	11.5	180	16.8	10.7
10	25	12.6	285	21.1	13.5
10	25	11.0	200	17.1	11.8
11	27	14.5	376	24.4	15.5

Связь между высотой морских волн  $H = 2a$  и их длиной по результатам наблюдений дается приближенной формулой [1]

$$H = 2a = 0.22\lambda^{0.718}. \quad (1)$$

### 2.3. Линейная теория поверхностных волн

Согласно линейной теории форма плоской прогрессивной волны имеет вид косинусоиды:

$$y = a \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

с круговой частотой  $\omega = 2\pi/T$ , волновым числом  $k = 2\pi/\lambda$  и амплитудой  $a$  [3].

Линейная теория позволяет легко установить вертикальную скорость  $V_y$  движения волны в виде ее мгновенной, средней и максимальной величин:

$$V_y = a\omega \cos \omega t; \quad \bar{V}_y = 4a/T; \quad V_{y\max} = a\omega.$$

Форма поверхности волны имеет важное значение при проектировании ВЭС изгибного типа, где необходимо учитывать изменение угла волнового склона  $\alpha_B$ :

$$\alpha_B = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin(kx - \omega t). \quad (3)$$

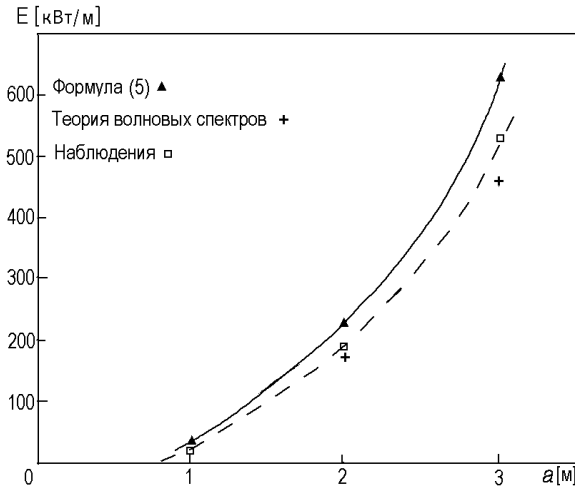


Рис. 2. Значения мощности волн [кВт/м], осредненные по длине волны

Максимальное значение угла волнового склона

$$\alpha_{Vmax}^o = 57.3 \frac{2\pi a}{\lambda}. \quad (4)$$

Для больших глубина, период и длина волны связаны соотношением [1]

$$T = 0.8\sqrt{\lambda}. \quad (5)$$

Полная энергия волн, приходящаяся на участок, равный длине волны и шириной 1 м, определяется соотношением

$$\overline{E}_\lambda = \frac{\gamma a^2}{2} \lambda = 4905 a^2 \lambda, \quad [Нм/м]. \quad (6)$$

Удельная мощность волн, приходящаяся на 1 м ширины их гребня (фронта), будет определяться по энергии (6) за период  $\overline{T}$ :

$$\overline{N} = \frac{4.9 a^2 \lambda}{T} \quad [кВт/м], \quad (7)$$

где  $\gamma$  – удельный вес воды [кГ/м<sup>3</sup>].

Располагаемая удельная мощность волн  $N$  [кВт/м], приходящаяся на 1 м волнового фронта, представлена на рис. 2, где представлены расчеты по теории спектров и результаты наблюдений за параметрами морского волнения в диапазоне амплитуд  $a = 1 \div 3$  м, длине волн  $L$  до 100 м и периода до  $T = 10$  с.

Однако при морском волнении могут возникать и нелинейные волны трохоидальной формы. Они возникают среди волн максимальной высоты на глубокой воде при  $h/\lambda = 0.14$  и имеют максимальный угол склона  $\alpha_B = 30^\circ$ .

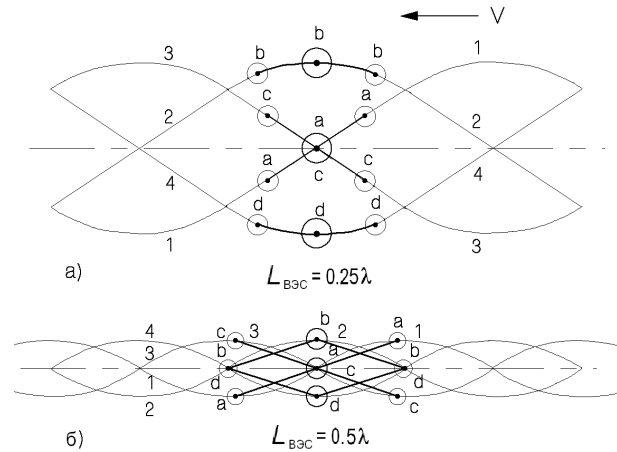


Рис. 3. Характерные фазы рабочего цикла двухэлементной изгибающей ВЭС в режиме огибания волны

Волны с крутыми склонами кноидальной формы возникают также на мелководье, где они трансформируются вплоть до обрушения.

### 3. РАБОТА ИЗГИБНОЙ ВЭС В РЕЖИМЕ ОГИБАНИЯ ВОЛН

В режиме огибания волны двухэлементный трехпоплавковый модуль изгибающей ВЭС должен отслеживать профиль волны. При этом боковые поплавки будут подниматься и опускаться в противофазе относительно центрального поплавка, а подвижные элементы модуля будут совершать угловые колебания вокруг оси центрального поплавка.

Для обеспечения режима огибания волны якорная цепь ВЭС должна быть достаточно длинной и тяжелой, чтобы допускать перемещение модуля по вертикали и ограничивать перемещение по горизонтали.

Характерные фазы рабочего цикла модуля ВЭС показаны на рис. 3, где отмечены последовательные фазы движения волны через  $1/4$  периода в направлении справа налево.

Согласно схеме движения рис. 3, а, модуль имеющий начальную прямолинейную позицию поплавков на склоне волны "а а", в фазе "1" переходит в выгнутую позицию "b b" в фазе волны "2", смещенную на  $1/4 \lambda$  в направлении движения волны. При этом боковые поплавки на длине рычага  $L = 0.125\lambda$  оказываются смещенными вниз симметрично центральному поплавку на максимальную величину  $Y_d$  по вертикали.

### 3.1. Оценка мощности модуля ВЭС

Для того, чтобы силы веса и плавучести поплавок могли совершать работу при его периодических вертикальных движениях на волнах, поплавок должен изменять свою осадку  $h_0$ .

Примем, что силы веса  $G'_p$  и плавучести  $P'_p$  линейно зависят от осадки  $h_0 \pm \Delta h$ :

$$P'_p = \frac{Q_d}{D_d} \Delta h; \quad G'_p = \frac{Q_d}{D_d} (-\Delta h), \quad (8)$$

где  $Q_d$  – полное водоизмещение поплавка;  $D_d$  – высота (диаметр) поплавка;  $\Delta h$  – изменение осадки;  $h_0$  – осадка покоя поплавка.

Согласно кинематики движения поплавка на волне рис. 3 линейная теория волн позволяет вычислить величину вертикального перемещения поплавка  $Y_d$  при переходе модуля из крайней позиции "b b b" в нижнюю "d d d":

$$Y_d = 2a [1 - \sin(2\pi(0.25 + \bar{L}_d))] = 2Ka, \quad (9)$$

где  $\bar{L}_d = \frac{L_d}{\lambda}$  – безразмерная длина рычага.

Работа силы плавучести (8) на пути (9) должна учитывать сокращение пути на величину изменения осадки  $\Delta h$ :

$$E_1 = P'_p(Y_d - \Delta h). \quad (10)$$

Работа на пути всплывания  $\Delta h$  до осадки покоя  $h_c$  при линейной зависимости силы плавучести от осадки (10) будет определяться соотношением

$$E_2 = \frac{1}{2} P'_d \Delta h = \frac{1}{2} \frac{Q_d}{D_d} \Delta h^2. \quad (11)$$

Полная работа при подъеме поплавка будет равна сумме (10) и (11):

$$E_1 + E_2 = P'_d(Y_d - \frac{1}{2} \Delta h). \quad (12)$$

Средняя мощность модуля за полный период будет

$$\bar{N} = \frac{4}{102} \frac{Q_d \Delta h}{T D_d} \left( Y_d - \frac{1}{2} \Delta h \right). \quad (13)$$

Если вместо изменения осадки  $\Delta h$  указать ее максимальную величину

$$\Delta h \leq \frac{D_d}{2},$$

то получим оценку средней мощности при максимальной осадке:

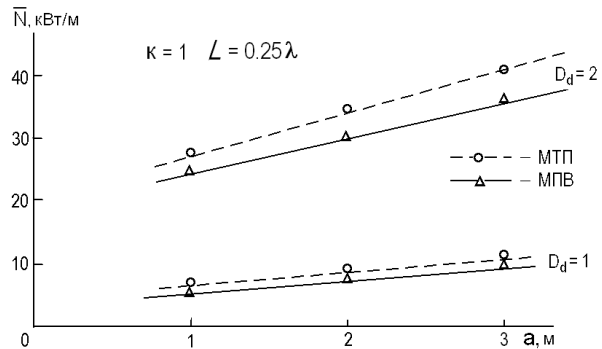


Рис. 4. Средняя мощность модуля ВЭС в зависимости от амплитуды волн и размеров боковых поплавков  $D_d = 1; 2$ . Средняя мощность определена для значений  $k = 1$  при длине рычага  $L = 0.25\lambda$  (9).

Сплошная линия – мощность  $\bar{N}$  по формуле (13) (модель МПВ), (14); штриховая линия – мощность  $\bar{N}$  по формуле (15), где использована модель точечных размеров поплавка (МТП)

$$\bar{N}_m = \frac{2}{102} \frac{Q_d}{T} \left( Y_d - \frac{D_d}{4} \right). \quad (14)$$

Если в формуле (14) заменить  $Y_d$  его эквивалентным значением (9)

$$Y_d = 2Ka,$$

где  $K$  изменяется в пределах  $0 \div 1$  и зависит от длины рычага  $\bar{L}_d = \frac{L_d}{\lambda}$ , то можно получить максимальную оценку мощности в виде

$$\bar{N}_m = \frac{4}{102} \frac{Q_d a}{T}. \quad (15)$$

когда  $K = 1$ ,  $0.25D_d \ll 2Ka$ .

Оценка мощности по (15) означает, что используется модель с точечными размерами поплавка (МТП), но максимально возможными силами веса и плавучести и оптимальной длиной рычага  $L_d = 0.25\lambda$ . Такая модель является идеализированной, но она полезна своей простотой для максимальной оценки мощности при выборе параметров модуля, габаритов поплавка и электрогенератора.

На рис. 4 представлена средняя мощность модуля ВЭС, рассчитанная по формулам (13), (14) с учетом осадки (сплошная линия  $\Delta$  – модель погружного в волну поплавка (МПВ) и по модели точечных размеров поплавка (МТП) (15) – штриховая линия  $\circ$ ), для диаметров боковых поплавков  $D_d = 1$  м и  $D_d = 2$  м.

Сравнение средней мощности модуля с располагаемой энергией волн (рис. 2) показывает возможность использования модуля от 3 до 60% располагаемой энергии волн.

гаемой энергии волн. Отбор энергии волн повышается с увеличением амплитуды волн и диаметра поплавков.

## РЕКОМЕНДАЦИИ

Структура формул для оценки средней мощности  $\bar{N}$  показывает, что для обеспечения максимальной мощности выражение в скобках в формулах (13), (14) должно быть максимальным. Это можно сделать двумя независимыми путями:

1. Увеличить путь вертикального движения поплавка  $Y_d$  (9) за счет увеличения относительной длины рычага  $\bar{L}_d = \frac{L_d}{\lambda}$  поплавок (рис. 3, б):

$$\bar{L}_d = \frac{L_d}{\lambda} \geq 0.25;$$

2. Уменьшить изменение осадки  $\Delta h$  поплавок при сохранении силы  $P'_d; G'_p$  (8), что достигается изменением формы поплавков на плоские прямоугольные и сплюснутые эллиптические [5]:

$$\Delta h \left| \begin{array}{l} \rightarrow O, \\ \frac{\Delta h}{D_d} = \text{const.} \end{array} \right.$$

Рекомендуется использовать волны амплитудой  $0.5 \div 1.75$  м и периодом  $T = 4 \div 7$  с. Такие волны имеют умеренную длину волны  $\lambda = 16 \div 60$  м и обеспеченность – 7000 ÷ 2500 часов в год для побережья Черного моря.

1. *Войткунский Я.И., Першитц Р.Я., Титов И.А.* Справочник по теории корабля.– Л.: Судостроение, 1960.– 687 с.
2. *Пирсон В.Дж.* Ветровые волны.– М.: ИЛ, 1962.– 441 с.
3. *Ньюмен Дж.* Морская гидромеханика.– Л.: Судостроение, 1985.– 362 с.
4. *Коробков В.А.* Преобразование энергии океана.– Л.: Судостроение, 1986.– 240 с.
5. Pelamis wave power The Scotsman Newspaper Tu 21 May 2013  
<http://www.scotsman.com/news/environment/>