

В.Н. АНОСОВ

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ В ПОЛЕЗНУЮ РАБОТУ

Рассмотрены теоретические и методические вопросы оценки эффективности преобразования энергии морского волнения в полезную работу в т.ч. электроэнергию. Приведены результаты испытаний волнового энергетического демпфера, предназначенного для защиты береговых сооружений и преобразования энергии морского волнения в электроэнергию.

Ключевые слова: морское волнение, преобразование энергии, волновой энергетический демпфер, эффективность

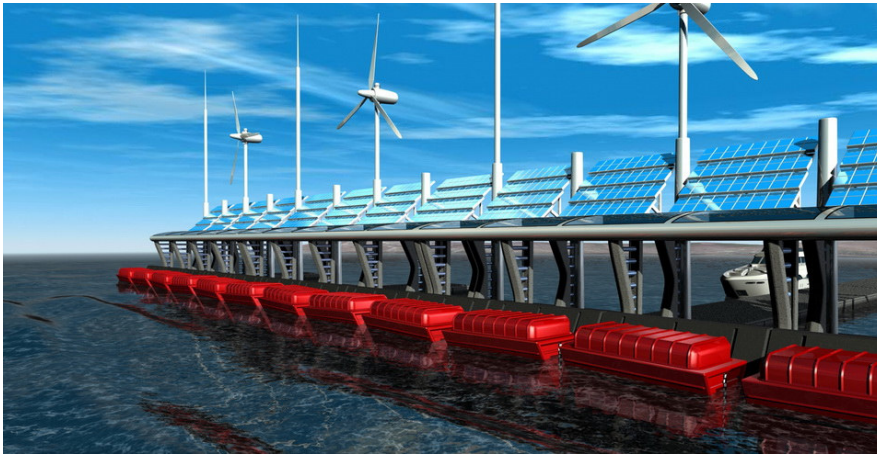
Введение

Морское волнение несет в себе огромные запасы энергии, которые поддерживаются за счет энергии солнца и поэтому в техническом смысле они являются неисчерпаемыми. Практическое использование этой энергии позволит снизить потребление других энергоресурсов (нефть, газ, уголь), а также уменьшить вредное влияние от их использования на окружающую среду.

Существует много принципиальных способов превращения энергии волнения в полезную работу [1]. Однако не все они равнозначны с точки зрения эффективности, а некоторые способы практически невозможно реализовать по технологическим причинам.

В течение ряда лет в Крыловском научном центре проводились испытания модели волнового энергетического демпфера (ВЭД), разработанного компанией «НПО Гидроэнергоспецстрой» под руководством В.Э. Егурнова (см. р ис. 1).

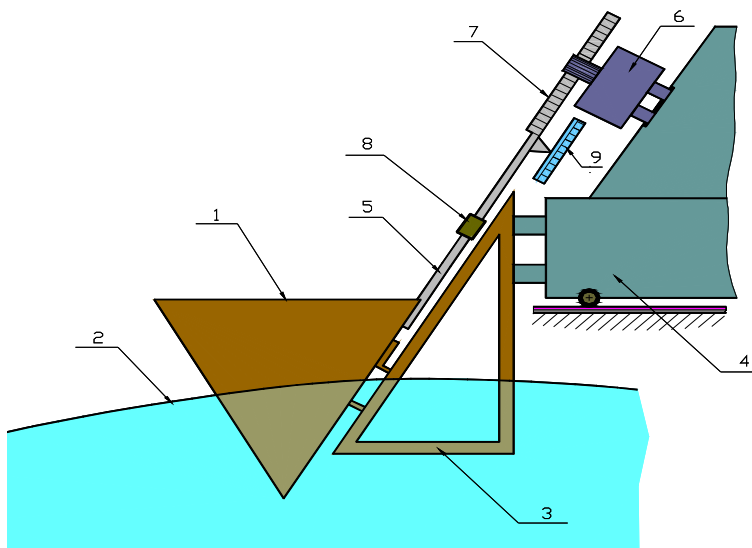
В этой конструкции преобразование энергии морского волнения в полезную работу выполняется с помощью плавучих элементов (понтонов), которые шарнирно крепятся к жесткому основанию и соединены с электрогенераторами. При качке на волнении понтоны приводят в движение роторы электрогенераторов, тем самым происходит преобразование энергии волнения в электрическую энергию.



Система волновых демпферов, объединенных в

защитный пояс, одновременно служит для защиты побережья и береговых инженерных сооружений от разрушающего воздействия морских волн. Защитные свойства такого комплекса обеспечиваются как за счет преобразования энергии морского волнения в полезную работу, так и за счет рассеивания энергии волнения элементами конструкций.

В настоящей работе рассмотрены методические и практические подходы к оценке эффективности преобразования энергии морских волн в полезную работу конструкцией волнового энергетического демпфера



2. Объект исследования и результаты испытаний.

Принципиальная схема модели ВЭД показана на рисунке 2.

Модель состоит из плавающего на поверхности воды понтона (1), который с помощью шарниров закреплен на наклонной аппарели (3) и может свободно перемещаться вдоль нее. Аппарель соединена с фермой (4), которая лежит поперек бассейна и опирается на его рельсы. При взаимодействии с волной (2) понтон перемещается вдоль наклонной аппарели. Его линейные перемещения с помощью штанги (5) и установленной на ней зубчатой рейки (7) преобразуются во вращение ротора электрического генератора (6). Когда генератор находится под электрической нагрузкой, он оказывает механическое сопротивление перемещению понтона. Величина механического сопротивления зависит от

величины электрической нагрузки. Для оценки величины механического сопротивления на штанге установлен тензометрический датчик силы (8). Величина перемещений понтона измеряется датчиком перемещений (9).

При испытаниях модели ВЭД в опытовом бассейне регулярное волнение создается волнопродуктором, установленным в торцевой части бассейна. Ординаты волн измеряются с помощью бесконтактного ультразвукового датчика, установленного по оси бассейна перед моделью. В процессе испытаний проводится непрерывная запись силы на штанге 5 и линейных перемещений понтона вдоль наклонной аппарели.

В процессе испытаний модели ВЭД в бассейне на регулярном волнении были определены:

- амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) понтона ВЭ при различных режимах нагрузки генератора;
- зависимости усилий на штанге (тормозные усилия) от режима нагрузки электрического генератора;
- параметры волнения за моделью ВЭД.

Была выполнена также оценка эффективности преобразования энергии волнения в полезную работу;

Испытания модели ВЭД проводились для режима холостого хода генератора и трех нагрузочных режимов - режим с максимальной нагрузкой (принятый за 100%), с нагрузкой 50% и 30% от максимальной.

Записи всех процессов разлагались в ряд Фурье и в качестве характерных величин выбирались размахи (удвоенные амплитуды) гармоник с максимальной амплитудой. Частота этих гармоник совпадала с частотой исходной волны f , которая определялась по формуле $f = 1/\tau$ Гц, где $\tau = \left(\frac{2\pi\lambda}{g}\right)^{1/2} \cong 0,8\sqrt{\lambda}$ - период волны, с.

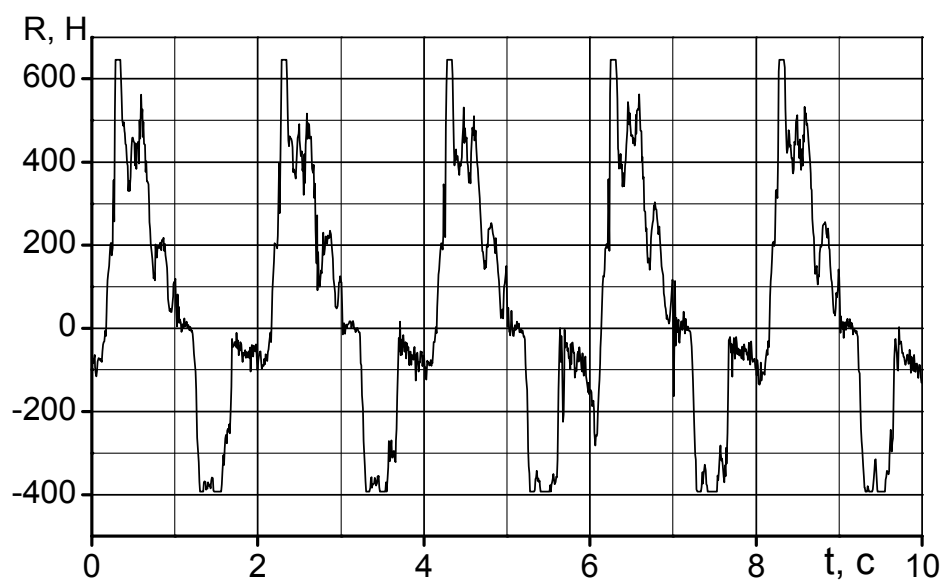
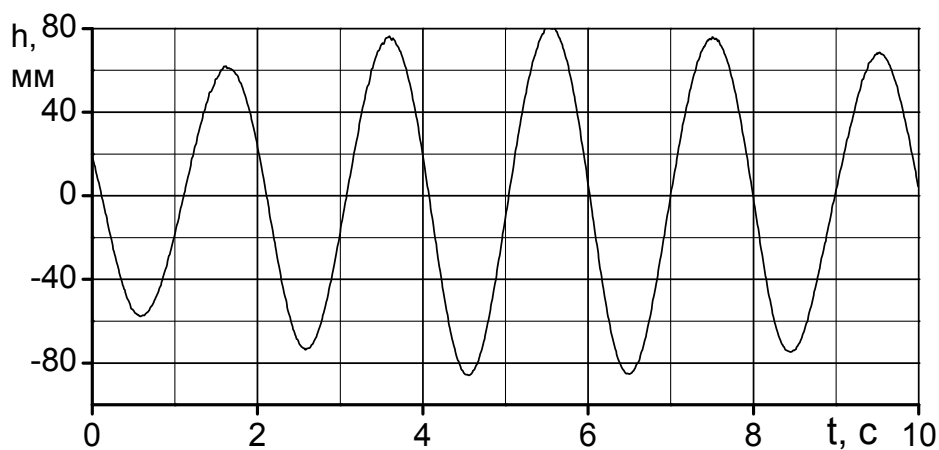
На основании результатов измерений были построены зависимости безразмерных характеристик записанных процессов от безразмерной частоты волны f/f_p (f_p -частота собственных колебаний понтона при вертикальной качке). При этом размахи линейных перемещений понтона H (удвоенные амплитуды колебаний) относились к высоте исходной волны h . Размахи силы на штанге (тормозных усилий) R и её средние значения R_a

относились к величине $\gamma \cdot S \cdot h$ (S - площадь ватерлинии модели понтона, γ – удельный вес воды).

Для оценки воспроизводимости опытов в процессе испытаний проводилось 3-х кратное повторение каждого режима.

Основные результаты испытаний изложены в работах [2,3].

Здесь, для примера приведены записи ординат волновой поверхности (рисунок 3, наверху), зависимости тормозных усилий и перемещения понтона от времени (рисунок 3, средний и нижний соответственно).



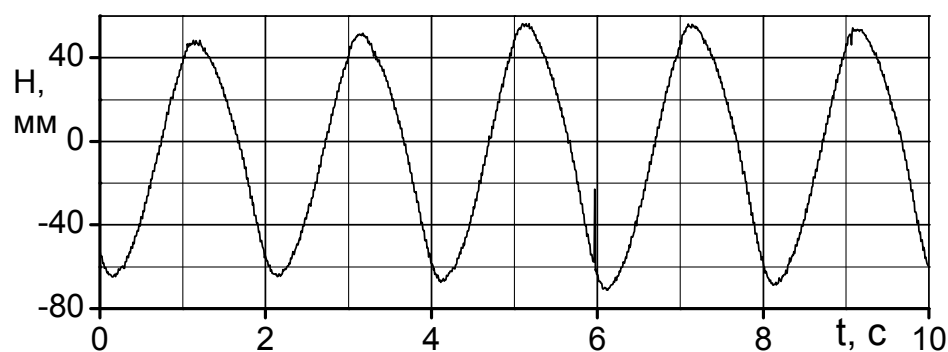
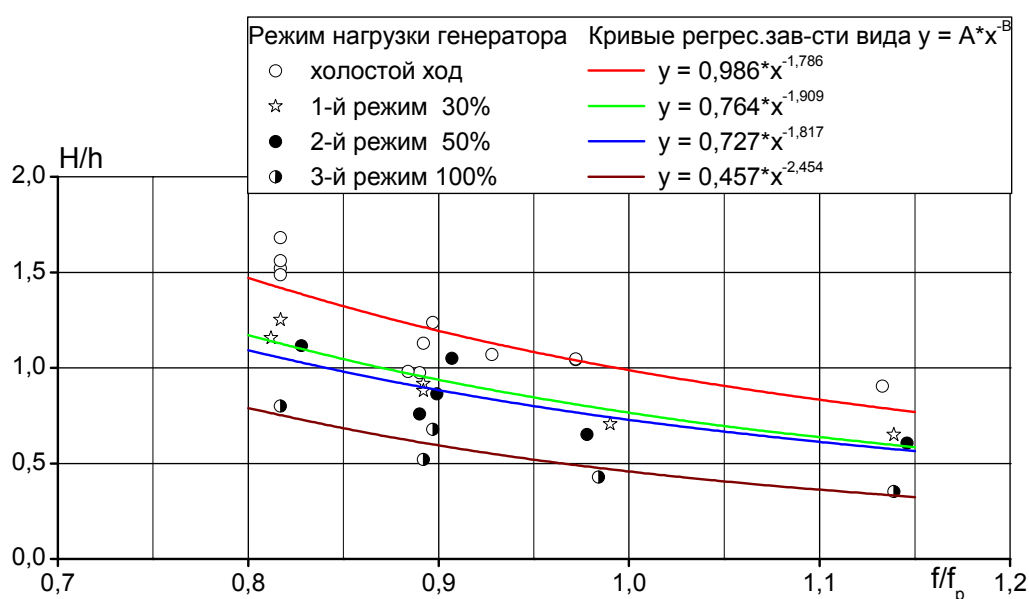


Рисунок 3 – запись волнения (наверху), зависимости силы на штанге (средний рисунок) и перемещений понтона (нижний рисунок) от времени.



На рис. 4 приведены зависимости безразмерных размахов перемещений понтона $\bar{H} = \frac{H}{h}$ от безразмерной частоты волны $\left(\frac{f}{f_p}\right)$, на рисунке 5 - зависимости безразмерных размахов силы на штанге $\bar{R} = \frac{R}{\gamma \cdot S \cdot h}$ от безразмерной частоты волны $\left(\frac{f}{f_p}\right)$.

Полученные результаты использованы для оценки эффективности преобразования энергии волнения в полезную работу.

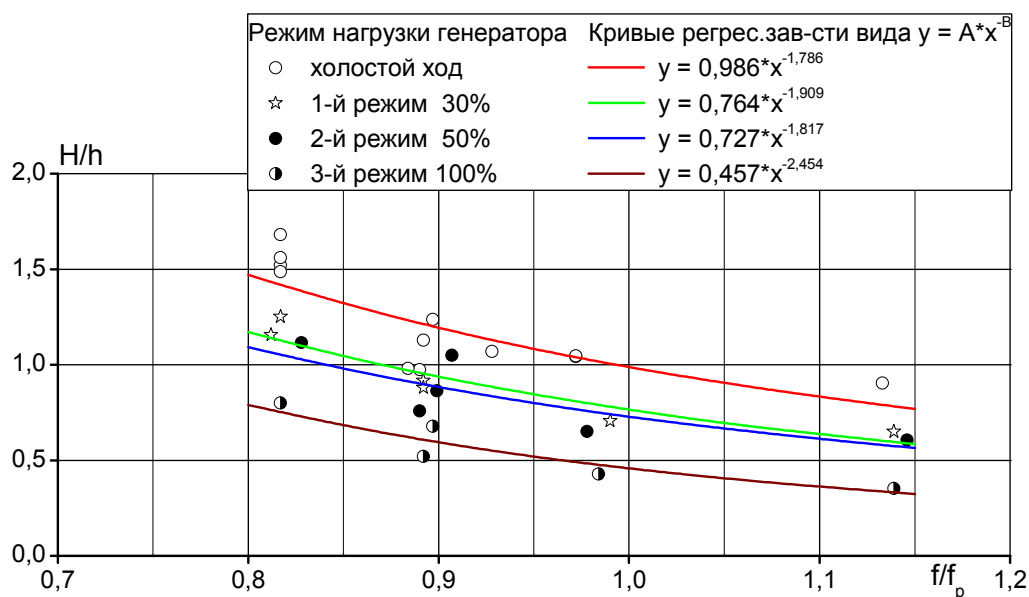


Рисунок 4 - Зависимости относительных перемещений понтона ВЭД от относительной частоты волн при различных режимах работы электрического генератора

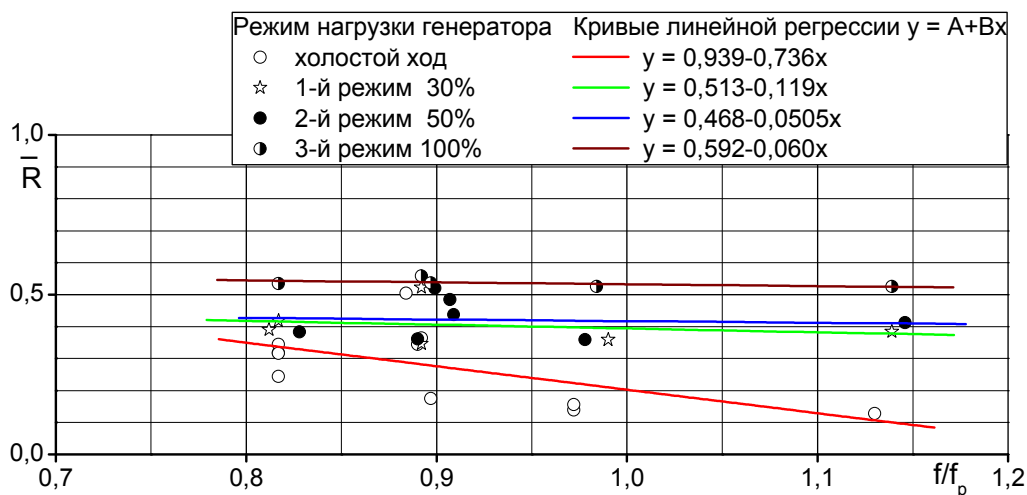


Рисунок 5 - Зависимости относительных размахов силы на штанге модели ВЭД от относительной частоты волн при различных режимах работы электрического генератора

3. Оценка эффективности преобразования энергии волнения в полезную работу

Полная механическая энергия прогрессивной плоской волны, приходящаяся на ширину волнового фронта b равна [4]

$$E = \frac{\rho g a^2}{2} \times \lambda \times b, \quad (1)$$

где ρ - плотность жидкости, кг/м³; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; $a = h/2$ – амплитуда волны, м; λ – длина волны, м.

Работа, производимая волной в единицу времени (т.е. мощность волны), равна

$$N_w = \frac{\rho g a^2}{4} \times c \times b \quad (2)$$

где $c = \frac{\lambda}{\tau}$ - фазовая скорость волны, м/с. Эта формула справедлива для глубокой воды.

Учитывая, что $a^2 = h^2/4$, для мощности волны с шириной волнового фронта b на глубокой воде получаем:

$$N_w = \frac{\rho g h^2}{16} \times c \times b = \frac{\rho g h^2 \cdot \lambda \cdot b}{16 \cdot \tau}. \quad (3)$$

Если средняя глубина акватории меньше половины длины волны, необходимо учитывать влияние ограниченной глубины на скорость распространения волн.

При работе ВЭД электрический генератор оказывает механическое сопротивление перемещению штанги, что приводит к появлению в ней тормозных усилий R . По величине этих усилий, которые измеряются тензодинамометром 8 (см. рисунок 2), и величине линейных перемещений (измеряются датчиком перемещений 9) может быть вычислена механическая работа, совершаемая за счет энергии волнения.

Работа, совершаемая за время t при колебаниях понтона, равна

$$A = \int_0^l R \cdot dx = \int_0^t R \cdot v \cdot dt, \quad (4)$$

где dx – элементарное перемещение; l – путь, пройденный понтоном за время t ; v – линейная скорость перемещения понтона.

Средняя мощность на штанге за время t равна

$$N_t = \frac{1}{t} \cdot \int_0^l R \cdot dx = \frac{1}{t} \cdot \int_0^t R \cdot v \cdot dt \quad (5)$$

Отношение средней мощности сил сопротивления N_t к средней за период мощности волны N_w :

$$\eta = \frac{N_t}{N_w} \quad (6)$$

характеризует эффективность преобразования энергии волны в механическую работу и условно может быть названа коэффициентом полезного действия (к.п.д.) преобразования.

При оценке механической работы и средней мощности на штанге интеграл (4) вычисляется численным способом по записям процессов $R(t)$ и $x(t)$. В процессе испытаний запись процессов $R(t)$ и $x(t)$ проводилась с частотой 125 раз в секунду, т.е. с интервалом 0,008 сек.

Средняя мощность волны рассчитывалась по формуле (3), а эффективность преобразования энергии волн в механическую работу (к.п.д.) - по формуле (6).

Результаты испытаний показали, что процесс записи тормозных усилий кроме основной гармоники (с частотой волны) имеет гармоники с большими частотами и амплитудами, сравнимыми с амплитудой основной гармоники (см. рисунок 3). Это обстоятельство, которое связано с технологическими особенностями испытаний, может приводить к погрешностям при прямом вычислении механической мощности и к.п.д. Поэтому дополнительно были выполнены вычисления эффективности преобразования энергии волнения в механическую работу на основе теоретических соотношений с использованием результатов испытаний.

На регулярном волнении процесс изменения тормозных усилий может быть представлен в виде гармонической зависимости

$$r = r_0 \cdot \sin \omega t \quad (7)$$

где $r_0 = \frac{1}{2} \bar{R} \cdot \rho \cdot g \cdot S \cdot h_e$ - амплитуда основной гармоники тормозных усилий, выраженная через безразмерные размахи (удвоенные амплитуды); $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ - круговая частота, τ - период волны.

При работе электрического генератора максимальная сила сопротивления возникает при максимальной скорости перемещения штанги. Поэтому перемещение понтона можно представить в виде

$$x = x_0 \cdot \cos \omega t = x_0 \cos \frac{2\pi}{\tau} t, \quad (8)$$

где $x_0 = \frac{1}{2} \bar{H} \cdot h$ - амплитуда перемещения штанги, выраженная через безразмерные размахи.

Скорость перемещения понтона равна

$$v = \frac{dx}{dt} = -x_0 \cdot \omega \cdot \sin \omega t. \quad (9)$$

Механическая работа за время t , совершаемая при колебании понтона равна

$$A_t = \int_0^t r \cdot v \cdot dt = r_0 \cdot x_0 \cdot \omega \int_0^t (\sin^2 \omega t) \cdot dt = r_0 \cdot x_0 \cdot \omega \left(\frac{t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4 \cdot \omega} \right). \quad (10)$$

Средняя мощность силы сопротивления перемещению понтона за время t равна (см. формулу (5))

$$N_t = \frac{1}{2} \cdot r_0 \cdot x_0 \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{\sin 2\omega t}{2 \cdot \omega \cdot t} \right) \quad (11)$$

Множитель перед скобками выражения (11) представляет собой среднюю за период механическую мощность на штанге. Если время записи процесса кратно половине периода, то второй член в скобках равен нулю.

Выражение

$$\Delta = \pm \frac{\sin 2\omega t}{2 \cdot \omega \cdot t}$$

можно рассматривать как ошибку осреднения величины механической мощности на штанге в тех случаях, когда время записи процесса не кратно периоду волны.

Поскольку $\sin 2\omega t$ по величине не превосходит 1, то максимальная погрешность осреднения равна

$$\Delta_{\max} = \pm \frac{1}{2 \cdot \omega \cdot t}.$$

Например, при длине волны $\lambda_b = 4$ м ($\tau = 1,6$ с) и времени записи 10 с, максимальная погрешность осреднения составит $\Delta_{\max} = 0,0127$. В практических расчетах этой величиной можно пренебречь. Таким образом, среднюю мощность на штанге можно вычислять по формуле:

$$N_t = \frac{1}{2} \cdot r_0 \cdot x_0 \cdot \omega \quad (12)$$

Формулу (12) можно преобразовать, если выразить значения r_0 , x_0 и ω через безразмерные размахи силы на штанге и перемещения понтона. Тогда получим следующее выражение для механической мощности понтона

$$N_t = \frac{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot h_w^2 \cdot S \cdot \bar{R} \cdot \bar{H}}{4 \cdot \tau} \quad (13)$$

При использовании этой формулы осредненные значения безразмерных величин \bar{R} и \bar{H} необходимо определять опытным путем. Если разделить выражение (13) на мощность волны, то получим формулу для расчета механического к.п.д. системы

$$\eta = \frac{4\pi \cdot \bar{R} \cdot \bar{H} \cdot S}{\lambda \cdot b} \quad (14)$$

здесь b – ширина понтона.

Для прямоугольного в плане понтона $S = b \cdot l$ (l – длина понтона по ватерлинии) формулу (14) можно представить в виде.

$$\eta = 4\pi \cdot \bar{R} \cdot \bar{H} \cdot \frac{l}{\lambda} \quad (15)$$

Значения к.п.д., рассчитанные по формуле (14), на различных режимах работы электрического генератора показаны на рисунке 6.

Сопоставление к.п.д., вычисленного по формуле (14), и к.п.д., определенного путем прямого численного интегрирования выражения (5) показало их хорошее совпадение.

В процессе проведения испытаний модели ВЭД на всех режимах нагрузки выполнялись измерения параметров электрической сети. По этим значениям Е.В.Васичев рассчитал электрическую мощность, развиваемую электрогенератором. Отношение электрической мощности генератора к мощности волны дает значения электрического к.п.д. η_e . На рисунке 7 для примера показана зависимость механического и электрического к.п.д. от нагрузки генератора при двух значениях длин волн.

Сопоставление электрического и механического к.п.д. на разных режимах работы модели ВЭД показывает, что значения электрического к.п.д. значительно меньше механического к.п.д. практически во всем диапазоне нагрузок. Только при максимальной электрической нагрузке значения механического и электрического к.п.д. близки друг к другу.

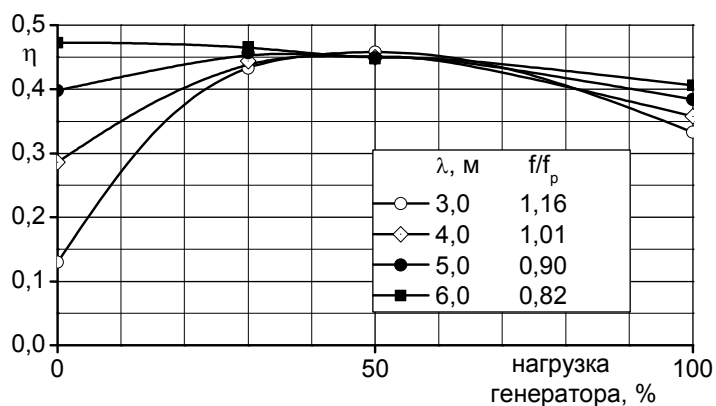


Рисунок 6 - Зависимость механического к.п.д. ВЭД от нагрузки электрического генератора

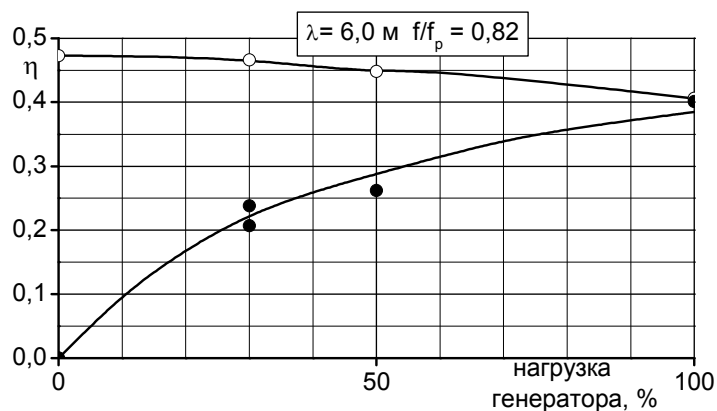
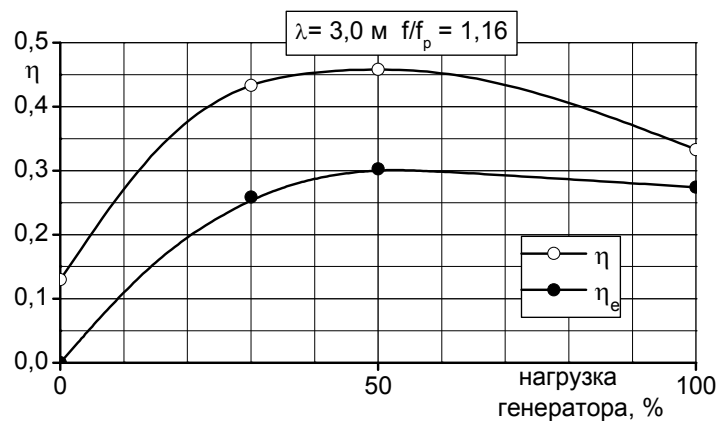


Рисунок 7 - Сопоставление механического и электрического к.п.д. ВЭД

Величина тормозных усилий пропорциональна нагрузке электрогенератора. Поэтому рисунки 6 и 7 можно рассматривать как аналог зависимостей к.п.д. от величины тормозных усилий. Поэтому расчетно-экспериментальная зависимость эффективности преобразования энергии морского волнения в механическую работу (рисунки 6 и 7) может быть дополнена двумя теоретическими точками.

Первая соответствует случаю отсутствия тормозных усилий на штоке (т.е. отсутствие механического сопротивления перемещению понтона). В этом случае механическая работа и к.п.д. η равны нулю.

Вторая точка соответствует случаю, когда сила механического сопротивления перемещению понтона превышает гидродинамические силы, действующие на понтон со

стороны волны, и понтон остается неподвижным. В этом случае механическая работа и к.п.д. η также равны нулю.

Таким образом, общая зависимость эффективности преобразования энергии морского волнения в механическую работу будет иметь параболический вид с двумя нулевыми точками и экстремумом (максимумом) величина и положение которого зависит от конструктивных особенностей установки. В данном случае величина механического к.п.д. ($\eta=0,45$) и положение экстремума практически не зависят от характеристик волнения.

Напротив, величина электрического к.п.д. η_e зависит как от характеристик электрогенератора, так и от соответствия этих характеристик условиям волнения. Результаты испытаний показали, что только на волнении с длиной волны $\lambda=6$ м значение электрического к.п.д. η_e близко к значению механического к.п.д. При всех других длинах волн, которые задавались в процессе испытаний, значение электрического к.п.д. значительно меньше механического к.п.д.

Это обстоятельство показывает, что исследование зависимости эффективности преобразования энергии морского волнения в полезную работу, в т.ч. электроэнергию, и выбор характеристик электрогенераторов должны проводиться для каждой конструкции волновых энергетических преобразователей в соответствии с условиями волнения в месте их установки.

Заключение

Методика испытаний модели волнового энергетического демпфера (ВЭД), разработанная в Крыловском научном центре, позволяет выполнять отработку отдельных элементов и всей конструкции волновых преобразователей энергии морского волнения. Полученные в процессе таких испытаний результаты позволяют оценить, как эффективность преобразования энергии морского волнения в полезную работу, так и правильность выбора характеристик электрогенераторов в соответствующих морских условиях.

Максимальное значение эффективности преобразования энергии морского волнения в полезную работу для данной конструкции волнового демпфера составляет около $\eta \approx 0,45$. Эта величина, по-видимому может быть увеличена за счет оптимизации отдельных элементов конструкции.

Литература

1. В.И.Виссарионов, В.В.Волшаник, Л.А.Золотов, С.В.Кривенко, Н.К.Малинин, Б.Е.Монахов - Использование волновой энергии. Издательство МЭИ, Москва, 2002
2. V. Anosov, V. Yegurnov, T. Diakova, A. Kuznetsov, A. Rashev – Research on Behavior of Wave Energy Converter Main Elements and Evaluation of Efficiency of Wave Energy into Useful Power. 10th International Conference on Hydrodynamics, October 1-4, 2012, St.-Petersburg, Russia
3. В.Н.Аносов, А.И.Рашев – Исследования и разработки преобразователя морского волнения “Wave Hunter” – Первый Международный Форум по возобновляемой энергетике REENFOR-2013. 22-23 октября, 2013, РАН, Москва
4. В.В.Луговский – Динамика моря. Издательство «Судостроение», Ленинград, 1976