

## **Возможность использования энергии морских волн на дальневосточном побережье**

*С. Д. Чижюмов, И. В. Каменских, О. В. Трубецкая*<sup>1</sup>

Рассматривается проект экологически чистой волновой электростанции (ВлЭС) для прибрежных районов Дальнего Востока. Предлагаются конструкции преобразователя энергии волн. Кроме использования потенциальной энергии волн, предлагаются способы преобразования кинетической энергии. Разработаны расчетные модели и выполнен численный гидродинамический анализ. Показано сравнение экономических параметров ВлЭС и других электростанций. Преимущества ВлЭС: экологическая чистота, малая стоимость и неистожимые запасы энергии, малые капитальные затраты на строительство, быстрая окупаемость, развитие прибрежных промыслов и судоходства.

**Possibility of using of sea waves energy on the Far East coast.** *Sergey D. Chizhiumov, Iraida V. Kamenskikh, Olga V. Trubetskaya, Komsomolsk-on-Amur State Technical University.*

The problems of power engineering of Russian Far East are reviewed. The features and advantages of wave energy generating plants are analyzed. The design of a wave energy converter is offered. With usage of potential wave energy the additional tool for converting of kinetic wave impact energy is offered. The preliminary numerical calculations for some models of wave converters with different shapes are executed. The comparison of main economical parameters of the project and other power stations is shown. The advantages of wave energy stations: ecological purity, small cost price of inexhaustible energy, small initial costs of building, development of inshore facilities and shipping.

### **Введение**

На Дальнем Востоке (ДВ) России районы, не подключенные к общей электрической сети, составляют 70 % территории. Энергетика Камчатской и Сахалинской областей базируется на привозном топливе: более 90 % электроэнергии производится на завозном мазуте. В связи с большими транспортными расходами стоимость выработки электроэнергии здесь превышает среднемировой показатель в 5–6 раз.

---

<sup>1</sup> *Чижюмов Сергей Демидович* – кандидат технических наук; *Каменских Ираида Витальевна, Трубецкая Ольга Владимировна* – сотрудники кафедры кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Эта проблема должна решаться. Однако способы ее решения, которые предлагаются и фактически реализуются заинтересованными министерствами и крупными компаниями (Росатом, РАО ЕЭС и др.), являются экологически и социально опасными и экономически невыгодными. Так, например, строятся плавучие атомные электростанции для Камчатки и Чукотки, которые никогда не окупятся. В то же время Росэнергоатом планирует создать до 2015 года флотилию из семи плавучих АЭС [1].

Развитие энергетики на ДВ является экстенсивным. Под предлогом привлечения инвестиций проектируются и строятся крупные экологически грязные объекты, с низким КПД, ориентированные на обеспечение добычи полезных ископаемых и экспорт энергоресурсов. Под предлогом необходимости решения существующих проблем и повышения эффективности управления происходит передел собственности, бюджетных средств и ответственности. Тем самым ДВ продолжает развиваться как сырьевой придаток крупных компаний [2] при падении уровня и качества жизни населения. В результате население богатого природными ресурсами ДВ России быстро уменьшается.

Между тем ДВ обладает огромным потенциалом для развития экологически чистой энергетики (ветровой, приливной, волновой и др.) на возобновляемых источниках. В конце 2009 года одобрен проект стратегии развития энергетики ДВ. В нем предполагается увеличение доли возобновляемых источников энергии до 38 % к 2020 году [3]. Однако этого недостаточно, и темпы развития по данному направлению в России сильно отстают от мировых. К тому же обоснованность некоторых проектов вызывает сомнение. Например, Тугурская приливная электростанция (ПЭС) мощностью до 4 ГВт планируется в малонаселенном районе, оторванном от основной энергосистемы. Ее строительство вместе с развитием сети потребует больших капиталовложений, а эксплуатация в условиях малых объемов промышленного производства будет неэффективной.

Очевидно, что для большинства отдаленных районов (Чукотки, Камчатки, Сахалина, Курильских островов и др.) требуются станции небольшой мощности.

Волновая энергия обладает более высокой по сравнению с ветром и солнцем плотностью энергии. Морские волны накапливают в себе энергию ветра на значительном пространстве разгона. Они являются, таким образом, природным концентратом энергии. Среднегодовой потенциал волновой энергии на ДВ представлен в табл. 1.

Энергия волн имеет один из самых высоких показателей по практическому коэффициенту полезного действия среди нетрадиционных источников энергии. Средний практический КПД существующих волновых энергетических станций (ВлЭС) при преобразовании энергии в электричество составляет 30–80 %. Если принять КПД за 50 %, то технический потенциал ВлЭС прибрежной зоны длиной 10 км может составить 150 МВт (выработка энергии в среднем 1,4 млрд. кВт·ч в год) – это существующая энергетика всей Камчатки.

Важным преимуществом волновой энергетики является возможность применения модульного принципа – последовательное сооружение блоков ограниченной мощности, без больших начальных затрат на капитальное строительство, свойственных ПЭС и ГЭС.

**Таблица 1**  
Параметры волнения у побережья Дальнего Востока России

| Район          | Средняя мощность, кВт/м | Средняя высота, м | Наибольшая высота, м |
|----------------|-------------------------|-------------------|----------------------|
| Берингово море | 40                      | 2                 | 15                   |
| Курилы         | 40                      | 1,5–2             | 20                   |
| Охотское море  | 20–30                   | 1,5               | 8                    |
| Японское море  | 10–20                   | 1                 | 5                    |

### **Обзорный анализ схем волновых преобразователей**

В процессе анализа информационных источников в работе были рассмотрены около трех десятков реализованных и перспективных проектов. Перечислим некоторые основные типы ВлЭС [4–7]: преобразователи энергии с качающимися шарнирно связанными элементами («утка» Солтера, плот Коккерела, «морские змеи», система поплавков Русецкого); точечные устройства с поплавками (буи, волновые насосы, системы точечных устройств); гидропневматические плавучие системы (осциллирующие водяные колонны Масуды, кессонные волноломы с воздушными турбинами); гидропневматические береговые конструкции с кессонами и воздушными турбинами; концентраторы волновой энергии («выпрямитель» Рассела, сужающиеся каналы Tarchan, «дамба-атолл»); качающиеся пластины и крылья; гибкие плавниковые системы.

Международное Энергетическое Агентство (IEA) разработало соглашение по океанским энергетическим системам (IEA-OES) с целью создания экономически эффективных и экологически чистых систем использования энергии морских волн и течений. В этом проекте участвуют США, Канада, страны ЕЭС, Япония, Мексика [8].

Следует отметить, что существует много примеров неудачного опыта создания или недостаточно эффективной эксплуатации ВлЭС. При изучении этих примеров видно, что причинами проблем являются как принципиально неудачные технические решения, так и недостаточно проработанные технологии извлечения энергии волн, а именно:

1. Осциллирующий водяной столб (гидропневматический преобразователь) не может обеспечить высокий КПД, так как большая часть полезной работы теряется при сжатии воздуха. При этом практически не используется работа гидродинамических сил. Диапазон применений данного метода узок и ограничивается крупными волнами высотой более 2–3 м.

2. Известные концентраторы волновой энергии выполнены нерационально. Тарчан требует больших затрат на постройку. Выпрямитель Рассела (в том виде, как он описан в работах [4, 6]) недостаточно проработан – размеры его элементов необходимо оптимизировать. Значительная часть энергии теряется на работу сил трения и вихреобразования.

3. Точечные поплавковые преобразователи имеют высокий КПД, но маломощны, а их подвижные элементы и якорные системы недостаточно надежны при воздействии штормовых волн.

Таким образом, практическая эффективность волновых преобразователей может быть достигнута только путем тщательной проработки и согласования функциональных элементов. Следовательно, основная задача при создании эффективных ВлЭС состоит в оптимизации их параметров с учетом реальных условий на месте эксплуатации. Для этого необходим их анализ на основе физических и компьютерных экспериментов.

## Варианты конструкции ВлЭС

В результате анализа проектов ВлЭС первоначально были выбраны сооружения в виде железобетонных массивов-гигантов, устанавливаемых в зоне прибойных волн на глубинах до 7–10 м. Это позволяет, с одной стороны, уменьшить размеры сооружений, а с другой – более надежно связать их с грунтом. Прибойные волны имеют большую крутизну, и их энергия более концентрирована по глубине и длине волны.

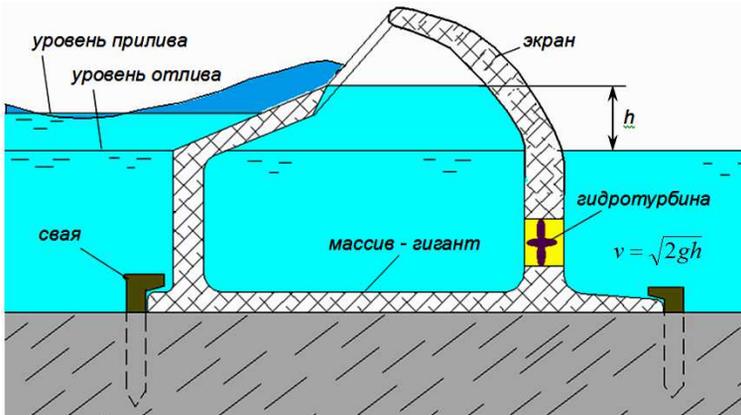


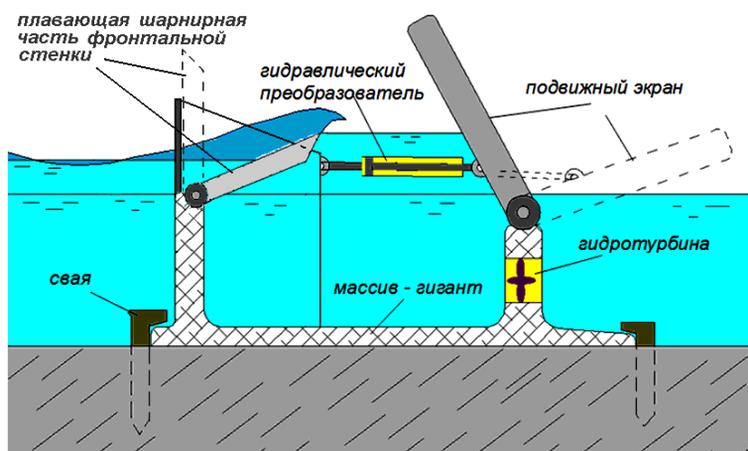
Рис. 1. Простой тип ВлЭС с низконапорными гидротурбинами

На рис. 1 приведена схема ВлЭС в поперечном разрезе. В ее основе лежит патент «выпрямителя» Рассела. Напор станции  $h$  создается в результате наката волн и заполнения резервуара между фронтальной и задней стенками. Передняя часть фронтальной стенки обеспечивает взброс волны. Далее гребень волны откосным участком направляется вперед и перехлестывает через край стенки в бассейн. В подводной части задней стенки имеются отверстия –

каналы с размещенными в них гидрогенераторами. Площадь сечения каналов необходимо подбирать таким образом, чтобы в них обеспечивалась приемлемая скорость течения. Для этого должен поддерживаться высокий уровень воды в бассейне, так как скорость течения в канале  $v$  зависит от перепада уровней воды  $h$  в бассейне и в море.

Таким образом, должны быть увязаны между собой площадь сечения каналов, объем бассейна и статистические параметры волнения. Кроме того, ширина бассейна между стенками и наклон экранирующей плиты подбираются таким образом, чтобы уменьшить образование внутренних волн в бассейне и их выплескивание через фронтальную стенку.

В конструкции на рис. 1 используется только потенциальная энергия попадающих в бассейн гребней волн. Кинетическая энергия расходуется при ударе об экран и при колебаниях воды в бассейне. Для ее использования в варианте установки, изображенном на рис. 2, предусмотрен подвижный экран на шарнирах, приводимый в движение ударами волн. Движение экрана передается гидравлическому преобразователю энергии. В результате эффективность ВлЭС повышается. В бассейне не образуются крупные, выплескивающиеся наружу волны. Кроме того, податливый экран меньше сопротивляется экстремальным волновым нагрузкам, что повышает надежность сооружения в целом.



**Рис. 2.** ВлЭС с двумя типами преобразователей энергии и подвижной верхней частью фронтальной стенки

Для приспособления системы к разным уровням воды и размерам волн дополнительно может быть предусмотрена подвижная верхняя часть фронтальной стенки в виде шарнирно закрепленных плавучих понтонов. При этом автоматическое управление углом их наклона обеспечивается уровнем воды в бассейне (рис. 2).

## Анализ гидродинамики

Как следует из описания конструкции ВлЭС, ее поперечные размеры следует оптимизировать исходя из статистических параметров волнения на месте установки на основе анализа гидродинамических процессов. Этот анализ может быть выполнен после проведения экспериментов. После этого возможен вывод обобщенных проектных зависимостей. Для выполнения физических экспериментов идут подготовительные работы в опытовом бассейне.

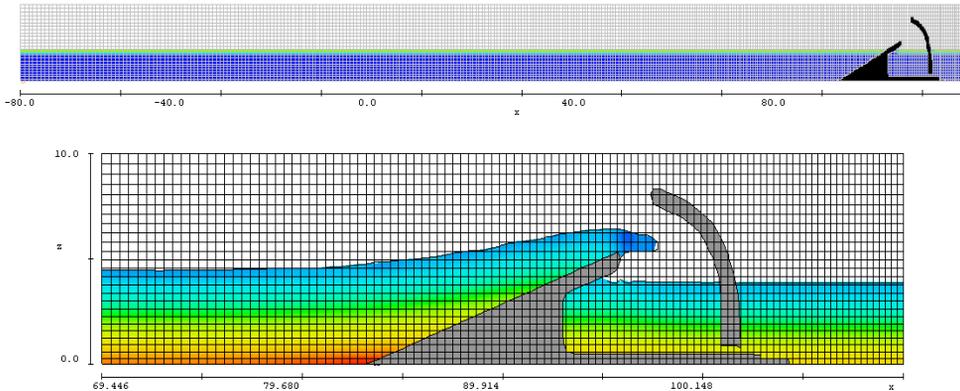


Рис. 3. Расчетная сетка компьютерной модели

Предварительные расчеты выполнены с помощью программного комплекса Flow-3D. При численном моделировании использована двумерная модель в натуральную величину. Жидкость невязкая, несжимаемая. Влиянием воздуха пренебрегается. Расчетная сетка: 400 x 25 ячеек (рис. 3). Так как движение нестационарное, при расчете выполняется численное интегрирование уравнений движения по времени с автоматической адаптацией шага.

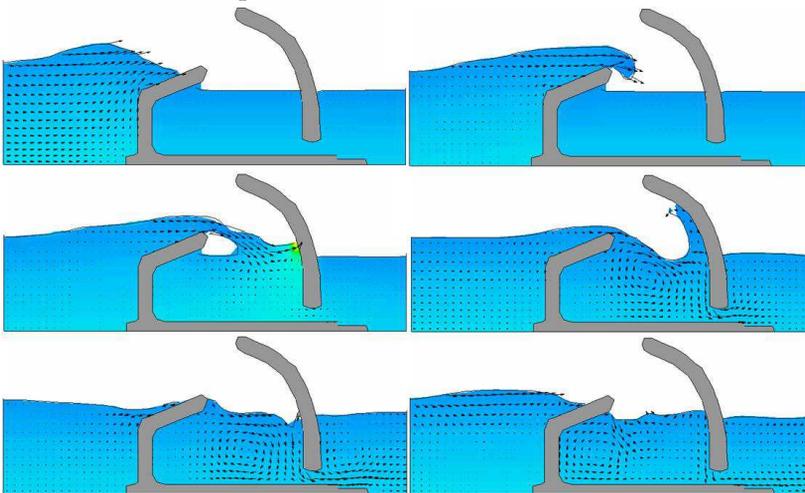


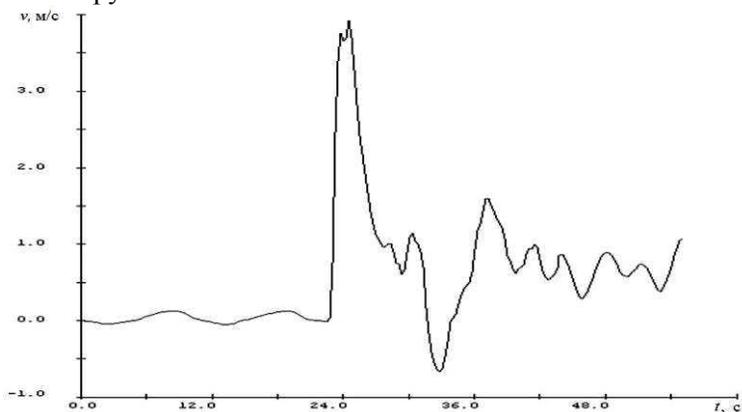
Рис. 4. Пример анализа гидродинамики ВлЭС с вертикальной фронтальной стенкой

**По результатам проведенных расчетов сделан ряд выводов.**

Движение волн моделируется условным волнопродуктором путем задания переменных скоростей движения жидкости на левой границе расчетной сетки, имитирующих периодическое поступательное смещение волнопродуктора по оси  $x$ . Такое граничное условие не соответствует распределению скоростей в поперечном сечении свободной волны, поэтому вблизи левой границы расчетной сетки волны имеют «неправильную» структуру. По мере дальнейшего движения волны приобретают реальный профиль. Высота первой волны при подходе к сооружению ВлЭС составит 1,5 м. Следующие волны имеют структуру, близкую к регулярной, а их средняя высота равна 0,75 м.

Рассмотрены модели с несколькими формами сооружения ВлЭС и разной площадью подводных каналов. На рис. 4–7 представлены примеры расчетов гидродинамики для разных вариантов сооружений.

1. Фронтальная стенка может быть откосной со стороны, обращенной к морю. Однако результаты расчетов показали, что при коротком откосном участке гребень волны растет не намного больше, чем при вертикальной стенке. Кроме того, волна частично разрушается на откосе, а частично отражается. Отраженная волна скатывается навстречу следующему гребню и существенно гасит его. А самое главное, резко увеличивается ширина, а значит и стоимость сооружения.



**Рис. 5.** Скорости течения (м/с) в подводном канале с площадью сечения  $0,7 \text{ м}^2$  для модели, представленной на рис. 4

2. Так как сооружение с пологой откосной стенкой, очевидно, будет слишком материалоемким, рекомендуется устанавливать сооружение в месте, где существует естественный пологий подъем дна в сторону берега, обеспечивающий увеличение высоты волн и концентрирование их энергии по ширине (прибой).

3. Эффективной и простой оказалась стенка с вертикальной подводной частью и откосной вершиной на поверхности. При этом степень отражения волн практически не увеличилась по сравнению с откосной стенкой.

4. Диаметр подводных каналов должен подбираться так, чтобы при наибольшем уровне воды в бассейне она не выплескивалась, а полностью проходила через генераторы.

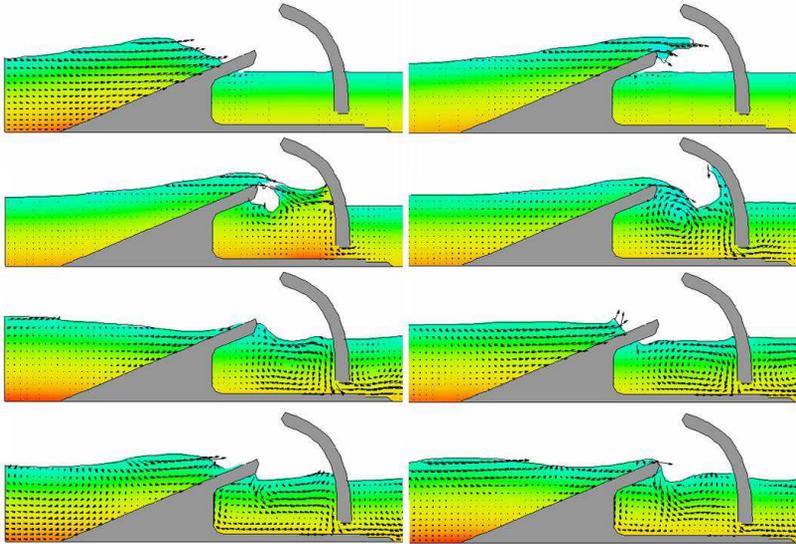


Рис. 6. Пример анализа гидродинамики ВлЭС с откосной фронтальной стенкой

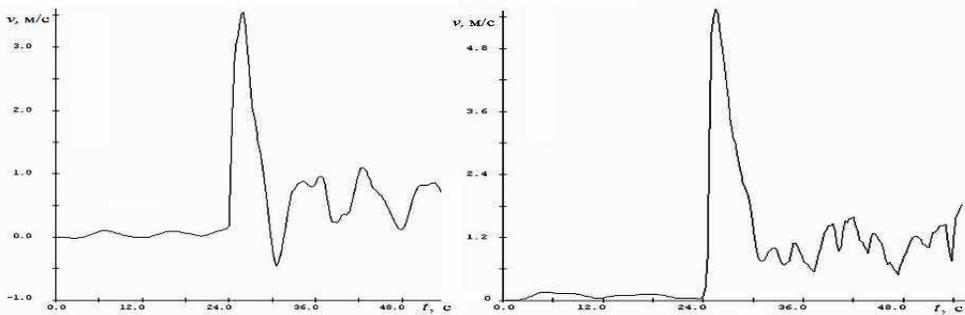


Рис. 7. Скорости течения в подводном канале (м/с) для модели, представленной на рис. 6 (с площадью сечения  $0,7 \text{ м}^2$  и  $0,4 \text{ м}^2$  соответственно)

5. В результате волнения в бассейне скорость потока в подводном канале неравномерная. Для сглаживания пульсаций давлений можно предложить волногасительные устройства (в частности, в виде подвижных шарнирных панелей, приведенных на рис. 2). Кроме того, генераторы должны быть приспособлены к работе в режиме пульсирующих потоков.

6. Выпуск воды из бассейна можно предусмотреть через фронтальную стенку. При этом пульсации течения в подводном канале увеличиваются и имеют знакопеременный характер. Существуют генераторы, работающие в условиях переменного направления потока. Если их использовать, то при та-

кой конструкции ВлЭС ее эффективность может быть увеличена, так как появится возможность меньшего отражения волн при более полной утилизации энергии потоков жидкости в подводных генераторах электроэнергии.

7. Ширина бассейна и форма задней стенки должны быть оптимизированы с целью исключения образования отраженных волн, переплескивающих обратно через переднюю стенку.

### Оценка эффективности

Мощность гидроэнергетической установки определяется выражением:

$$N = \eta_m \eta_{эз} \rho g Q h ,$$

где  $\eta_m$  – КПД гидротурбины,  $\eta_{эз}$  – КПД электрогенератора,  $Q = v \cdot S$  – расход воды через гидротурбину,  $h$  – напор воды, подведенный к гидротурбине. Для современных турбин и генераторов характерны значения:  $\eta_m = 0,85 \dots 0,9$ ;  $\eta_{эз} = 0,95 \dots 0,97$ .

Расчеты по этой формуле при напоре от 0,5 до 1 м дают значения мощности на единицу длины фронта ВлЭС от 6 до 20 кВт/м. Если использовать энергию ударов волн (с помощью подвижного экрана с дополнительными гидравлическими преобразователями энергии), то по предварительным оценкам мощность ВлЭС возрастет более чем в два раза.

Сравнение экономических показателей ВлЭС с другими энергетическими системами приведено в табл. 2.

**Таблица 2**  
Эффективность ВлЭС в сравнении с другими энергосистемами

| ЭС   | Удельная стоимость, \$/кВт | Срок окупаемости, год | Начал. капиталовложения, млн. \$ | Экологичность | Другие особенности  |
|------|----------------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------|---|
| АЭС  | 7200                       | 11                    | 550                              | ---           | Экологическая опасность, ограниченные запасы дорогого топлива           |
| ТЭС  | 1000 (6500 – на ДВ)        | 4                     | 1,3                              | --            | Выбросы на ДВ: 40 млн. тонн CO <sub>2</sub> и др. вредных веществ в год |
| ГЭС  | 1200                       | 2                     | 300                              | –             | Длительность строительства, затопление территории                       |
| ВЭС  | 1500                       | 1,5                   | 1                                | +             | Ограниченный срок службы  |
| ПЭС  | ~1000                      | 7,5                   | 250                              | +             |   |
| ВлЭС | 600                        | 1                     | 0,5                              | +             | Защита от крупных волн, причалы   |

Социальная значимость данного проекта состоит в том, что он направлен на развитие экологически чистых малых и средних энергосистем, ориентированных на социальное обустройство населения, снижение цен на энергию, защиту от штормовых волн и цунами, попутное развитие прибрежного судоходства и местных промыслов.

Практическая реализация проекта позволит отказаться от привозного топлива для отдаленных прибрежных районов ДВ и приведет к качественному улучшению уровня жизни населения. Строительство ВлЭС возможно с последовательным наращиванием мощности, без больших начальных затрат. Волновая энергия является неисчерпаемой и экологически чистой.

Одновременное применение ВлЭС в качестве волноломов, рейдовых причалов и других сооружений позволит улучшить условия прибрежного судоходства, рыболовства, развития разных видов промысла и разведения морских культур. При воздействии цунами ВлЭС, принимая на себя энергию волн, может частично или полностью защитить территорию.

## Литература

1. Герман Греф сомневается в окупаемости плавучих АЭС [Электронный ресурс] // РИА Новости. – 17.05.2007: [сайт]. [2007]. URL: <http://www.atom-info.ru/news/air1417.htm> (дата обращения: 23.08.2010).
2. Кизилова Л. Включить всю мощь Востока [Электронный ресурс] // Мировая энергетика. – 2008. – № 10: [сайт]. [2008]. URL: [http://www.worldenergy.ru/doc\\_20\\_64\\_3365.html](http://www.worldenergy.ru/doc_20_64_3365.html) (дата обращения: 1.11.2010).
3. Одобрен проект стратегии развития электроэнергетики Дальнего Востока до 2020 года и на перспективу до 2025 года [Электронный ресурс] // Пресс-релиз ОАО «РАО Энергетические системы Востока». – 19.11.2009. [сайт]. [2009]. URL: <http://www.energotrade.ru/articles/5862/> (дата обращения: 1.11.2010).
4. Росс Д. Энергия волн. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 112 с.
5. Волшаник В. В., Зубарев В. В., Франкфурт М. О. Использование энергии ветра, океанских волн и течений // Итоги науки и техники. Нетрадиционные и возобн. источники энергии. – М.: ВИНТИ, 1983.
6. Коробков В. А. Преобразование энергии океана. – Л.: Судостроение, 1986. – 279 с.
7. Лабейш В. Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 79 с.
8. IEA-OES “IEA Ocean Energy Systems Implementing Agreement – 5 Year Strategic Plan 2007–2011” [Электронный ресурс] // IEA-OES publication: [сайт]. [2011]. URL: [www.iea-oceans.org](http://www.iea-oceans.org) (дата обращения: 11.01.2011).