

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ МОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВОЛНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

В.Н.Аносов

**Крыловский государственный научный центр,
44, Московское шоссе, 196158 Санкт-Петербург, Россия.**

В.Э.Егурнов

**НПО Гидроэнергоспецстрой,
11, ул. Некрасова, 191014 Санкт-Петербург, Россия**

АННОТАЦИЯ

В докладе рассмотрены основные результаты разработки многофункционального морского защитного комплекса (ММЗК) в котором объединены функции защиты морского побережья от воздействия морских волн и преобразования энергии волн в электроэнергию. Концепция ММЗК разработана компанией «НПО Гидроэнергоспецстрой» при содействии Крыловского государственного научного центра и ряда других российских предприятий.

Основу ММЗК составляет защитный пояс, состоящий из набора волновых демпферов, которые преобразуют энергию морского волнения в электроэнергию. Защитные функции ММЗК достигаются как за счет превращения энергии волн в электроэнергию, так и за счет диссипации остаточной энергии волн.

Рассмотрены основные конструктивно-архитектурные особенности ММЗК и работающего макета преобразователя энергии волнения (ПЭВ), изготовленного в масштабе 1:2,5

Оценка защитных качеств ММЗК, эффективность преобразования энергии морского волнения в электроэнергию и характеристики отдельных элементов ПЭВ (рабочих органов, трансмиссии, электрогенераторов) выполняется на основе результатов испытаний моделей в опытовом бассейне и на специальном стенде, который имитирует воздействие морских волн на конструкцию.

ВВЕДЕНИЕ

Морские волны обладают значительной энергией. Они способны разрушать морские берега и инженерные сооружения, построенные вдоль побережий. Наносит другой ущерб хозяйственной деятельности людей. По этой причине в районах обитания людей в прибрежных водах строят различные защитные сооружения – дамбы, волноломы, плотины и т.п. Их возведение требует значительных усилий и материальных затрат. При этом роль таких защитных сооружений состоит в превращении энергии волн в пассивные виды энергии, которые распределяются во внешней среде без каких-либо вредных последствий для человека.

Энергия морского волнения постоянно пополняется за счет энергии солнца, поэтому в техническом отношении она является неисчерпаемым источником. По этой причине в течение последних десятилетий активно проводятся работы по созданию конструкций, которые бы могли превращать энергию волнения в полезную работу, в частности в электроэнергию. На этот счет имеется большое количество идей и предложений [1], но действующих конструкций преобразователей энергии волнения (ПЭВ) в настоящее время существует немного. В качестве примеров можно

назвать модели ПЭВ Wave Star [2], WavePlane [3], DexamWave [4] и ряд других конструкций, которые проходят испытания.

Создание ПЭВ, также как и постройка защитных сооружений, требует значительных усилий и материальных затрат. Однако возможно объединение этих задач, т.е. обеспечивать защиту морских берегов и прибрежных инженерных сооружений за счет активного использования энергии морских волн для хозяйственной и экономической деятельности.

Такой подход использован в концепции **многофункционального морского защитного комплекса**, которую разрабатывает группа российских компаний – «НПО Гидроэнергоспецстрой», Крыловский государственный научный центр, НПО «Эрга» и др.

Многофункциональный морской защитный комплекс (ММЗК) представляет собой совокупность инженерных сооружений, расположенных в прибрежной акватории. Со стороны моря он отгорожен защитным поясом, который выполняет функции преобразования энергии морского волнения в полезную работу (см. рисунок 1), в частности в электроэнергию. Внутри акватории могут находиться стоянки для катеров и судов, искусственные острова для

размещения культурно-оздоровительных,
туристических или промышленных объектов.



Рис. 1. Общий вид многофункционального
морского защитного комплекса

Преобразование энергии морского волнения в электроэнергию выполняется с помощью ПЭВ, который представляет собой один или несколько рядов плавучих элементов (понтон) шарнирно закрепленных на жестком основании и соединенных с электрогенераторами. При качке на волнении понтоны приводят в движение роторы электрогенераторов.

Защитный пояс может быть использован также для размещения преобразователей энергии ветра и солнца в электроэнергию (рисунок 2).

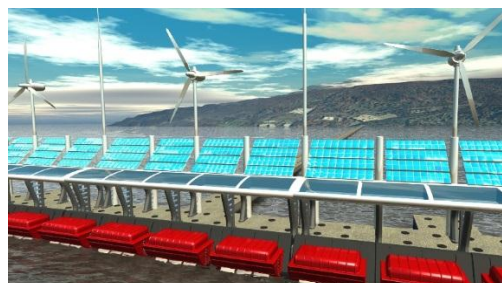


Рис. 2. Размещение ветрогенераторов и
солнечных батарей на защитном поясе ММЗК

Вся энергия, получаемая за счет энергии морского волнения, ветра и солнца может быть использована для обеспечения деятельности объектов, расположенных внутри ММЗК в дополнение к традиционным источникам энергии или передаваться на берег.

Защитные свойства ММЗК обеспечиваются как за счет преобразования энергии морского волнения в электроэнергию элементами волновой электростанции, так и за счет рассеивания энергии волнения элементами конструкций.

1. КОНСТРУКЦИЯ И АРХИТЕКТУРА

Основным элементом защитного пояса ММЗК является волновой демпфер (рис. 3).



Рис. 3. Волновой демпфер – основной элемент
защитного пояса ММЗК

Он состоит из плавающего на поверхности воды понтона, трансмиссии и электрических генераторов. На волнении понтон совершает линейные и угловые колебания, которые через трансмиссию приводят в движение роторы электрогенераторов. Четыре волновых демпфера, установленные в ряд на едином основании образуют энергетический блок ПЭВ, который устанавливается на воде в прибрежной зоне на вертикальных опорах (рисунок 4) или сотовых бонах (рисунки 2 и 5).



Рис. 4. Установка волновых демпферов
энергетического блока ПЭВ
на вертикальных опорах

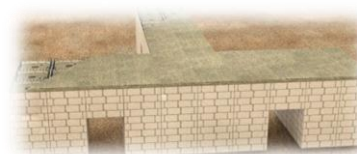


Рис. 5. Сотовый бон для установки
энергетического блока ПЭВ

Весь защитный пояс состоит из набора энергетических блоков, установленных вдоль побережья в один или несколько рядов (рисунки 1, 6). Длина защитного пояса зависит от длины берегового участка, который необходимо защитить, и может составлять от нескольких сот метров до нескольких километров. Необходимо

отметить, что годовой объем вырабатываемой за счет волнения электроэнергии пропорционален длине защитного пояса. На рисунке 6 показан фрагмент защитного пояса, состоящего из 3 рядов волновых демпферов.

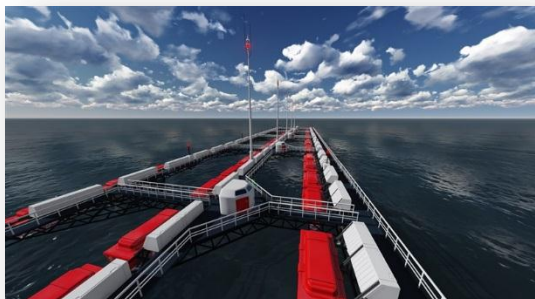


Рис. 6. Фрагмент защитного пояса, состоящего из 3 рядов волновых демпферов

Оба способа установки энергетических блоков обеспечивают свободное и естественное перемещение воды и биомассы из области открытого моря в защищенную акваторию и назад в море, тем самым сводится к минимуму вредное экологическое воздействие на окружающую среду.

Для монтажа энергоблоков защитного пояса разработана специальная технология. Все элементы конструкции и материалы доставляются к месту сборки в стандартных контейнерах. Сборка энергоблоков на опорных колоннах выполняется на берегу на специальных сборных понтонах. Затем вся конструкция автокраном спускается на воду и буксируется к месту установки. При этом исключается необходимость применения специальной морской техники и проведения подводно-технических работ.

Внутри защищенной акватории, между защитным поясом и берегом, образуется рекреационная зона, которая может быть использована для размещения стоянок для катеров и судов, аквакемпингов, развлекательных или промышленных объектов. Архитектурно-строительное содержание рекреационной зоны может быть различным и зависит от общей концепции развития данного района побережья с прилегающими жилыми, промышленными и культурно-оздоровительными объектами.

На рисунках 1 и 7 для примера показаны возможные варианты архитектурно-строительных решений по обустройству акватории в районе г. Евпатория на Черном море.



Рис. 7. Один из возможных вариантов рекреационной зоны в районе г. Евпатория на Черном море

2. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

2.1. Опытно-конструкторские работы и научные исследования ПЭВ ведутся «НПО Гидроэнергоспецстрой» совместно с Крыловским научным центром с 2008 г. За это время испытано несколько типов ПЭВ:

- пневматическая система с воздушной турбиной;
- рабочий орган с гидродинамическим демпфером;
- прямая механическая передача на электрогенератор, в том числе линейный электрогенератор;
- гидравлическая система;
- двухконтурная система со специальным приводом электрогенераторов.

В процессе модельных испытаний двухконтурный вариант ПЭВ показал наилучшие результаты и на его основе создан работающий макет волновой электростанции в масштабе 1:2,5 (рисунки 8 и 9).

Макет состоит из волнового демпфера, системы управления и металлической фермы, которая установлена поперек бассейна и служит основанием для размещения и крепления всего оборудования.

В состав волнового демпфера входит плавающий понтон, который перемещается по наклонной аппарели, две механических трансмиссии и два электрогенератора, работающие независимо друг от друга. На волнении понтон может совершать линейные колебания вдоль аппарели и угловые колебания вдоль продольной оси, т. е. имеет две степени свободы. Благодаря этому и наличию двух независимых контуров оба вида движения с помощью трансмиссии передаются на электрогенераторы, обеспечивая высокую эффективность работы, как на фронтальном волнении, так и на косом волнении (в отличие от конструкций, где имеется только одна степень свободы). При этом на косом волнении исключаются дополнительные нагрузки на

конструкцию, которые бы действовали при отсутствии свободы по крену.



Рис. 8. Макет волновой электростанции в масштабе 1:2,5



Рис. 9. Пульт управления макета волновой электростанции

Система управления макета содержит набор измерительного оборудования, компьютер для записи измеряемых процессов и обработки информации и блок управления системами и параметрами волнового демпфера (масса понтона и нагрузка электрической цепи).

В процессе испытаний измеряются параметры волнения, и определяется его мощность, перемещение понтона и механические усилия в различных узлах конструкции, параметры электрической сети.

Изменяемые параметры позволяют оценить работу ПЭВ на различных эксплуатационных режимах, определить эффективность преобразования энергии волнения в электроэнергию и определить коэффициент полезного действия отдельных элементов макета (рабочего органа, трансмиссии, электрогенераторов).

Вся текущая информация о работе макета выводится на монитор компьютера и специальный демонстрационный дисплей, установленный на фронтальной части поперечной фермы.

В процессе выполнения исследований была разработана технология определения основных характеристик ПЭВ.

Она включает:

- определение энергетического потенциала морского волнения и годовой выработки электроэнергии в месте установки ПЭВ;
- определение эффективности преобразования энергии волнения в электроэнергию в целом (к.п.д. всего комплекса ПЭВ) и определение к.п.д. отдельных элементов ПЭВ (рабочего органа, трансмиссии, электрогенераторов);
- определение наиболее рационального диапазона мощности энергетического оборудования в месте установки ПЭВ;
- определение защитных качеств ММЗК.

Указанные характеристики определяются расчетно-экспериментальным способом на основе результатов испытаний моделей ПЭВ в опытовом бассейне и его отдельных элементов на специальном стенде.

2.2. Мощность регулярного волнения, приходящаяся на единицу ширины волнового фронта (удельная мощность), на глубокой воде равна [5]

$$P_w = \frac{\rho g^2}{32\pi} h^2 \tau \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения, h – высота волны, τ – период волны. Эта формула используется для определения удельной мощности волнения при испытаниях моделей ПЭВ в бассейне на регулярном волнении.

Удельная мощность нерегулярного волнения выражается через частотный спектр $S(f)$ и групповую скорость волн $C_g(f)$

$$P = \rho g \int_0^\infty C_g(f) \cdot S(f) \cdot df \approx \frac{\rho g^2}{64\pi} \cdot h_s^2 \cdot T_e \quad (2)$$

где h_s – значительная высота волн, $T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$ – период энергии волнения, который выражается через моменты спектра $m_{-1} = \int_0^\infty \frac{S(f)}{f} \cdot df$ и $m_0 = \int_0^\infty S(f) \cdot df$. Если глубина воды ограничена (меньше половины длины волны), то формулы (1) и (2) будут содержать поправки, учитывающие влияние глубины на групповую скорость и дисперсионное соотношение [5,6].

В отечественной практике в качестве характеристики интенсивности волнения принято использовать высоту волн 3% обеспеченности $h_{3\%}$. Между высотой волн 3% обеспеченности $h_{3\%}$ и значительной высотой волн h_s существует соотношение $h_{3\%} = 1,33 h_s$ [7]. Оно использовалось при вычислении удельной мощности реального волнения по формуле (2).

2.3. Энергетический потенциал морского волнения той или иной акватории определяется на основе данных об интенсивности и повторяемости волнения. Российский Морской Регистр Судоходства [8] содержит данные о повторяемости высот волн 3% обеспеченности $h_{3\%}$ по месяцам и по году в целом. В качестве примера в таблице 1 представлены данные о повторяемости волнения по Средиземному морю в районе острова Мальта [8].

Таблица 1. Повторяемость (%) высот волн 3% обеспеченности ($h_{3\%,M}$) по направлениям θ . Повторяемость высот волн $f(h)$ и повторяемость направлений волн $f(\theta)$. Весь год.

$h_{3\%,M}$	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	$f(h)$
0-1	6,0	6,7	1,7	0,9	0,5	0,2	0,4	2,4	18,7
1-2	15,4	12,6	3,8	2,1	1,1	0,5	1,2	6,6	41,2
2-3	7,6	6,2	2,4	1,3	0,9	0,4	1,4	6,9	27,5
3-4	1,7	1,0	0,7	0,6	0,3	0,12	0,9	3,5	8,8
4-5	0,3	0,09	0,14	0,10	0,05	0,02	0,4	1,3	2,4
5-6	0,09	0,01	0,03	+	+	-	0,13	0,5	0,8
6-7	0,03	+	+	-	-	-	0,05	0,2	0,3
7-8	0,02	-	-	-	-	-	0,02	0,09	0,13
8-9	0,01	-	-	-	-	-	+	0,04	0,06
9	-	-	-	-	-	-	+	0,01	0,02
$f(\theta)$	29,3	26,5	8,8	5,5	2,8	1,2	4,4	21,5	100

Можно видеть, что высоты волн $h_{3\%}$ разбиты на диапазоны шириной $\Delta h_{3\%} = 1$ м для каждого из 8 направлений (С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ).

Годовой энергетический потенциал морского волнения (кВт час/м) в заданной акватории определяется как сумма элементарных энергетических потенциалов для каждого диапазона высот волн и направлений, т.е.

$$E = 8760 \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^n P_j \cdot \varphi_{ij} \quad (3)$$

где P_j – удельная мощность морского волнения j -того диапазона высот волн, φ_{ij} – повторяемость волнения j -того диапазона высот волн в i -том диапазоне направлений.

На рисунке 10 для примера показано распределение годового энергетического потенциала морского волнения для каждого из 8 направлений и общий годовой энергетический потенциал для Средиземного моря в районе острова Мальта.

Однако ПЭВ, работающий в составе ММЗК, находится в прибрежной зоне, защищая определенный участок берега. Поэтому не все направления распространения волн в открытом море могут быть использованы для получения энергии. На рисунке 11 показаны направления распространения волн и их годовой энергетический потенциал для предполагаемого места установки ММЗК на острове Мальта в Средиземном море. Аналогично может быть рассчитан энергетического потенциала морского волнения для каждого месяца.

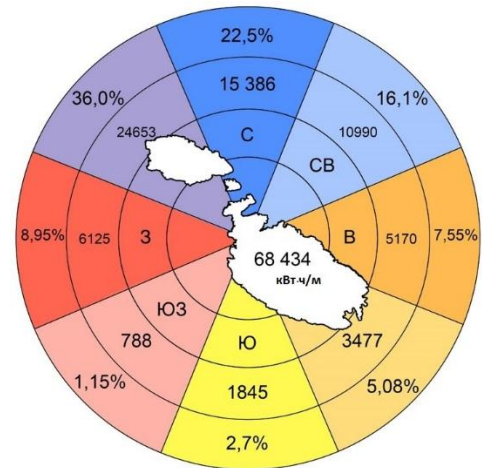


Рис. 10. Годовой энергетический потенциал морского волнения (кВт час/м) для каждого из 8 направлений волнения и общий годовой энергетический потенциал Средиземного моря в районе острова Мальта

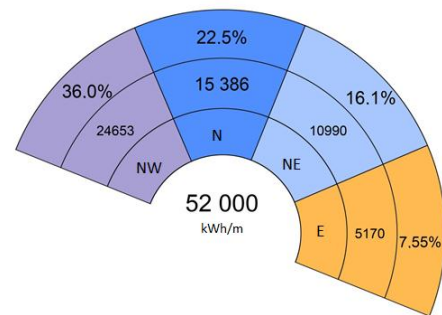


Рис. 11. Годовой энергетический потенциал морского волнения (кВт час/м) в районе предполагаемого сооружения ММЗК для острова Мальта

2.4. Годовая выработка электроэнергии ПЭВ зависит как от энергетического потенциала морского волнения, так и от эффективности работы (к.п.д.) волновых демпферов, которую можно представить в виде

$$\eta = \frac{W}{P \cdot B} \quad (4)$$

где W – полезная электрическая мощность, определяемая через напряжение и ток в электрической сети (кВт); P – удельная мощность волнения (кВт/м); B – суммарная ширина волновых демпферов защитного пояса.

Эта характеристика определяется в процессе модельных испытаний конструкции ПЭВ в опытовом бассейне.

Система измерительного оборудования макета ПЭВ позволяет также определять к.п.д. преобразования энергии волнения в механическую работу рабочим органом

(понтон) η_m , к.п.д. механической трансмиссии η_t и к.п.д. электрического генератора η_e на различных режимах работы макета.

Для определения к.п.д. преобразования энергии волнения в механическую работу рабочим органом ПЭВ проводится измерение перемещений понтона и механических усилий в тяговых элементах между понтоном и трансмиссией. Средняя механическая мощность, передаваемая от понтона на трансмиссию за период τ равна

$$P_m = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} R \cdot v \cdot dt .$$

Здесь R – усилия в тяговых элементах, v – скорость понтона.

К.П.Д. преобразования энергии волнения в механическую работу, равен

$$\eta_m = \frac{P_m}{P \cdot B} .$$

Особенности определения к.п.д. преобразования энергии волнения в механическую работу рассмотрены в работе [9].

Аналогично определяется к.п.д. механической трансмиссии η_t и к.п.д. электрического генератора η_e . Причем эти величины могут быть определены не только при испытаниях макета ПЭВ в опытовом бассейне, но и на специальном стенде, который имитирует перемещение понтона на волнении с различными амплитудами и частотами.

Таким образом, в процессе испытаний модели ПЭВ в бассейне определяются характеристики всех основных элементов конструкции и эффективность (к.п.д.) всего комплекса ПЭВ. На рисунке 12, для примера, показана зависимость механического к.п.д. η_m рабочего органа и общее к.п.д. η одного из вариантов модели ПЭВ от нагрузки электрического генератора.

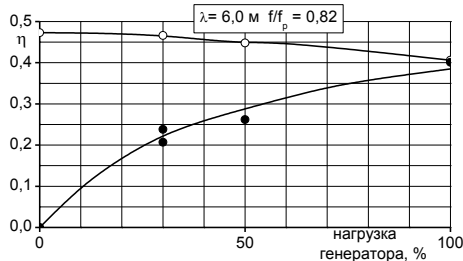


Рис. 12. Зависимость механического к.п.д. η_m (верхняя кривая) и общего к.п.д. ПЭВ η (нижняя кривая) от нагрузки электрического генератора

2.5. **Защитные качества** одного или нескольких рядов волновых демпферов могут быть определены путем сопоставления высоты исходной волны (перед защитным поясом) и высоты волны позади защитного пояса. Схема измерений и результаты измерений высот волн при испытаниях модели ПЭВ в бассейне показана на рисунке 13.

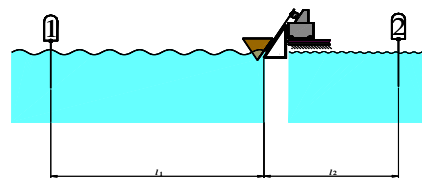
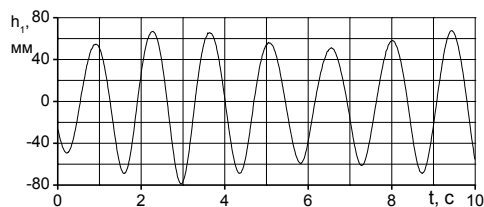
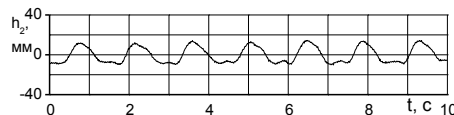


Схема измерений высот волн перед моделью ПЭВ (1) и за моделью (2)



Высота волны перед моделью



Высота волны за моделью

Рис. 13. Схема измерения высот волн в бассейне для оценки защитных качеств ММЗК

Результаты испытаний показали, что при однорядном защитном поясе высота волны за моделью уменьшается в 2-3 раза по сравнению с исходной высотой волны. Поскольку энергия волн пропорциональна квадрату высоты, то после прохождения защитного пояса энергия волны может быть уменьшена в 4-9 раз. Данные результаты относятся к однорядному защитному поясу. При этом опорная часть защитных конструкций отсутствовала, т.е. не моделировалась. Следует ожидать, что защитный пояс, состоящий из нескольких рядов волновых демпферов и имеющий развитые опорные конструкции в подводной части будет значительно эффективней в части защитных качеств.

3. ПРОБЛЕМЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ КОНЦЕПЦИИ ММЗК

3.1. Определение характеристик волнения и энергетического потенциала акватории в районе установки ПЭВ.

Существует большое количество данных по характеристикам волнения в различных точках Мирового океана. Они содержатся в специальных документах, например Российском Морском Регистре. Но эти данные, как правило, относятся к районам открытого моря. При подходе к берегу характеристики волнения значительно изменяются.

Если в открытом море плотность потока энергии волнения примерно одинакова вдоль всего фронта волны, то при подходе к берегу происходит перераспределение энергии. Вблизи мысов плотность потока энергии возрастает, а в заливах – уменьшается. Это приводит к ряду специфических явлений, например, появлению разрывных течений, которые необходимо учитывать при строительстве гидротехнических сооружений. Поэтому размещая ПЭВ в различных точках прибрежной акватории, мы получим разную его производительность.

Для решения этих вопросов необходимо проводить цикл специальных исследований, который должен включать:

- математическое моделирование волнения и разрывных течений в районе установки ПЭВ с учетом берегового рельефа и мелководья;
- физическое моделирование в бассейне волнения и разрывных течений в районе установки ПЭВ с учетом берегового рельефа и мелководья;
- натурные измерения характеристик волнения и течений в различных точках акватории.

3.2. Выбор характеристик основных элементов ПЭВ и оценка годовой выработки электроэнергии.

ПЭВ схематично можно представить состоящим из 3-х элементов: рабочего органа, который непосредственно взаимодействует с волной, трансмиссии и электрогенератора.

Эффективность преобразования энергии морского волнения в электроэнергию, т.е. к.п.д. всего ПЭВ зависит от к.п.д. каждого из этих элементов. А они в свою очередь зависят от характеристик собственной конструкции. Выбор конструкции каждого элемента и определение их характеристик, обеспечивающих максимальную эффективность всего комплекса ПЭВ, является чрезвычайно сложной, но, безусловно, важнейшей задачей создания реальных ПЭВ.

Однако в настоящее время нет общепринятых подходов к решению этих задач. Поэтому трудно

сопоставлять эффективность разных конструкций.

Разработка такого общего подхода и создание определенного регламента по определению эффективности ПЭВ является специальной задачей, которую необходимо решить для успешного развития волновой энергетики.

3.3. Обеспечение прочности и надежности ПЭВ. Экологическая безопасность морской акватории.

ПЭВ, как всякое морское сооружение, должно без ущерба для своей работы выдерживать нагрузки от волнения, ветра и течений.

В настоящее время существует много нормативных документов, которые позволяют решать эти вопросы для традиционных гидротехнических сооружений – плотин, дамб и т.п. При определенных условиях многие из них могут быть использованы для решения вопросов прочности и надежности ПЭВ.

Однако для этого необходимо:

- из большого количества СНиПов и других документов отобрать те, которые применимы к той или иной конструкции ПЭВ;
- внести в эти документы необходимые изменения и дополнения, которые бы учитывали специфику работы ПЭВ.

Для этого необходимо провести большой объем экспериментально-теоретических работ по изучению внешних сил, действующих на элементы ПЭВ и разработать методику расчета прочности элементов конструкции.

Отдельно стоит вопрос об экологической безопасности морской акватории, где устанавливается ПЭВ. Мы сейчас даже не знаем, как подходить к нему. Но ясно, что нельзя оставлять его без внимания и, создавая такие комплексы, нужно пытаться оценивать их влияние на окружающую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в докладе технология позволяет в комплексе решить три задачи: защита морского побережья и береговых инженерных сооружений от разрушения морскими волнами, создание защищенных акваторий для организации культурно-оздоровительных зон или для промышленного использования, преобразование энергии морского волнения в электроэнергию. Выполненные исследования показали, что с помощью защитного пояса, состоящего из ряда (или нескольких рядов) волновых демпферов, энергия морского волнения может быть снижена в десять и более раз. При этом около 40% энергии волнения может быть преобразовано в электроэнергию.

Разработанная технология модельных испытаний ПЭВ и оценки эффективности основных элементов таких конструкций может быть использована при проектировании волновых электростанций любых типов. Она позволяет в лабораторных условиях проводить совершенствование уже существующих конструкций, а также может быть использована при разработке новых типов ПЭВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И.Виссарионов, В.В.Волжаник, Л.А.Золотов, С.В.Кривенкова, Н.К.Малинин, Б.Е.Монаков. Использование волновой энергии. Издательство МЭИ, Москва, 2002
2. Peter B. Frigaard, Laurent Marquis, Morten Kramer, Jens P. Kofoed. Wave Star. 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures. Rio de Janeiro, 2010, стр. 1492-1501
3. Сайт - www.waveplane.com
4. Сайт - www.dexawave.com
5. Andrew M. Cornett. A Global Wave Energy Resource Assessment. International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, BC, Canada, July 6-11, 2008, стр. 318-326
6. К.К.Федяевский, Я.И.Войткунский, Ю.И.Фаддеев. Гидромеханика. Издательство «Судостроение», Ленинград, 1968
7. Л.И.Лопатухин. Ветровое волнение. Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург, 2012
8. Российский Морской Регистр Судоходства. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. Санкт-Петербург, 2006
9. В.Н.Аносов. Оценка эффективности преобразования энергии морского волнения в полезную работу. Труды Крыловского государственного научного центра, выпуск 88(372), Санкт-Петербург, 2015, стр. 125-136