

дизинтер

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

СИЧКАРЕВ Виктор Иванович

УДК 621.221.2:620.92

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ
ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ

Специальности:

- 05.14.10 - ГЭС и гидроэнергетические установки
- 05.14.08 - преобразование возобновляемых и нетрадиционных видов энергии

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ленинград - 1989 г.

К

Работа выполнена в Институте проблем морских технологий
Дальневосточного отделения Академии наук СССР.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Обрезков В.И.;
доктор технических наук, профессор Шавелев Д.С.;
доктор географических наук, профессор Давидан И.Н.

Ведущая организация:

Киевский политехнический институт

Защита состоится "19" мая 1989 г.

в 16 час. на заседании специализированного совета
Д 063.38.09 при Ленинградском ордена Ленина Политехническом
институте имени М.И. Калашникова
195251 Ленинград,
корпус, ауд. 2

С диссертаци
нке института.

Отзывы на ав
просим направля
выше адресу.

Автореферат

Ученый секретар
специализирован
кандидат техн.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ

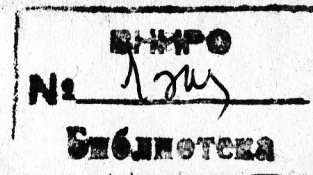
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена одному из бурно развивающихся направлений гидроэнергетики – волноэнергетике, первичным энергоносителем которой является морское поверхностное волнение. От других направлений гидроэнергетики, таких как гидроэнергетика речных потоков, открытых морских течений, приливов, волноэнергетика отличается принципиально иной физической природой процессов движения энергии: в волновой энергетике осуществляется отбор энергии колебаний водной массы.

Научная база волновой энергетике граничит с гидродинамикой, океанологией, энергетикой, физикой, теорией корабля, строительной механикой, теорией оболочек, теорией проектирования систем, экономикой.

Настоящая работа построена с использованием имеющихся в мире разработок, исследований и опыта применения технических систем волноэнергетики. В этом направлении за рубежом и в СССР накоплен патентный фонд, насчитывающий около тысячи технических решений, разработаны методы исследований некоторых конкретных устройств, осуществлено строительство крупных экспериментальных и опытно-промышленных установок, построена первая в мире промышленная волновая энергетическая станция (Норвегия). По результатам исследований в области волноэнергетики имеется множество публикаций. За рубежом и в СССР опубликовано несколько монографий, в числе которых работы Р.Шоу, М.Мак-Кормика, В.И.Сичкарева. Имеются волноэнергетические разделы в более общих монографиях С.Соренсена, В.В.Волшаника (с соавторами), Н.В.Вершинского, В.А.Коробова, Р.Б.Ахмедова.

Выполненные исследования и разработки позволили оценить энергоресурсы волнения и увидеть в нем перспективный источник возобновляемой энергии; найти технические решения, на которых достигнута близкая к 100 % эффективность отбора энергии на резонансных частотах; найти методы и осуществить настройку технических устройств на резонанс; осуществить некоторые попытки создания устройств с широкой полосой резонансных частот; разработать гидро-



динамическую и инженерную теорию конкретных найденных технических решений; оценить достигнутые экономические результаты и сопоставить их с экономическими показателями традиционной энергетики; показать существенный вклад в себестоимость волновой энергии материалоэкономности конструкций волновых станций.

Вместе с тем, возникший за рубежом вокруг волноэнергетики исследовательский бум сконцентрировал внимание исследователей на сравнительно небольшом числе технических решений, хотя и обладающих высокой эффективностью отбора волновой энергии, но оказавшихся материалоэкономными. При существующих в мире методах оценки экономической эффективности объектов энергетики, когда не учитываются экономические последствия отрицательного экологического влияния традиционной энергетики (тепловое загрязнение среды, отчуждение земель под карьеры, шахты, пороодо- и золоотвалы, кислотные дожди, пылевое и радиационное загрязнение и т.п.), исследованные технические решения не смогли дать конкурентоспособной энергии.

Таким образом, в настоящее время в волноэнергетике на первое место выдвигается проблема снижения стоимости волновой энергии до конкурентоспособного уровня.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Общепризнано, что дальнейшее развитие энергетики на традиционной основе приближается к такому предельному уровню, за которым могут последовать значительные негативные экологические последствия. Вместе с тем, экономическая деятельность современного общества сложилась в условиях сравнительно низкой стоимости энергии и значительное ее повышение могло бы привести к непредсказуемым последствиям не только в экономике, но и во всем жизненном укладе общества. Поэтому среди вариантов: дорогая экологически чистая энергетика или дешевая традиционная с постепенными экологическими изменениями – предпочтение отдается последнему. Таким образом, снижение стоимости возобновляемой энергии представляется чрезвычайно актуальной общечеловеческой проблемой.

В СССР актуальность проблемы определяется также значительным удельным весом регионов с выходом к морю и испытывающих дефицит топливно-энергетических ресурсов. В этих условиях стоимостные ха-

рактеристики энергии влияют на размещение производительных сил, что, в свою очередь, сказывается на темпах и комплексности освоения регионов.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

При сохранении достигнутых высоких значений эффективности отбора волновой энергии проблема снижения стоимости энергии одно-значно переходит в проблему снижения материалоэкономности конструкций волноэнергетических станций. Разрабатываемая за рубежом техника в основном уже оптимизирована, поэтому решение проблемы снижения материалоэкономности возможно лишь на путях создания качественно иных систем. В связи с этим настоящая работа ставит перед собой основной целью формирование нового научного направления, заключающегося в создании научной базы построения материалоэкономных технических систем волновой энергетики.

Для отечественной волноэнергетической науки в число основных выдвигается также проблема методологии исследований и создания собственной научной базы, в связи с чем целью настоящей работы одновременно является также и решение этой проблемы.

Для достижения поставленных целей необходимо решение задач системного анализа физического процесса движения, отбора и преобразования энергии; обобщения и систематизации многочисленных исследований по волноэнергетике; установления закономерностей развития технических систем волновой энергетики; формирования подхода к материалоэкономному проектированию устройств; разработки методологии исследования конкретных устройств, а также формирования концепции развития волновой энергетики и возможных направлений комплексного применения ее технических систем.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Выполненная работа отличается существенной новизной. Так, впервые поставлена и решена проблема научного подхода к синтезу материалоэкономных решений технических систем волновой энергетики на основе анализа лучших технических решений из патентного фонда и учета соответствия их законам развития технических систем. Впервые достаточно полно сформулирована концепция комплексного использования волноэнергетических систем в интересах разли-

чных отраслей народного хозяйства. Кроме того, в ходе решения перечисленных задач автором получены новые результаты, из которых на защиту выносятся следующие:

- анализ мгновенного потока энергии волны и следующие из него выводы относительно отбора энергии и расположения рабочих органов;
- спектральный подход к оценке волноэнергетических ресурсов Мирового океана, понятие возобновляемой энергии волнения, волноэнергетические ресурсы по зонам океанов и морям;
- анализ и разработка принципов отбора волновой энергии и стабилизации волноэнергетических станций;
- классификация, анализ развития технических систем волновой энергетики, формулирование основных требований к ним и их технико-экономический анализ;
- постановка задачи гидроупругости для колебаний разномодульного тела на поверхности жидкости;
- инженерный подход к математическому моделированию одного из устройств - гидропарусной волноэнергетической станции, принципы физического моделирования и получения эмпирических результатов, частотный анализ и пути оптимизации основных параметров устройства;
- организационные и методологические вопросы исследований в волноэнергетике.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для получения результатов в работе использованы методы математического анализа океанологических характеристик и математических моделей, экспериментальные методы для проверки правильности полученных технических решений и определения некоторых эмпирических величин, методы патентного и сравнительного анализа при оценке развития технических систем волновой энергетики, эвристические методы и методы активизации мышления на основе теории решения изобретательских задач при синтезе новых технических решений.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ

Основное практическое значение выполненного исследования состоит в создании платформы, позволяющей концентрировать усилия по поиску эффективных технических решений в русле законов развития технических систем, а также исследовать любые решения. В связи с

этим работа предназначена разработчикам и исследователям волноэнергетической техники. Результаты работы в виде новых технических решений используются в разработках для нужд рыбной отрасли Дальнего Востока компрессорных устройств, обеспечивающих работу звуковых имитаторов в залавливающих устройствах; для разработки энергообеспечения средств механизации плантаций марикультуры в хозяйствах юга Приморья. В ближайшей перспективе возможно использование результатов для создания искусственного морского швеллера в системе рыбоводства, для разработки энергоснабжения шельфовых буровых платформ, для энергообеспечения судов по добыче и переработке глубоководных полезных ископаемых в комплексном проекте "Гидрометалл".

Результаты работы вошли в несколько отчетов по НИР, а также в две монографии.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты работы представлены на I и II Всесоюзных конференциях по энергетике океана, Владивосток, 1983 и 1985 г.г., на IV Всесоюзной конференции "Проблемы научных исследований в области изучения и освоения Мирового океана", Владивосток, 1983 г., на Всесоюзной конференции по экономике освоения океана, Владивосток, 1985 г., на IV Всесоюзной конференции "Технические средства изучения и освоения океана", Ленинград, 1985 г., на Всесоюзном постоянно действующем семинаре по проблемам возобновляемой энергетики, Москва, ЭНИН им. Г.М.Кржижановского, 1986 г., на III съезде советских океанологов, Ленинград, 1987 г., на семинарах лаборатории энергетики океана ИПМТ ДВО АН СССР - регулярно.

ПУБЛИКАЦИИ

По исследуемой проблеме подготовлена 31 работа, в том числе 7 рукописей, 5 депонированных статей, 19 печатных работ, среди них 10 статей в региональных изданиях, 1 в центральном, 1 монография регионального издания, 1 центрального, получено 6 авторских свидетельств.

СОСТАВ И ОБЪЕМ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех частей, содержащих

10 глав, заключения, списка литературы. Объем основной части 261 стр., включающая 22 таблицы, и 47 рис. на 33 листах. Список литературы насчитывает 201 наименование.

СО Д Е Р Ж А Н И Е Р А Б О Т Ы

Во введении дана ретроспектива развития исследований по океанской и, в частности, волновой энергетике, сформулированы и обоснованы актуальность проблемы, цели, задачи и основные положения, выносимые на защиту.

Первая часть посвящена оценке энергетических характеристик волнения.

В первой главе рассмотрены свойства и характеристики регулярных волн и пространственное распределение энергии волн в виде плотности ее мгновенного потока, определенного как работа, совершаемая волной в единицу времени в единичном объеме.

Проведенный анализ мгновенного потока энергии имеет непосредственный выход на разработку волноэнергетических станций (ВЭС).

Поскольку вектор потока энергии вращается с течением времени (фазы волны), энергия может быть изъята в любой фазе волны. Плотность мгновенного потока энергии больше среднего за период, причем, в направлении распространения волны больше, чем в обратном. Волновое течение незначительно изменяет мгновенный, но в несколько раз увеличивает средний за период поток энергии. Плотность потока энергии экспоненциально убывает с глубиной. Для наиболее полного отбора энергии необходимо обеспечить взаимодействие рабочих органов ВЭС с жидкостью по всему слою переноса энергии.

Во второй главе рассмотрены энергетические ресурсы волнения Мирового океана. Приведены подходы Н.Н.Паникера и Г.В.Матушевского к описанию энергетических характеристик реального поверхностного волнения, базирующиеся на статистической теории. В рамках спектральной теории волнения также существует два подхода к определению потока волновой энергии. Мак-Кормик и Гленденнинг высоту волны представляют через волновой спектр. Последующее интегрирование позволяет рассчитать среднее значение энергии, приходящейся на единицу площади поверхности волны.

Другой подход, развитый в работах Б.Г.Галенина, В.И.Сичкарева, Л.Н.Резниковой и др., основан на использовании выражения об-

щего потока энергии волнения по всем частотам и направлениям

$$\Phi_0 = \frac{1}{2} \rho g^2 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{1}{\omega} S(\omega, \theta) d\theta d\omega. \quad (I.1)$$

В этом выражении $S(\omega, \theta)$ — двумерный энергетический спектр волнения, ω и θ — частота и направление распространения элементарной волны. Выражение показывает, что значимость оценки потока энергии полностью зависит от вида спектра и от адекватности его всем стадиям развития волнения. В настоящее время имеется множество выражений частотных спектров, соответствующих определенным стадиям и условиям развития волнения. Наиболее полно различные возрастные стадии волнения охватывает спектр, предложенный И.Н.Давиданом, Л.И.Лопатухиным, В.А.Рожковым и др. Интегрирование (I.1) со спектром Давидана дает поток энергии в виде

$$\Phi_0 = \frac{1}{2} \rho g^2 \left[0,885 \frac{m_0}{\omega_m} \exp\left(1,2 \left(\frac{\omega_m}{\omega_n}\right)^5\right) Q\left(2,4 \left(\frac{\omega_m}{\omega_n}\right)^5 \mid 2,4\right) + 0,156 \frac{m_0}{\omega_n} \left(\frac{\omega_m}{\omega_n}\right)^5 \left(\exp\left(0,455 \left(\frac{\omega_m}{\omega_n}\right)^5\right) + 1,846\right) + \frac{0,093}{\omega_n^5} \right], \quad (I.2)$$

где ω_n , ω_p , ω_m , m_0 — функции средней высоты и частоты волн; $Q(x^2 \mid \nu)$ — дополнительный интеграл вероятностей χ^2 -распределения. Вычисления потока энергии по этому выражению со средними параметрами высоты и периода волн представлены на рис. I.

Для определения режимных энергетических характеристик акваторий морей и океанов используются справочные сведения по режимно-климатическим параметрам волн, основу которых составляют попутные визуальные судовые наблюдения. Эти сведения обычно приводятся в виде повторяемости p_{ij} волн с параметрами h_i и ω_j по различным сезонам для каждого района. В этом случае режимный поток энергии волн можно представить в виде

$$\Phi = \frac{1}{2} \rho g^2 \sum_{i,j} p_{ij} \int_0^\infty \frac{1}{\omega} S(\omega) d\omega = \sum_{i,j} p_{ij} \Phi_0(h_i, \omega_j). \quad (I.3)$$

Вычисленные значения режимного потока волновой энергии по бассейнам Мирового океана представлены на карте рис. 2.

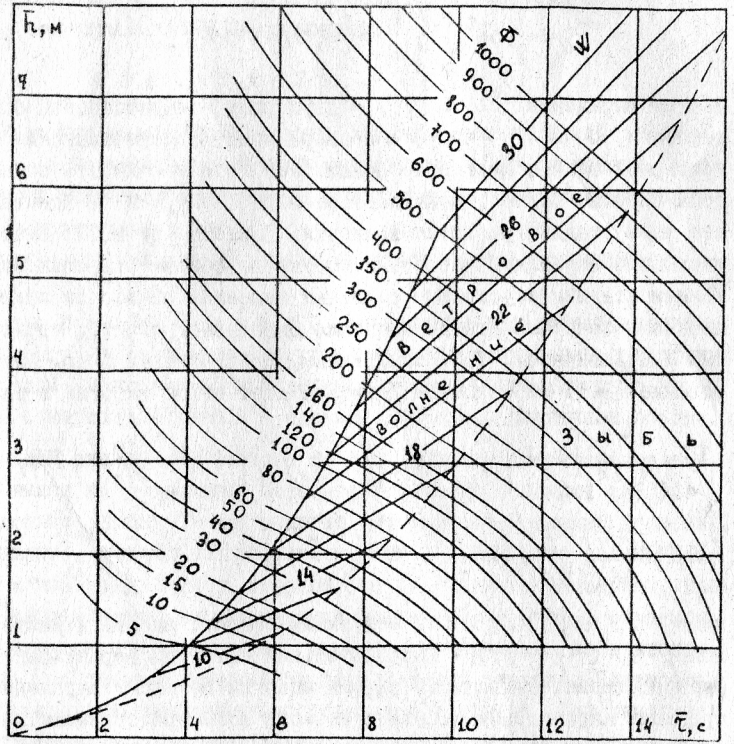
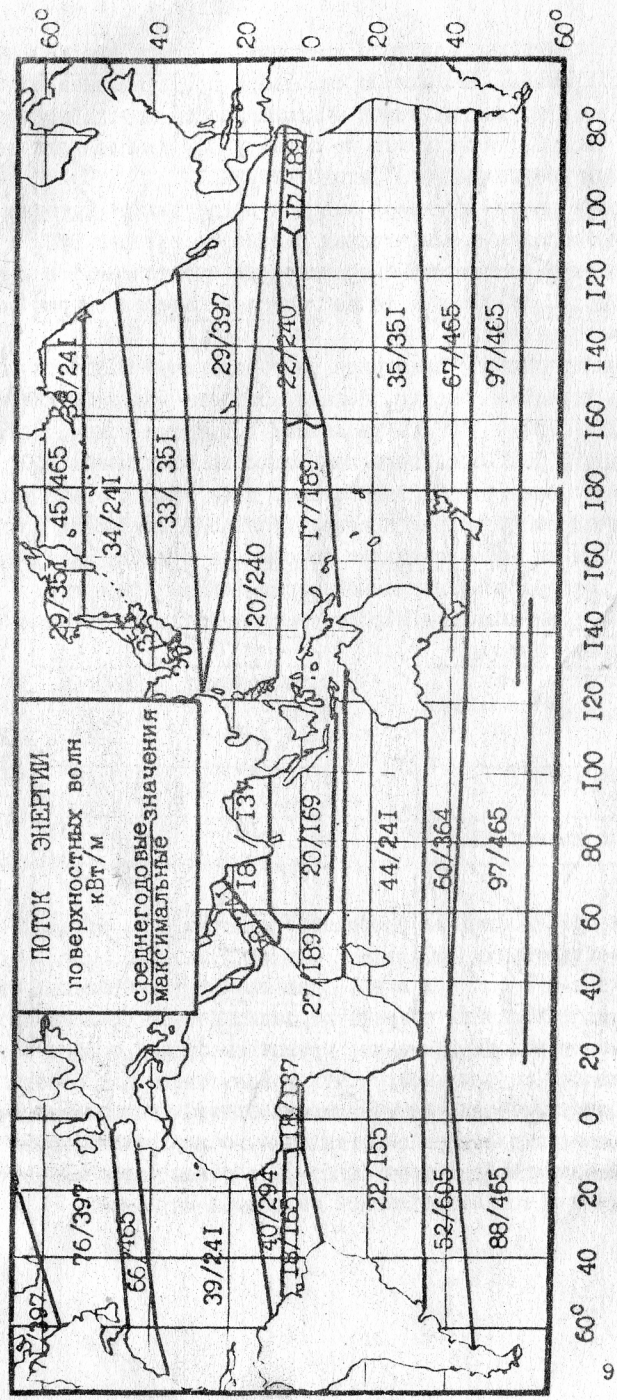


Рис. 1. Поток энергии волн по спектру Давидана со статистическими характеристиками ветрового волнения в зависимости от скорости ветра.

Рис. 2.



Важной особенностью морского волнения является его неравномерность во времени. Достаточно детальное представление об изменчивости дают кривые режимной обеспеченности потока волновой энергии на рис. 3, вычисленные по спектру Ю.М.Крылова для некоторых районов умеренной зоны Тихого океана.

Выполненные оценки волновой энергии представляют интерес для определения наиболее перспективных районов установки ВЭС, а также для оценки достижимых энергетических результатов в районе установки ВЭС. С их помощью также вычислены энергоресурсы волнения Мирового океана.

Представляет интерес сравнение возобновляемой мощности волнения с его полной мощностью. Полная мощность волнения для морей омывающих берега СССР, вычислялась Г.В.Матушевским. Сравнение показывает, что возобновляемая мощность составляет 0,02 - 0,04 % полной мощности. Следовательно, даже полный отбор возобновляемой мощности приводит к незначительному изменению полной мощности волнения, что позволяет говорить и о малом экологическом влиянии отбора возобновляемой части волновой энергии.

Оценки энергии волнения Мирового океана разными методами получали и другие авторы:

	Мощность, Вт	Энергия, Дж
Паникер (полная)	$9 \cdot 10^{16}$	$2,8 \cdot 10^{24}$
Хафнер	$10^{14} - 10^{16}$	$3 \cdot 10^{21} - 3 \cdot 10^{23}$
Сичкарев (по ветру)	$8,6 \cdot 10^{14}$	$2,7 \cdot 10^{22}$
Р.Торнквист	$5 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{21}$
Сичкарев (по потоку энергии)	$2,6 \cdot 10^{13}$	$0,8 \cdot 10^{21}$
Холланд	$3 \cdot 10^{12}$	$0,8 \cdot 10^{20}$

Вторая часть посвящена разработке подхода к материалосберегающему проектированию ВЭС.

В третьей главе анализируются принципы отбора энергии волн. В волнении существуют зависящие от времени процессы изменения скорости, давления, уровня свободной поверхности и угла ее наклона, которые могут быть использованы для отбора механической энергии волн. Общий принцип отбора энергии заключается в преобразовании потока энергии волн во внутренний поток энергии устройства, которое пропускает этот поток через генератор, вырабатывающий поток потребляемой энергии.

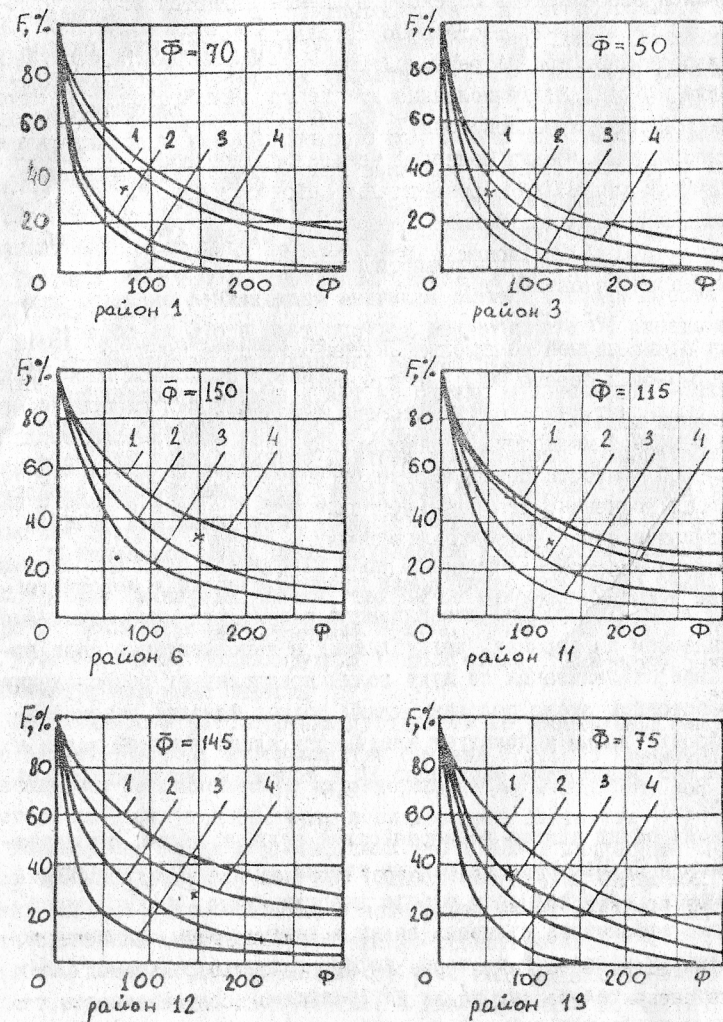


Рис. 3. Режимная обеспеченность потока волновой энергии по районам Тихого океана. 1 - январь-март, 2 - апрель-июнь, 3 - июль-сентябрь, 4 - октябрь-декабрь.

На рабочий орган со стороны жидкости действуют массовые (силы веса и инерционные) и поверхностные (силы трения и нормального давления) силы. При небольшом волнении, когда малы скорости волновых движений, предпочтительно использовать гидростатические силы плавучести, силы трения, силы веса и инерционные силы прямолинейного движения. При больших высотах и значительных волновых скоростях большее значение приобретают гидродинамические силы и инерционные силы криволинейного движения. Поверхностное горизонтальное расположение рабочего органа (РО) выгоднее заменять расположением пространственным.

Для отбора энергии помимо величины силы важное значение имеет перемещение РО относительно другого тела этого же объекта, для чего необходимо осуществление специального технического мероприятия — стабилизации одного из тел в земном пространстве. Стабилизация может быть внешней и внутренней. Внешняя стабилизация осуществляется якорной или жесткой связью с дном или берегом. Внутренняя стабилизация использует пространственные свойства волнения и может быть колебательной, тормозящей или фазовой. Колебательная стабилизация использует сдвиг фазы колебаний РО относительно среды или заглубление преобразователя в невозмущенные слои воды. Тормозящая стабилизация использует присоединенные массы жидкости на экранах, заглубляемых в невозмущенные слои воды. Фазовая стабилизация по лучу волны предполагает расположение РО на расстоянии около половины длины волны. Фазовая стабилизация по фронту волны использует конечность длины гребней волны и предполагает размещение множества РО в точках с различной фазой колебаний.

Приведен общий анализ взаимодействия волны с телом, выполненный К.Мэем и Дж.Ньюменом на основе теории волн малой амплитуды. Для повышения эффективности отбора энергии нужно, чтобы устройство могло эффективно излучать волны в направлении, противоположном падающим волнам, т.е. тело, хорошо излучающее волны, будет одновременно и телом, хорошо их поглощающим.

В четвертой главе рассмотрены конструкции волновых энергетических станций. Дан обзор существующих классификаций ВЭС, предложены принцип разделения функций в ВЭС и их классификация.

В большинстве конструкций ВЭС функции взаимодействия с волной, обеспечивающие передачу энергии от волны к РО, и функции вторичного преобразования энергии к удобному для потребления виду каким-либо образом разделены. Это разделение функций дает основание для условного разделения конструкции ВЭС соответственно на первый и второй контуры. Концентрация энергии становится возможной также и при передаче ее от первого контура ко второму. Способность станции концентрировать энергию на вторичных преобразователях определяет ее совершенство и эффективность.

Главным объектом рассмотрения настоящей работы является первый контур ВЭС.

В основу классификации первого контура положены характер используемого волнового процесса и метод стабилизации ВЭС. Предлагаемая система классификации представлена на рис. 4.

Далее рассмотрены устройство, принцип действия и характеристики некоторых из исследованных в мире конструкций ВЭС: буй Бундала и Фолнса и их система из множества буйев (Норвежский проект), японская станция "Каймей", плотины с сужающимся каналом, "бристольский" цилиндр, контурный плот Кокерелла, мягкооболочечная конструкция Сичкарева, Шпака, подводное устройство фирмы "Виккерс", "ланкастерская" оболочка Френча, "утка" Солтера и система уток Масубичи, осциллирующий водный столб, "дем-атолл" Верта, несимметричный клин Паркса.

Эффективность рассмотренных устройств на резонансных частотах составляет 70–98 %, в большинстве случаев с хорошо выраженным максимумом. Широкополосную характеристику эффективности имеет система из двух уток Солтера, исследованная Масубичи.

Рассмотрены также гидропарусная ВЭС (ГПВЭС) Сичкарева, Ленкова и объемно-деформируемая ВЭС (ОДВЭС) Сичкарева, Сибекина, Ленкова, которые разработаны на основе развиваемых в настоящей работе принципов материалосберегающего проектирования.

ГПВЭС имеет корпус и систему из трех гидропарусов. Нижний обладает отрицательной плавучестью, а два верхних — положительной. Функцию нижнего гидропаруса выполняет корпус, который установлен в вертикальной плоскости. Верхние шарнирно закреплены на корпусе и располагаются под углом к поверхности воды в погруженном состоянии. При воздействии волны на верхнем и нижнем гидропарусах возникают гидродинамические моменты разного знака, в

Рис. 1. Классификация ВЭС.

ВОЛ- НОВОЙ ПРО- ЦЕСС	СТАБИЛИЗАЦИЯ				ВНУТРЕННЯЯ				ТОРМО- ЗЯЩАЯ
	ВНЕШНЯЯ		КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ		РАЗОВАЯ		ПО ФРОНТУ ВОЛНЫ ПО АЧУ ВОЛНЫ	И МАССА	
	ЯДРНАЯ	АДННАЯ: С ИНЕР- ЦИОН. СОСРЖ. КОЛБАДА. ФУНК.	С БЕРЕГОВЫМ СОСРЖЕНИЕМ И СМОВА	ЗАГЛУБЛЕНИЕ РАБОЧЕГО ОРГАНА ПО ФУТОНУ	САВИГ ФАЗЫ: ВСТРЕЧ. ДВИЖ. ПО НА ВООБЩЕ	В МАССЕ			
$\delta(t)$									
$\Delta\delta(\Delta x)$									
$v(t)$									
$\Delta v(\Delta x)$									
$\alpha(t)$									
$\Delta\alpha(\Delta x)$									
$P_c(t)$									
$\Delta P_c(\Delta x)$									
$P(t)$									
$\Delta P(\Delta x)$									

результате чего верхние гидропаруса приходят в колебательное вращение относительно корпуса. Энергия колебаний гидропарусов используется для преобразования в потребляемую. Устройство устанавливается параллельно фронту волны.

ОДВЭС имеет вертикально-протяженный корпус, по бортам которого расположены камеры, огражденные мягкооболочечными РО. Камеры сообщаются с компенсатором объема, выполняющим функцию концентратора энергии. Последний соединен с нагрузочным элементом. Объем воздуха, заключенный в камеры и концентратор, в процессе работы не изменяется. Для уменьшения количества балласта в корпусе и снижения в камерах уровня исходного избыточного давления воздуха, в них может быть залита вода вплоть до уровня свободной поверхности воды в море. Устройство устанавливается вдоль фронта волны и требует стабилизации корпуса. Функциональная схема различных вариантов преобразования энергии в устройстве представлена на рис. 5.

Принципиальное отличие ОДВЭС от предыдущего варианта состоит в использовании мягкой оболочки в качестве РО. Выход на преимущества использования мягких оболочек диктуется выполненным ниже анализом технических противоречий. Кроме того, мягкая оболочка дает возможность объединить в себе функции РО, компенсатора объема и концентратора нагрузки на устройства отбора мощности. Основное же преимущество мягкооболочечного РО в свете решаемой проблемы состоит в возможности выхода на качественно новый уровень по снижению материалоемкости БЭС. Например, для идентичных внешних волновых условий материалоемкость мягкооболочечного РО ОДВЭС в 1500-2000 раз меньше материалоемкости крыла ГПВЭС.

Рассмотрены особенности конструкций второго контура ВЭС.

В пятой главе анализируется развитие технических систем (ТС) волновой энергетики. Выявлены и формализованы основные технические противоречия: противоречие, возникающее между материалоемкостью ВЭС и низкой плотностью потока энергии (ТН-1); противоречие, возникающее из-за необходимости заглубления РО для более полного отбора волновой энергии при нелинейном распределении потока энергии и адекватностью реакции рабочего органа (ТН-2); противоречие между увеличением скорости РО и снижением надежности, эффективности, возрастанием материалоемкости устройств (ТН-3).

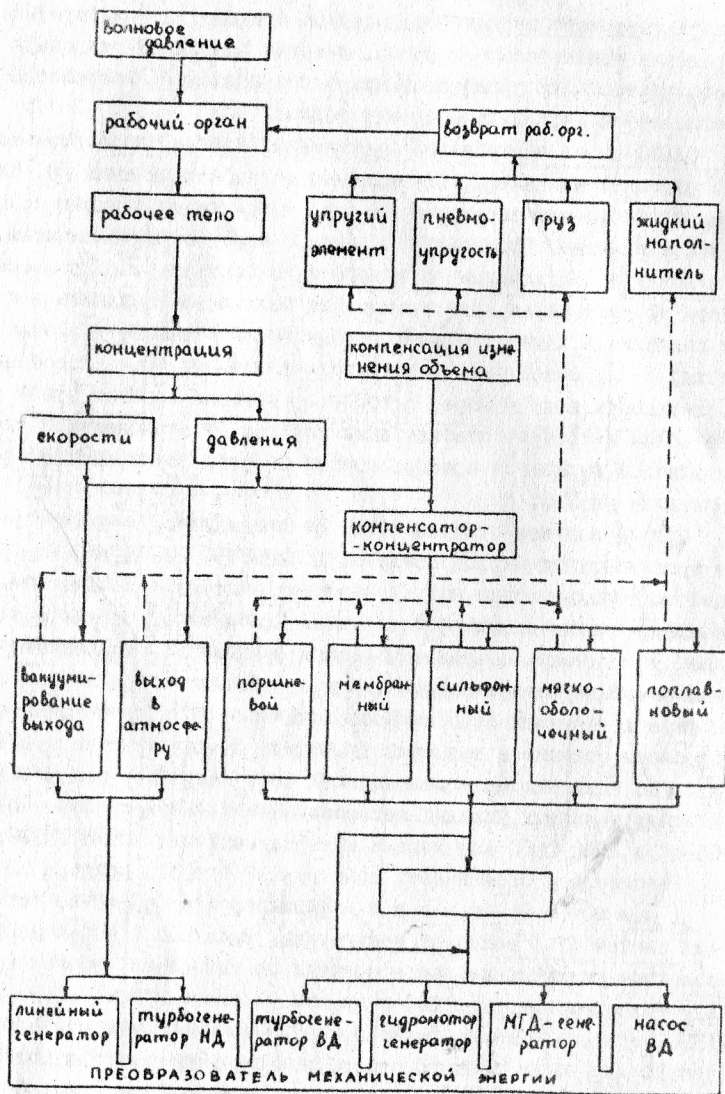


Рис. 5. Схема преобразования волновой энергии в объемно-деформируемой ВЭС.

В теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) разработаны типовые приемы устранения технических противоречий. Противоречия типа ТП-I-3 решаются повышением числа мод движений; использованием надувных, наливных частей, воздушной подушки, гибких оболочек и тонких пленок, изменением агрегатного состояния объекта.

Таким образом, типовые приемы разрешения технических противоречий выводят на использование мягких оболочек с объемной передачей.

Более глубокие и далеко идущие выводы дает анализ направлений развития волноэнергетики на основе законов развития технических систем (ЗРТС), также установленных в ТРИЗе.

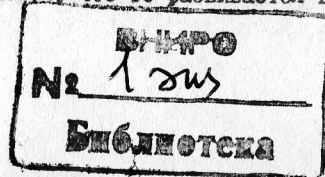
Необходимо отметить, что эти законы в настоящее время не являются общепризнанными. Оспаривается даже само существование каких-либо объективных законов в такой сугубо субъективной деятельности, как развитие техники. Однако, с философских позиций понятно, что техника является важным звеном диалектической взаимосвязи знания и практики, и ее развитие настолько же закономерно, как закономерно восхождение сознания от отражения действительности к ее преобразованию. Признавая факт закономерного развития техники, следующим шагом должно быть и признание познаваемости законов ее развития.

Установленные в ТРИЗе ЗРТС являются статистическими и проверены на многих технических системах (ТС).

Опираясь на патентный фонд технических решений в волноэнергетике, в диссертации проанализировано развитие ее ТС. Соответствующие выводы положены в основу требований к первому контуру ВЭС, изложенные далее в табл. I.

Первая группа законов устанавливает необходимые условия жизнеспособности ТС: наличие и работоспособность основных частей системы - источника энергии или движения, РО, устройств преобразования и передачи энергии, средств управления; сквозной проход энергии через систему; согласование периодичности действий всех частей системы. Этим законам удовлетворяют требования п. 5, 6, 12 табл. I.

Вторая группа законов характеризует направление развития ТС. Утверждается, что ТС развивается в направлении увеличения степе-



ни идеальности (система идеальна, если ее нет, а ее функция осуществляется). Ему отвечают требования п. 2-4, 6-8, 10, 11, 13, 14 табл. I. Этому закону соответствуют предложения о комплексном использовании ВЭС для целей энергетики, защиты побережья, маринкультуры и др.

Ко второй группе относится также закон перехода ТС в надсистему. Развитие ТС возможно до определенного предела, за которым она включается в надсистему в качестве одной из ее частей. Надсистема может создаваться из однородных элементов, из конкурирующих или из антагонистических систем.

Создание надсистемы из однородных элементов преследует две цели. Первая состоит в обеспечении поперечно-фазовой стабилизации, что позволяет достичь существенного снижения нагрузки на якорную систему, а, значит, и ее материалоемкости. Вторая - сгладить импульсный характер выдаваемой каждым элементом энергии благодаря суммированию импульсов в надсистеме.

Объединение в надсистему конкурирующих систем рассматривается как возможность решения проблемы режимной нестационарности волнения. Имеются различные варианты такой надсистемы: включение в объединенную энергосистему страны (ВЭС близ г. Берген, Норвегия), включение в региональную энергосистему одного из островов (проект Великобритании), комплектация автономных ВЭС дополняющими дизельными электростанциями (предложение Японии).

Создание надсистемы из антагонистических систем с противоположными функциями рассматривается как одно из самых перспективных направлений в волноэнергетике. В этом случае объединяются ВЭС и специализированный потребитель энергии, который в достаточной степени приспособлен как к внутрипериодной, так и к режимной нестационарности выдаваемой энергии.

Третья группа законов характеризует внутреннюю тенденцию развития современных ТС. Современные ТС развиваются в направлении повышения динамичности и увеличения количества управляемых связей. В табл. I этому закону соответствуют требования п. 3, 5 (г, д, ж), 9. К этому закону относятся искусственное регулирование сдвига фаз колебаний РО для оптимизации отбора энергии (Будал, Фоллис), регулирование параметров нагрузки для оптимизации отбора энергии. Этому же закону соответствует применение в качестве РС мягкооболочечных конструкций.

Еще один закон этой группы: развитие современных ТС идет в направлении перехода от РО, выполненных на макроуровне, к РО на микроуровне (системам, использующим физические эффекты, связанные со свойствами и строением материи). Действие этого закона в волноэнергетике: переход от плотов Кокерелла к осциллирующим волным столбам, от гидросистем к МГД-генераторам, к пьезопреобразователям, протонно-проводимым мембранам.

Рассмотренные законы развития ТС и анализ их действия в волноэнергетике позволяет поднять процесс ее совершенствования на качественно новый уровень, соответствующий осознанному пониманию происходящих в ней процессов развития.

Проведенный анализ положен в основу требований к ВЭС, представленных в табл. I, и способов их выполнения.

Таблица I
Основные требования к ВЭС и способы их реализации

№	Требование	Способ выполнения
1	2	3
1	Приспособленность к работе по фронту волны	Обеспечение внешней или внутренней стабилизации кроме фазовой по лучу волны
2	Отбор энергии по всему слою ее переноса	Заглубление РО
3	Адекватность реакции РО нелинейному изменению потока энергии по глубине	а) Установка множества независимых РО по глубине; б) установка мягкооболочечного РО с объемной передачей; в) импедансно-согласованная форма подводной части РО
4	Суммарное использование кинетической и потенциальной энергии	а) Раздельное использование каждого вида энергии; б) превращение кинетической энергии в потенциальную наклоном РО; в) превращение потенциальной энергии в кинетическую созданием потока
5	Обеспечение эффективной стабилизации	а) Постановка на якорные системы; б) связь с грунтом донными опорами; в) связь с бе-

I	2	3
	ции конструкции	регом; г) фазовая по лучу волны; д) фазовая по фронту волны; е) демпфирование перемещений объекта заглублением в невозмущенные слои выносных экранов; ж) вертикальные колебания объекта со сдвигом к фазе волны; з) заглубление колеблющейся части объекта в невозмущенные слои
6	Создание эффективного внутреннего потока энергии	а) Установка преобразователя между стабилизированным телом и РО; б) установка преобразователя между РО, разнесенными по лучу волны; в) установка преобразователя между РО со взаимно-встречным перемещением
7	Предотвращение отражения набегающей волны	а) Малое отличие коллинеарных скоростей жидкости и РО; б) применение РО с направлением скорости, перпендикулярным скорости жидкости; в) применение РО с малым углом расположения относительно скорости жидкости; г) импедансно-согласованная форма подводной части РО
8	Предотвращение генерации вторичной волны на выходе ВЭС	а) Шлюзование: деление рабочей зоны РО на отсеки с меньшим перепадом параметров; б) движение РО перпендикулярно скорости жидкости; в) движение тыловой поверхности РО по касательной к тыловой поверхности; г) стабилизация тыловой поверхности РО
9	Обеспечение широкополосности спектра отбора волновой энергии	а) Настройка сопротивления, массы, формы или момента инерции РО на доминирующую частоту спектра волнения; б) настройка множества независимых РО с индивидуальной настройкой спектра отбора энергии на узкий участок спектра волнения; в) установка жесткого малоинерционного РО (например, мягкооболочечного) с широкой полосой спектра отбора энергии

I	2	3
10	Концентрация волновой энергии на вторичных преобразователях	а) Применение внешних концентраторов волнения; б) интерференционное фокусирование волнения; в) применение внутренних концентраторов в объемной передаче, в том числе в сочетании с мембранными, мягкооболочечными РО
11	Снижение потерь энергии при ее вторичных преобразованиях	а) Концентрация волновой энергии на вторичные преобразователи; б) обеспечение больших перемещений РО; в) повышение энергетических параметров рабочего тела во вторичных преобразователях
12	Обеспечение штормовой живучести	а) Свободное пропускание опасных волн; б) погружение ВЭС под поверхность воды
13	Обеспечение минимальной материалоемкости	а) Выбор наиболее эффективных схем ВЭС; б) рациональное конструирование; в) применение высокопрочных, износостойких, коррозионно-устойчивых материалов
14	Использование энергии волнового течения	Применение РО кругового вращения

Из приведенных способов осуществления основных требований составлена следующая таблица приоритетов с нумерацией из табл. I:

№	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Способ	все	все	Л	Л	д,ж	в	б,в	б,в	б,в	в	все	а	все	все

где Л - любой способ.

Применение ЗРТС, основных требований к ВЭС и предпочтительных способов их реализации к задаче создания новых, материалосберегающих конструкций позволило автору совместно со Шпаком А.С., Ленковым А.И., Сибкиным В.М. получить ряд новых решений, практически полностью перекрывающих весь выявленный диапазон возможных применений волноэнергетических систем в народном хозяйстве. Часть полученных решений представлена в классификационной

таблице и описана выше.

С использованием таблицы приоритетов проанализированы известные конструкции, по которым имеются данные о стоимости полученной энергии. Выявлена связь между числом удовлетворенных требований и относительной стоимостью энергии.

Анализ новых предложенных технических решений по таблице приоритетов показывает, что они находятся в ряду лучших из известных в мире.

Проведенный эксергетический анализ проекта ГПВЭС показал, что в специфических условиях прибрежных потребителей его энергия конкурентоспособна с энергией традиционных тепловых станций. Поскольку материалоемкость мягкооболочечных устройств ниже материалоемкости ГПВЭС, можно прогнозировать, что их экономические показатели будут не хуже, чем ГПВЭС и, таким образом, полученные технические решения ведут к цели, поставленной перед настоящей работой.

В третьей части разрабатывается методология инженерного исследования конкретных ВЭС.

Шестая глава посвящена постановке гидродинамической задачи о колебаниях мягкооболочечной ВЭС на поверхности жидкости. Особенностью задачи является учет плавучести и упругости тела ВЭС, представленного в виде гибкого стержня переменной по длине упругости с анизотропными свойствами при изгибах разных знаков, а также учет демпфирования колебаний.

В седьмой главе разрабатываются основы инженерной теории ГПВЭС. Задача гидроупругости ГПВЭС заменена задачей вычисления главной части возмущающего момента гидродинамических сил (без учета дифракционной составляющей) на верхнем и нижнем крыльях ГПВЭС. Фазовый сдвиг моментов верхнего и нижнего крыльев близок к 90° , но главный момент всей системы не равен нулю, что обуславливает появление бортовой качки всего устройства. Показано, что невозможно создание единой нерегулируемой конструкции ГПВЭС на любое волнение, поэтому эффективность ГПВЭС будет определяться ее соответствием параметрам волнения и возможностью настройки на эти параметры.

Разработана математическая модель крыла ГПВЭС, путем согласования импедансов определены характеристики моментов инерции кры-

льев и вязкого демпфирования отборника энергии.

В восьмой главе разрабатывается методология экспериментальных исследований ГПВЭС, которые могут проводиться на регулярном волнении в бассейнах и на натурном волнении, на моделях и на натуральных установках. Существенно различается и подход к определению экспериментальных характеристик в том или ином случае. Для экспериментов на моделях необходимо выявление определяющих параметров и образование из них критериев подобия. Помимо геометрического и кинематического подобия для колеблющихся РО необходимо обеспечение подобия по массе, моменту инерции и числу Струхала. Число Струхала удобно представлять в виде

$$Sh = \frac{g\tau^2}{h} \quad (3.1)$$

Моделирование по числу Струхала накладывает определенные требования на параметры моделирующего волнения, связь с геометрией ВЭС которого определяется через высоту волны. Для ГПВЭС экспериментальному определению подлежат коэффициенты волнового момента c_m , якорных сил c_d , присоединенных масс m . В результате статистической обработки экспериментов на регулярном волнении перечисленные коэффициенты легко определяются по методу наименьших квадратов.

На нерегулярном волнении необходима спектральная обработка временных рядов, в результате которой определяются спектр волнения и ряд взаимных спектров, по которым находятся их амплитудные $|S(\omega)|$ и фазовые $\Phi(\omega)$ составляющие. После этого определяются амплитудно-частотные характеристики $|H(\omega)|$ соответствующих процессов, дающих искомые коэффициенты:

$$c_m = \frac{4|H(\omega)|_{hM_B} \sin(\omega t - \Phi_{hM_B}(\omega))}{\rho \omega L^2 h \omega^2} e^{2kH_0}$$

$$c_d = \frac{4|H(\omega)|_{hT_A} \sin(\omega t - \Phi_{hT_A}(\omega))}{\rho \omega L h \omega^2} e^{2kH_0}$$

$$M = \frac{|h''(\omega)|_{hM} \sin(\omega t - \Phi_{hM}(\omega))}{\mathcal{W} |h(\omega)|_{h\ddot{\theta}} \sin(\omega t - \Phi_{h\ddot{\theta}}(\omega))} - \frac{J_0}{\mathcal{W}}, \quad (3.2)$$

где индексы hM , hT , hM , $h\ddot{\theta}$ определяют соответствующие взаимные процессы.

В девятой главе проведены частотный анализ и оптимизация некоторых характеристик ГПВЭС на основе линеаризованной математической модели крыла. Исследуемым процессом для определения частотной характеристики крыла принят угол поворота крыла $\theta(t)$ под действием волнового момента M_B , а собственно частотная характеристика $H(\omega)$ определена как преобразование Фурье реакции системы $\theta(t)$ на воздействующую единичную импульсную функцию $M(t) = \delta(t)$. Линеаризованное уравнение колебаний крыла содержит свободный член, поэтому выражение частотной характеристики описывает реакцию устройства как на периодическое внешнее воздействие, так и на постоянно действующий момент, который обеспечивает начальный угол установки крыла θ_0 . В связи с этим частотная характеристика представлена в виде

$$H(\omega) = G(\omega) + \bar{\theta}_0(\omega), \quad (3.3)$$

где $G(\omega)$ — собственно частотная характеристика как реакция системы на периодическое внешнее возмущение, $\bar{\theta}_0(\omega)$ — преобразование Фурье реакции крыла на постоянный момент. Для удобства анализа частотную характеристику представляют в виде амплитудной (АЧХ — $|G(\omega)|$) и фазовой (ФЧХ — $\varphi(\omega)$) частотных характеристик. Вид АЧХ и ФЧХ крыла ГПВЭС представлен на рис. 6, 7.

Таким образом, если на вход системы поступает гармоническое колебание с частотой ω

$$M_B = M_0 \sin \omega t, \quad (3.4)$$

то процесс на выходе также будет гармоническим с частотой ω , а его выражение можно представить в виде

$$\theta(t) = |G(\omega)| M_0 \sin(\omega t - \varphi) + \theta_0, \quad (3.5)$$

т.е. амплитуда выходного процесса увеличивается в $|G(\omega)|$ раз по сравнению с входным процессом, а фаза выходного процесса из-

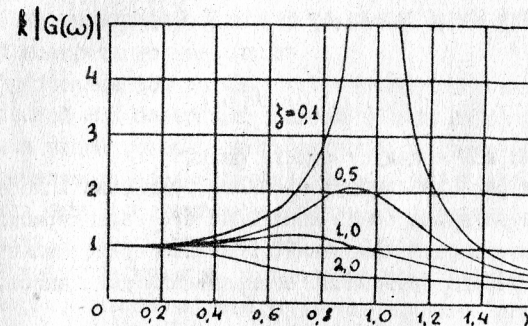


Рис. 6. Амплитудная частотная характеристика крыла ГПВЭС.

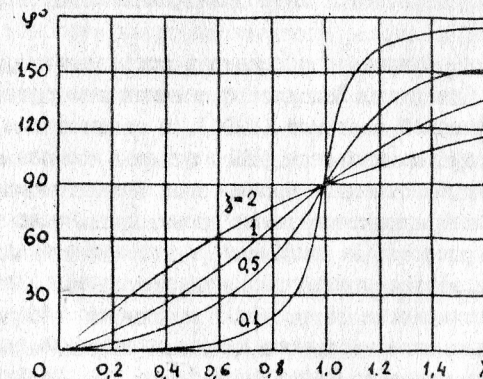


Рис. 7. Фазовая частотная характеристика крыла ГПВЭС.

меняется на φ . Средняя мощность крыла, при сохранении зависимости момента сопротивления крыла от угловой скорости на рабочем и свободном ходах,

$$\bar{N}(\omega) = \frac{1}{2} M_0^2 |G(\omega)| \omega \sin \varphi(\omega), \quad (3.6)$$

т.е. пропорциональна АЧХ и синусу сдвига фазы.

Полученное общее решение линеаризованного уравнения колебаний крыла позволяет оптимизировать некоторые его характеристики путем достижения резонансных колебаний. При этом представляется возможным частично учесть требования согласования импедансов.

Во всех главах третьей части рассматривается множество конкретных примеров по двум моделям ГПВЭС: ГПВЭС-2 шириной 2 м и ГПВЭС-15 шириной 8 м, на которых демонстрируется методика применения теоретических положений, оцениваются значения отдельных параметров, делаются выводы о возможном характере протекающих процессов.

В четвертой части излагается концепция развития волновой энергетики.

В настоящее время обширные прибрежные и островные территории бассейнов Тихого и Северного Ледовитого океанов не охвачены Единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС), в связи с чем традиционно сложившееся энергоснабжение этого региона оказывается весьма трудоемким и дорогостоящим. Кроме того, весьма значительным энергопотреблением характеризуется производственная деятельность на море, в частности, мореплавание, рыболовство, морская геологоразведка, шельфовая добыча полезных ископаемых. Значительной энергообеспеченности потребует в перспективе марикультура, рыбоводство, океаническая добыча полезных ископаемых. Все это вместе взятое приводит к следующим выводам.

Во-первых, энергетическая база дальнейшего развития ЕЭЭС для энергоснабжения перечисленных потребителей должна опираться на океанскую энергетику, причем, предпочтение должно быть отдано энергетике на возобновляемых источниках энергии. Во-вторых, учитывая протяженность региона, характер энергопотребления и подвижность морских потребителей, применительно к океанской энергетике следует пересмотреть концепцию централизации энергоснабжения.

Волновую энергетику рационально представить в виде двух крупных систем — прибрежной и морской, а также в виде отдельных станций конкретного назначения.

Прибрежные ВЭС должны быть объединены с береговыми ЭЭС. В объединенной ЭЭС береговые станции должны работать в режиме резерва (время ввода резерва прогнозируется достаточно точно и с заблаговременностью более суток). Модули ВЭС в прибрежных системах должны быть расставлены недалеко от берега на глубинах, где диссипация волновой энергии еще невелика.

В качестве примера рассмотрена перспектива энергоснабжения Приморья. Возобновляемая мощность волнения вдоль Приморского побережья Японского моря оценивается величиной порядка 17 млн. кВт. Наивысшая обеспеченность мощности приходится на зимние месяцы, когда нагрузка на энергетическое хозяйство оказывается наибольшей.

Морские ВЭС призваны решать энергетические задачи флотов, а в перспективе — и аккумуляции большого количества энергии для транспортировки на берег. Их размещение может быть продиктовано выбором наиболее энергонасыщенного района моря или океана, с безледовым режимом, в стороне от насыщенных морских путей. В морях должна быть развернута сеть морских автономных ВЭС достаточно большой мощности.

Таким образом, морские ВЭС должны рассматриваться как крупные центры энергетического и производственного назначения с относительно дешевой, хотя и не очень качественной электроэнергией, производящие энергоемкую продукцию и аккумулирующие энергию прежде всего для нужд океанического производства.

ВЭС малой мощности от 50 Вт до 50 кВт можно устанавливать для питания навигационных буев и автоматических станций длительного использования, для электроснабжения сезонных пунктов. Наиболее вероятные требования к таким станциям заключаются в обеспечении нужной мощности при самом слабом волнении, живучести в штормовых условиях, простоте и высокой надежности при необслуживаемой эксплуатации, удобстве транспортировке и простоте развертывания.

"Экономические ниши" применения ВЭС могут быть расширены за счет использования их неэнергетических свойств: волногашения, влияния на течения, апвеллинга.

В конце четвертой части рассмотрены актуальные задачи исследований ВЭС, среди которых задачи маркетинга, поиска новых физических принципов отбора и преобразования энергии, синтеза новых технических предложений ВЭС, исследования их гидродинамики и оптимизация, исследования пространственных характеристик волнения, разработки автоматизированных систем обработки экспериментальной информации и управления объектом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ состояния волноэнергетики выявил ее основные проблемы, выбранные для решения в настоящей работе:

— стоимость волновой энергии на исследуемых за рубежом волноэнергетических станциях значительно превышает среднюю стоимость энергии из традиционных источников. При этом основной вклад в стоимость энергии обеспечивает высокая материалоемкость конструкции; — для отечественной волноэнергетической науки важна проблема разработки методологии исследований конкретных устройств и создание на этой основе собственной научной базы путем обобщения методов и результатов таких сопредельных научных дисциплин, как океанология, гидродинамика, энергетика, теория корабля, теория оболочек, проектирование систем, экономика.

При решении первой проблемы получены следующие результаты.

1. Выполнен анализ мгновенного потока энергии волн, который позволил постулировать возможность изъятия энергии волны в любой ее фазе, необходимость достаточного заглубления рабочего органа, нелинейность распределения энергии по глубине.

2. Выявлены принципы отбора энергии волн, подчеркнута важность обеспечения стабилизации элементов волноэнергетических станций и выявлены способы ее обеспечения. Построена классификация и рассмотрены наиболее изученные волноэнергетические устройства, в качестве итоговой характеристики которых приведена эффективность отбора энергии, значение которой на резонансных частотах достигает 70–90 % и более.

3. Рассмотрено развитие технических систем волновой энергетики с позиций общих законов развития технических систем. Выявлены тенденции и направления развития волноэнергетики, которые соответствуют общим законам и, следовательно, актуальны в ближайшей пер-

спективе. Показана, в частности, необходимость дробления рабочего органа по глубине или переход к использованию мягких оболочек для наилучшего приспособления рабочего органа к нелинейности распределения энергии по глубине.

4. С использованием выявленных актуальных направлений развития волноэнергетики разработаны основные требования к волноэнергетическим установкам. Из анализа патентного фонда выявлены способы удовлетворения этих требований и расставлена их приоритетность. По полученным данным выполнена технотворческая работа, давшая несколько новых технических решений волноэнергетических установок, отличающихся благодаря использованию мягких оболочек малой материалоемкостью.

5. Проведено технико-экономическое сопоставление новых технических решений с лучшими из известных и с традиционными энергетическими объектами. Показано, что по эффективности новые технические решения находятся в одном ряду с лучшими из известных и конкурентоспособны с тепловыми станциями в специфических условиях прибрежного потребителя.

При решении второй проблемы получены следующие результаты.

1. Разработан и доведен до практического использования спектральный метод оценки потока энергии поверхностных волн, показана целесообразность введения понятия возобновляемой мощности волнения. На основе разработанного метода получены характеристики потока волновой энергии на Дальневосточных морях и зонах Мирового океана, а также возобновляемая мощность и годовая энергия волнения.

2. Разработаны основы инженерного исследования конкретных устройств с использованием методологии гидродинамики, теории упругости, теории корабля, физического и математического моделирования, спектрального и частотного анализа, принципов параметрической оптимизации. В качестве конкретного устройства использована гидропарусная волноэнергетическая станция; задача гидроупругости поставлена для односвязной мягкооболочечной волноэнергетической станции.

3. Предложена концепция развития малой и крупномасштабной волновой энергетики в прибрежном и морском вариантах. Намечены пути комплексного использования свойств волноэнергетики в интересах энергетики, марикультуры и флота.

Таким образом, общее значение выполненных в диссертации исследований состоит в следующем:

- обобщены выполненные в мире разработки волновых энергетических станций;
- сформирована методологическая база для исследования и разработки волноэнергетических станций и технических систем волновой энергетики;
- создано новое научное направление в гидроэнергетике и ее ветви - волноэнергетике, определяющее материалосберегающее конструирование отборников волновой энергии, что приближает решение важной народно-хозяйственной проблемы - практического вовлечения в энергетику страны возобновляемого экологически чистого источника энергии - энергии волн.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Сичкарев В.И. Волноэнергетические ресурсы и их использование // Методы преобразования энергии океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. С. 72-80.
2. Резникова Л.Н., Сичкарев В.И., Кукушкин И.В. Оценка энергетических запасов волнения Мирового океана // Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции "Проблемы научных исследований в области изучения и освоения Мирового океана": Гидрофизические поля океана и методы их исследования, ч. 2. Владивосток: МВССО, ДВНЦ АН СССР, 1983. С. 3-5.
3. Резникова Л.Н., Сичкарев В.И. Оценка потока волновой энергии бассейна Тихого океана // Использование энергии приливных и ветровых волн в океане. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 25-32.
4. Сичкарев В.И., Шпак А.С. Анализ и классификация технических средств преобразования волновой энергии // Использование энергии приливных и ветровых волн в океане. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 33-40.
5. Сичкарев В.И., Шпак А.С. Волновая насосная установка. А.с. И129405 от 15.08.84, опубли. 15.12.84. Бюл. № 46.
6. Сичкарев В.И. Исследование частотного режима модели ГПВЭС // Краткое содержание докладов 2 Всесоюзной конференции по энергетике океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985. С. 48-52.

7. Сичкарев В.И. Основы синтеза первого контура волновых энергетических станций // Системы преобразования энергии океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985, с. 39-59.
8. Сичкарев В.И. Состояние и перспективы волноэнергетики // Известия вузов. Энергетика. Минск, № 12, 1985. С. 3-9.
9. Сичкарев В.И. Техничко-экономический анализ совершенства конструкций волновых станций // Экономика освоения океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, вып. I, 1985. С. 71-74.
10. Сичкарев В.И., Ленков А.И. Анализ эффективности числа ступеней преобразования волновой энергии // Краткое содержание докладов 2 Всесоюзной конференции по энергетике океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985. С. 52-55.
11. Сичкарев В.И., Сибекин В.М., Ленков А.И. Волновая энергетическая установка. А.с. I310529 от 15.01.87, опубли. 15.05.87. Бюл. № 18.
12. Сичкарев В.И. Моделирование работы полупогружной реактивной волновой энергетической станции // Тезисы докладов V Всесоюзной конференции "Технические средства изучения и освоения океана", вып. I. Л.: ЛНЦ АН СССР, 1985. С. 104.
13. Сичкарев В.И., Резникова Л.Н. Волновая энергетическая установка. А.с. И164454 от 01.03.85, опубли. 30.06.85. Бюл. № 24.
14. Сичкарев В.И., Ленков А.И. Волновая энергетическая установка. А.с. I224437 от 15.12.85, опубли. 15.04.86. Бюл. № 14.
15. Сичкарев В.И. Моделирование нестационарной гидродинамики ВЭС и оценка гидродинамических коэффициентов // Эффективность систем преобразования энергии океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. С. 57-66.
16. Сичкарев В.И. Основы исследования и разработки волновых энергетических станций. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 145 с.
17. Сичкарев В.И., Сибекин В.М., Ленков А.И. Волновая энергетическая установка. А.с. I421892 от 08.05.88, опубли. 07.09.88. Бюл. № 33.
18. Сичкарев В.И. Импедансный способ определения характеристик гидропарусной ВЭС // Комплексное использование энергии океана. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 50-56.
19. Сичкарев В.И., Акуличев В.А. Волновые энергетические станции в океане. М.: Наука, 1989. 134 с.