

Чижиумов С. Д.
S.D. Chizhiumov

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН

TRANSFORMATION OF SEA WAVE ENERGY



Чижиумов Сергей Демидович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Кораблестроение» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина 27; (4217) 54-30-74. E-mail: chizhium@rambler.ru.

Mr. Sergey D. Chizhiumov – PhD in Engineering, Professor of the Department of Shipbuilding, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur, Russia). Mailing address: 27 Lenin Av., Komsomolsk-on-Amur, Russia. Phone: (4217) 54-30-74. E-mail: chizhium@rambler.ru.

Аннотация. Рассматривается проект экологически чистой волновой электростанции (ВлЭС) для прибрежных районов Дальнего Востока. Предлагаются конструкции преобразователя энергии волн на основе патента Рассела. Кроме использования потенциальной энергии волн предлагаются способы преобразования кинетической энергии. Разработаны расчётные 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.

Summary. The paper deals with the problem of power engineering in the coastal regions of the Russian Far East. The features and advantages of wave energy plants are analyzed. The design of a wave energy converter based on the Russell patent is offered. Apart from reliance on the potential wave energy, an additional tool for converting the kinetic wave impact energy is offered. Preliminary calculations for some models of wave converters with different shapes are executed along with hydrodynamic analysis. A comparison of main economical parameters of the project with other types of power stations is shown. The advantages of wave energy power stations: environmental aspect, small cost of the energy and its potentially inexhaustible source, low capital costs, a perspective of a new momentum for the development of such sectors as inshore facilities and shipping industry.

Ключевые слова: волновая электростанция, гидродинамика, численное моделирование, энергия, морские волны.

Keywords: Wave energy converter, hydrodynamics, numerical modeling, energy, sea waves.

УДК 621.311.21-827: 532.593.3: 504.052

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.

Эта проблема должна решаться. Однако способы её 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 Чукот-

ки, которые никогда не окупятся. В то же время Росэнергоатом планирует создать до 2015 г. флотилию из семи плавучих АЭС [2].

Развитие энергетики на ДВ является экстенсивным. Под предлогом привлечения инвестиций проектируются и строятся крупные и 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 [3] при падении уровня и качества жизни населения.

Между тем ДВ обладает огромным потенциалом для развития экологически чистой энергетики (ветровой, приливной, волновой и др.) на возобновляемых источниках. В конце 2009 г. одобрен проект стратегии развития энергетики ДВ. В нём предполагается увеличение доли возобновляемых источников энергии до 38 % к 2020 г. [6]. 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 малонаселённом районе, оторванном от основной энергосистемы. Её строительство вместе с развитием сети потребует больших капиталовложений, а эксплуатация в условиях малых объёмов промышленного производства будет неэффективной.

Очевидно, что для большинства отдалённых 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.

Таблица 1

Параметры волнения у побережья ДВ 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

Энергия волн имеет один из самых высоких показателей по практическому КПД 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.

Обзорный анализ схем волновых преобразователей

В процессе анализа информационных источников в работе были рассмотрены около двух десятков реализованных и перспективных проектов. Перечислим некоторые основные типы ВлЭС [1; 4; 5; 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; качающиеся пластины; концентраторы волновой энергии («выпрямитель» Рассела, сужающиеся каналы ТАРСНАН, «дамба – атолл»).

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 существуют также примеры неудачного опыта создания и эксплуатации ВлЭС. Однако при внимательном изучении этих проектов видно, что причина неудач кроется в недостаточно проработанных технологиях 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. ТАРСНАН требует больших затрат на постройку. Выпрямитель Рассела (в том виде, как он описан в работах [4, 7]) недостаточно проработан – размеры его элементов необходимо оптимизировать.

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

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

Варианты конструкции ВлЭС

В результате анализа проектов ВлЭС 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 надёжно связать их с грунтом. Прибойные волны имеют большую крутизну, и их энергия более концентрирована по глубине и длине волны.

На рис. 1 приведена схема ВлЭС в поперечном разрезе. В её основе лежит патент «выпрямителя» Рассела. Напор станции h создаётся 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 вперёд и перехлёстывает через край стенки в бассейн. В подводной части задней стенки имеются отверстия – каналы с размещёнными в них гидрогенераторами. Площадь сечения каналов необходимо подбирать таким образом, чтобы в них обеспечивалась приемлемая скорость течения. Для этого должен поддерживаться максимальный 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, объём 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 выплёскивание через фронтальную стенку.

В конструкции на рис. 1 используется только потенциальная энергия падающих в бассейн гребней волн. Кинетическая энергия расходуется при ударе об экран и при колеба-

ниях воды в бассейне. Для её использования в варианте установки, изображённом на рис. 2, предусмотрен подвижный экран на шарнирах, приводимый в движение ударами волн. Движение экрана передаётся гидравлическому преобразователю энергии. В результате эффективность ВлЭС повышается. В бассейне не образуются крупные, выплёскивающиеся наружу волны. Кроме того, податливый экран меньше сопротивляется экстремальным волновым нагрузкам, что повышает надёжность сооружения в целом.

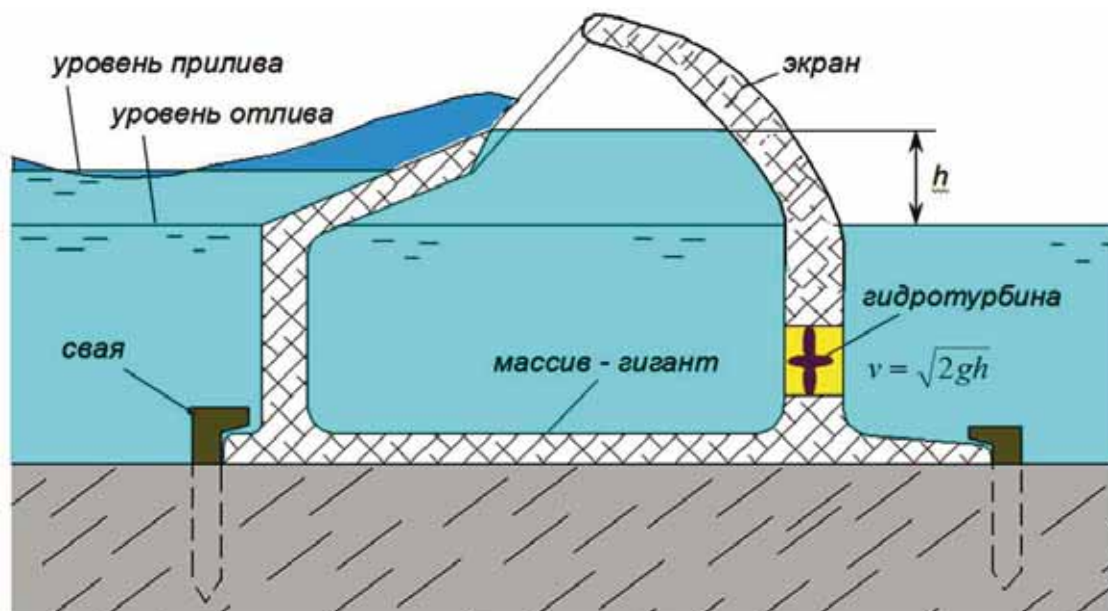


Рис. 1. Простой тип ВлЭС с низконапорными гидротурбинами

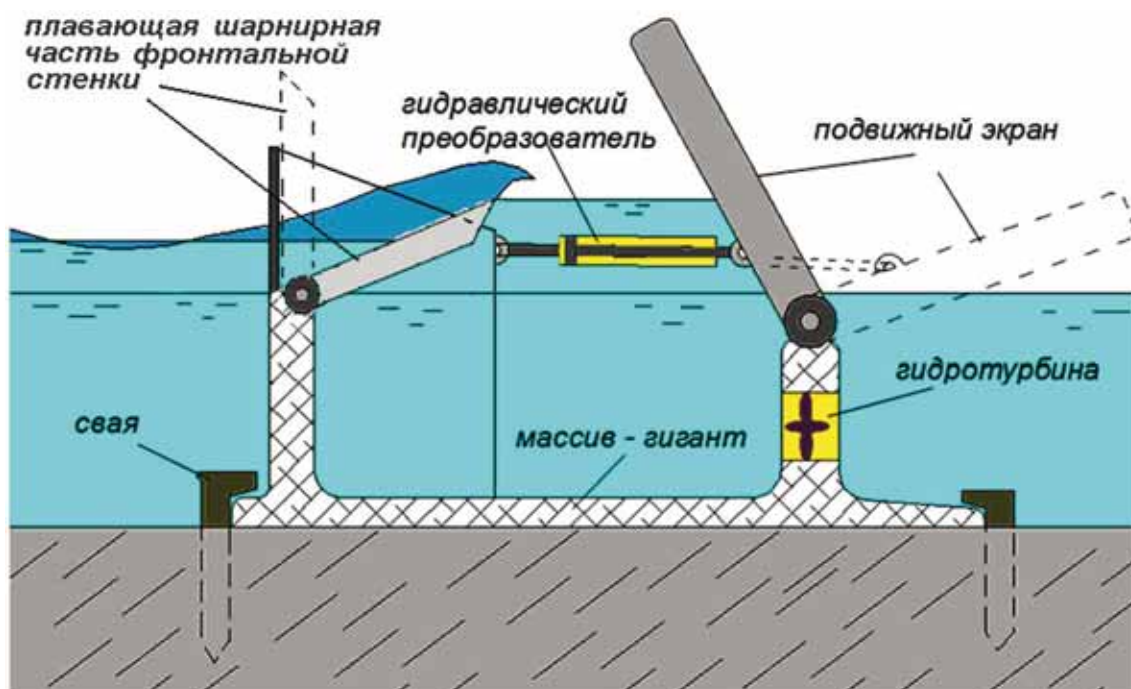


Рис. 2. ВлЭС с двумя типами преобразователей энергии и подвижной верхней частью фронтальной стенки

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

Анализ гидродинамики

Как следует из описания конструкции ВлЭС, её 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 обобщённых проектных зависимостей. Для выполнения физических экспериментов идут подготовительные работы в опытовом бассейне.

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

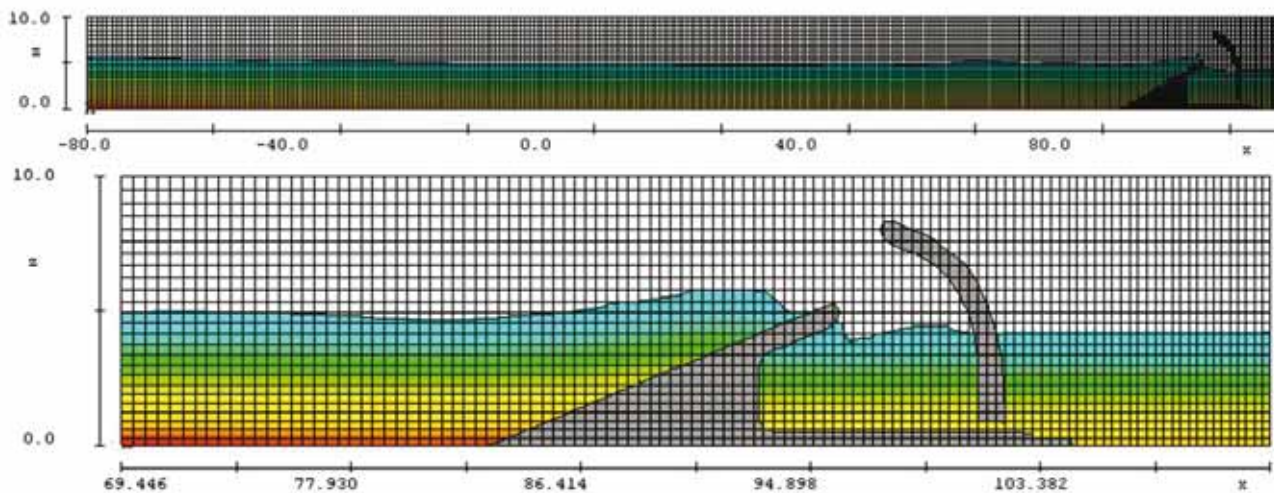


Рис. 3. Расчётная сетка компьютерной модели

Движение волн моделируется условным волнопродуктором путём задания переменных скоростей движения жидкости на левой границе сетки, имитируя периодическое поступательное движение волнопродуктора по оси x . Такое граничное условие не соответствует распределению скоростей в поперечном сечении свободной волны, поэтому вблизи левой границы расчётной сетки волны имеют «неправильную» структуру. По мере дальнейшего движения волны приобретают реальный профиль. Высота первой волны при подходе к сооружению ВлЭС составляет 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 расчётов гидродинамики для разных вариантов сооружений.

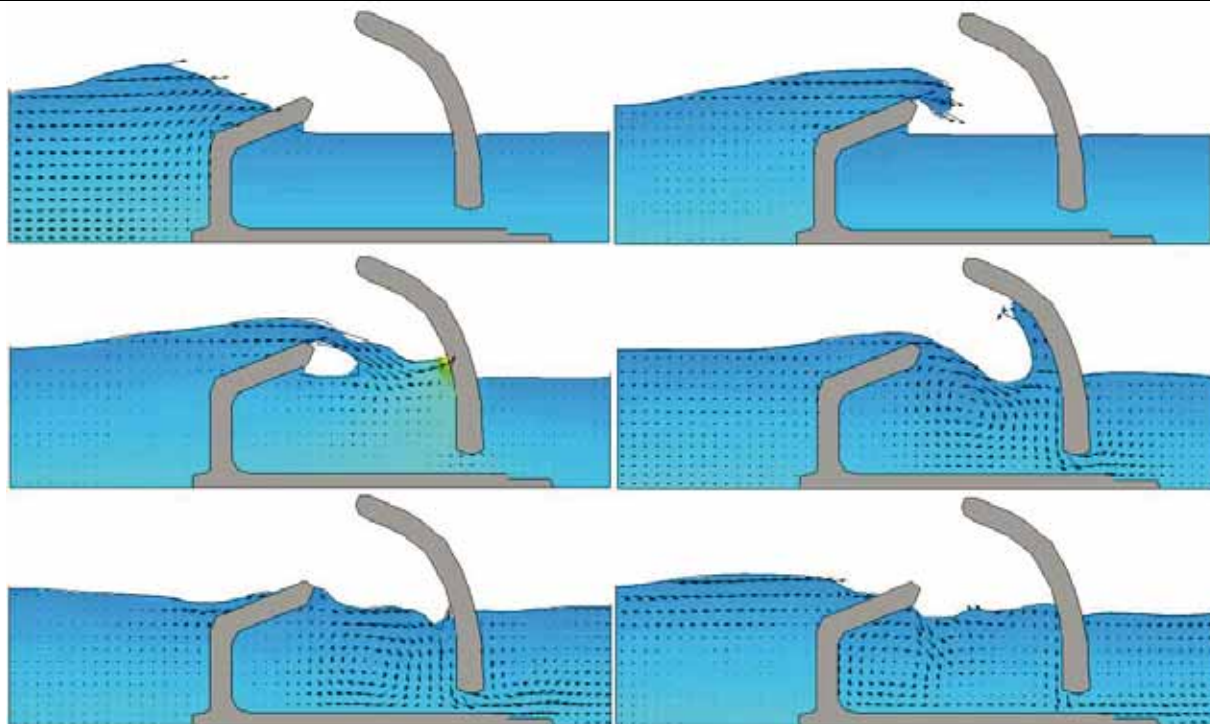


Рис. 4. Пример анализа гидродинамики ВлЭС с вертикальной фронтальной стенкой

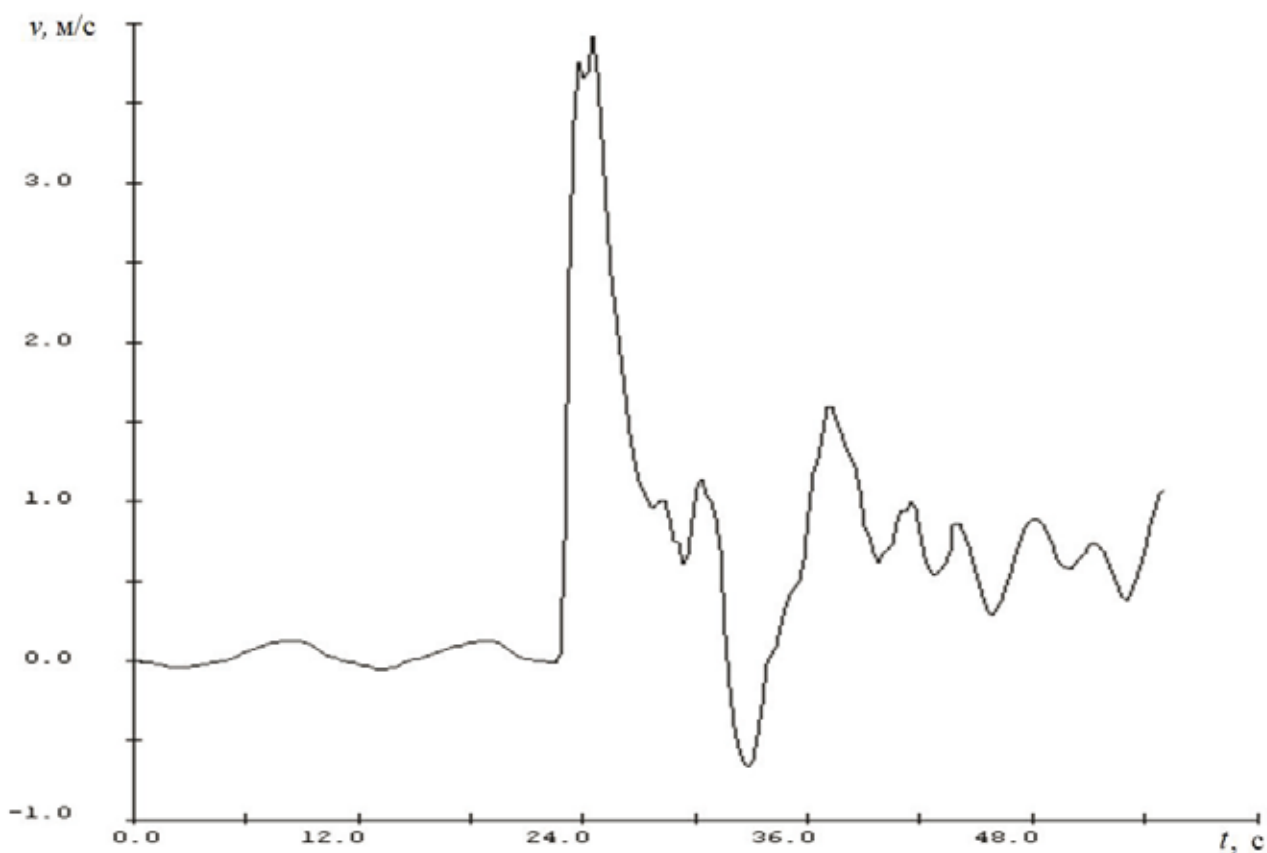


Рис. 5. Скорости течения (м/с) в подводном канале с площадью сечения $0,7 \text{ м}^2$ для модели, представленной на рис. 4

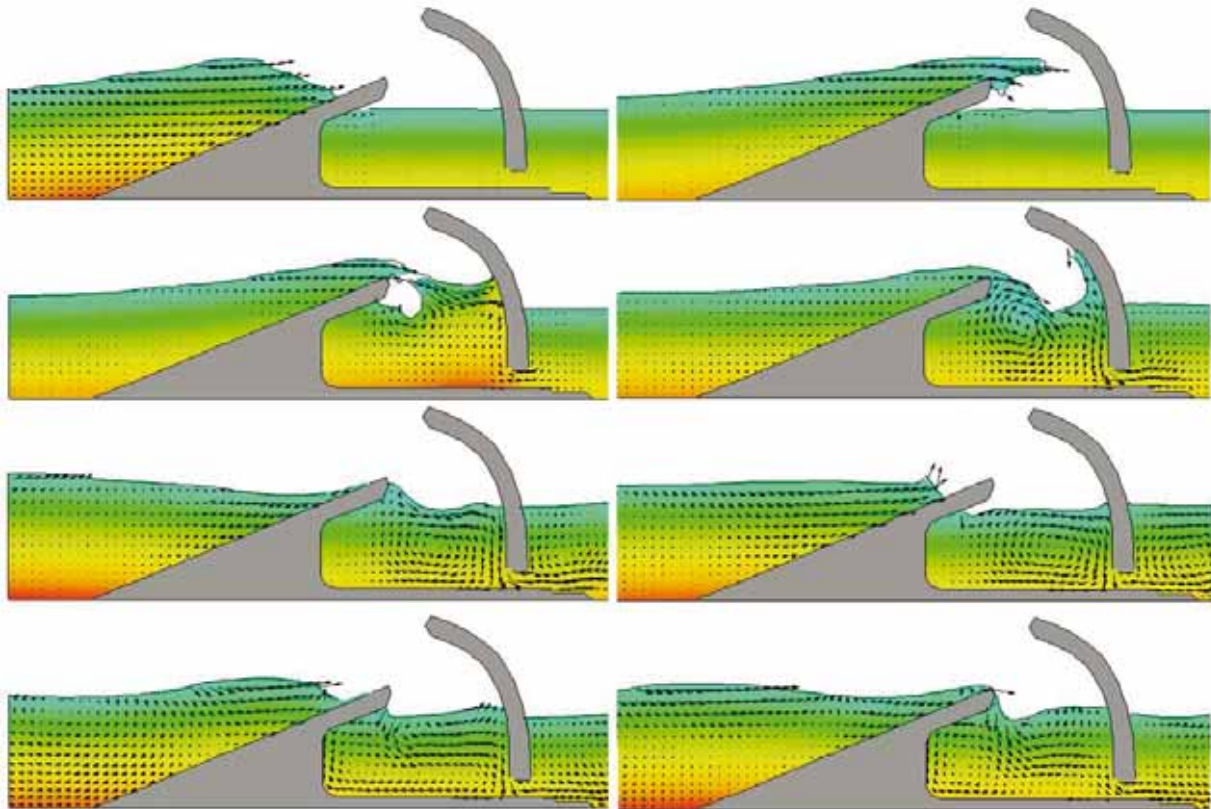


Рис. 6. Пример анализа гидродинамики ВлЭС с откосной фронтальной стенкой

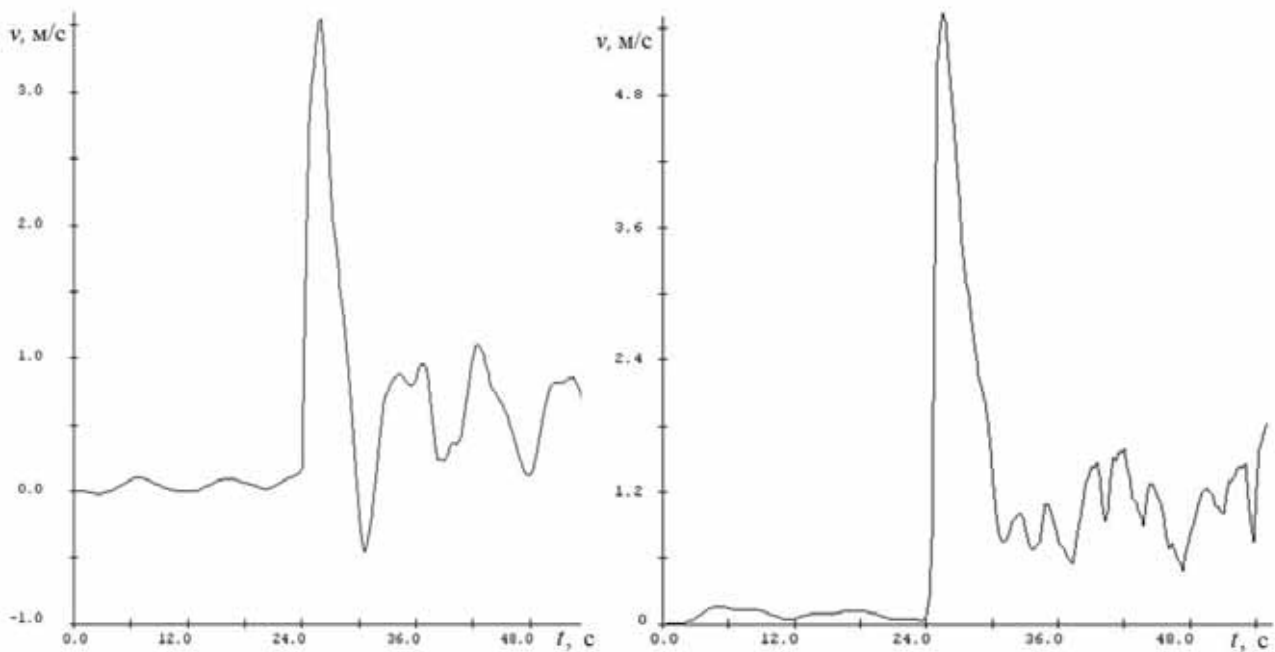


Рис. 7. Скорости течения в подводном канале (м/с) для модели, представленной на рис. 6 (с площадью сечения $0,7 \text{ м}^2$ и $0,4 \text{ м}^2$ соответственно)

По результатам проведённых расчётов сделан ряд выводов:

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

2. Так как сооружение с пологой откосной стенкой, очевидно, будет слишком материалоёмким, рекомендуется устанавливать сооружение в месте, где существует естественный пологий подъём 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 выплёскивалась, а полностью проходила через генераторы.

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 стенок, 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 такой конструкции ВлЭС её эффективность может быть увеличена, так как будет меньшая степень отражения волн и будет использоваться их энергия в подводной части.

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

Оценка эффективности

Мощность гидроэнергетической установки определяется выражением

$$N = \eta_m \eta_{эз} \rho g Q h ,$$

где η_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: $\eta_m = 0,85 \dots 0,9$; $\eta_{эз} = 0,95 \dots 0,97$.

Расчёты 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.

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, сопутное развитие прибрежного судоходства и местных промыслов.

Практическая реализация проекта позволит отказаться от привозного топлива для отдалённых прибрежных районов ДВ и приведёт 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.

Таблица 2

Эффективность ВлЭС в сравнении с другими энергосистемами

ЭС	Удельная стоимость, \$/кВт	Срок окупаемости, год	Наим. нач. капиталовложения, млн \$	Экологичность	Другие особенности
АЭС	7200	11	330	- - -	Экологическая опасность, ограниченные запасы дорогого топлива
ТЭС	1000 (6500 – на ДВ)	4	1,3	- -	Выбросы на ДВ: 40 млн т CO ₂ и других вредных веществ в год
ГЭС	1200	2	300	-	Длительность строительства, затопление территории
ВЭС	1500	1,5	1	+	Ограниченный срок службы
ПЭС	~1000	0,3	250	+	–
ВлЭС	600	0,7	0,3	+	Защита от крупных волн, причалы

ЛИТЕРАТУРА

1. Волшаник, В. В. Использование энергии ветра, океанских волн и течений / В. В. Волшаник, В. В. Зубарев, М. О. Франкфурт. – М. : ВИНТИ, 1983. – 100 с. (Итоги науки и техники. Сер. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии)
2. Герман Греф сомневается в окупаемости плавучих АЭС. РИА Новости. – 17.05.2007. Режим доступа: <http://www.atominform.ru/news/air1417.htm>.
3. Кизилова, Л. Включить всю мощь Востока / Л. Кизилова // Мировая энергетика. – 2008. – № 10. Режим доступа: http://www.worldenergy.ru/doc_20_64_3365.html.
4. Коробков, В. А. Преобразование энергии океана / В. А. Коробков. – Л. : Судостроение, 1986. – 279 с.
5. Лабейш, В. Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / В. Г. Лабейш. – СПб. : СЗТУ, 2003. – 79 с.
6. Одобрен проект стратегии развития электроэнергетики Дальнего Востока до 2020 г. и на перспективу до 2025 г. : Пресс-релиз ОАО "РАО Энергетические системы Востока". – 19.11.2009. Режим доступа: <http://www.energotrade.ru/articles/5862/>
7. Росс, Д. Энергия волн / Д. Росс. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 112 с.
8. IEA-OES "IEA Ocean Energy Systems Implementing Agreement – 5 Year Strategic Plan 2007 – 2011" // IEA-OES publication, 2006. Режим доступа: www.iea-oceans.org.