

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И МЕТАЛЛУРГИИ

**С. Д. Чижумов, В. М. Козин, И. В. Каменских,
М. А. Синюкова, А. А. Гентова**

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН

Работа выполнена в рамках реализации
Программы стратегического развития КНАГТУ на 2012-2016 гг.
при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ

Комсомольск на Амуре
2014

УДК 621.311.21-828

ББК 31.55

Ч-594

Рецензенты:

С.В. Антоненко, д-р техн. наук, профессор кафедры кораблестроения и океанотехники Инженерной школы Дальневосточного федерального университета (ДВФУ);

В.Н. Храмушин, канд. физ.-мат. наук, председатель Сахалинского областного отделения Русского Географического Общества, председатель Сахалинского отделения Российского научно-инженерного общества кораблестроителей имени А.Н. Крылова

Чижиумов, С. Д.

Ч-594 Преобразование энергии морских волн / С. Д. Чижиумов, В. М. Козин, И. В. Каменских, М. А. Синюкова, А. А. Гентова – Комсомольск на Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. – 173 с.

ISBN

Рассмотрены вопросы гидродинамики морских волн при их взаимодействии с берегом и различными препятствиями, классификации преобразователей энергии морских волн. Представлены математические модели динамики преобразователей энергии морских волн. Приведены результаты расчётов и экспериментов. Выполнен анализ преобразователей резервуарного типа, а также систем с качающимися, шарнирно закреплёнными створками. Выполнена оценка эффективности преобразователей.

Книга рассчитана на аспирантов и специалистов, занимающихся вопросами энергетики и морских технологий.

*Работа выполнена в рамках реализации
Программы стратегического развития КнАГТУ на 2012-2016 гг.
при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ*

УДК 621.311.21-828

ББК 31.55

ISBN

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», 2014

© Институт машиноведения и металлургии Дальневосточное отделение Российской Академии Наук, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
СПИСОК СОКРАЩЕННЫХ НАИМЕНОВАНИЙ.....	8
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЫ.....	9
1.1. Ресурсы и области применения энергии морских волн.....	9
1.2. Волновой режим побережья Дальнего Востока.....	12
1.3. Краткий обзор волновых электростанций	15
1.4. Перспективы и проблемы использования.....	19
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ	27
2.1. Типы морских волн и основы теории волн.....	27
2.2. Физические процессы взаимодействия волн с откосным дном и неподвижной стенкой.....	40
2.3. Физические процессы взаимодействия волн с плавающими объектами.....	50
2.4. Обобщения.....	57
3. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ВОЛН...	58
3.1. Обзор классификаций по различным принципам.....	58
3.2. Последовательности преобразований. Вепольные структуры..	64
3.3. Проблемы использования энергии волн. Критерии выбора преобразователей.....	69
4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С КАЧАЮЩЕЙСЯ СТВОРКОЙ.....	72
4.1. Математические модели.....	72
4.1.1. Линейная модель.....	74
4.1.2. Нелинейная модель.....	77
4.2. Результаты расчётов.....	79
4.3. Экспериментальные исследования.....	98
4.4. Численное моделирование.....	109
4.5. Вопросы проектирования.....	113
4.5.1. Определение основных элементов преобразователя и выбор места установки.....	113

4.5.2. Определение расчётных нагрузок.....	114
4.5.3. Другие условия эксплуатации и расчёта конструкций.....	116
4.5.4. Модель управления колебаниями волнового преобразователя.....	117
4.6. Предложения модификации преобразователя.....	119
4.7. Техничко-экономическое обоснование	123
5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С РЕЗЕРВУАРАМИ.....	127
5.1. Основные параметры преобразователя.....	127
5.2. Численное моделирование гидродинамики преобразователей..	130
5.3. Предложения комбинированных преобразователей.....	146
5.4. Проблема обледенения.....	152
5.5. Численное моделирование комбинированных преобразователей.....	157
5.6. Техничко-экономическое обоснование.....	162
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	165
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	167

ВВЕДЕНИЕ

Основными современными энергетическими ресурсами являются не возобновляемые природные вещества: уголь, нефть и газ. Однако их стоимость растет, а запасы сокращаются. В процессе производства электроэнергии на ТЭС происходит огромный выброс вредных веществ в атмосферу.

Энергия рек во многих регионах используется на пределе своих возможностей и настолько интенсивно, что приносит ощутимый экологический вред: страдает рыба, которая не может преодолеть плотины; водохранилища затапливают земли. Строительство и эксплуатация ГЭС также сопряжены с большими затратами и рисками.

Серьезным тормозом для развития АЭС являются проблемы утилизации радиоактивных отходов. Кроме того, урановая руда – дорогостоящее и трудно добываемое сырье, запасы которого ограничены. К тому же АЭС требуют больших капиталовложений в строительство и являются потенциальными источниками техногенных катастроф. Лишь немногие страны сейчас продолжают строительство новых АЭС. Авария на японской атомной электростанции Фукусима-1 в 2011 году стала еще одним напоминанием об опасности АЭС. Оснащенная самым передовым электронным оборудованием, спроектированная по жестким требованиям к сооружениям в сейсмически активных зонах, АЭС Фукусима-1 не смогла справиться с энергией стихии.

За последние десять лет интерес к нетрадиционным возобновляемым источникам электроэнергии (ВИЭ) заметно возрос, разрабатываются и исследуются приливные электростанции (ПЭС), гидроэнергетические установки, использующие энергию течений, волновые электростанции (ВлЭС).

Основной недостаток нетрадиционных возобновляемых источников энергии - низкие плотности энергии. Так, для ветровых, солнечных, геотермальных установок характерны плотности энергии менее 1 кВт/м^2 . Соответственно нетрадиционные энергоустановки дороги, металлоемки, занимают большие площади по сравнению с действующими ТЭС, АЭС, котельными.

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.

В настоящее время сооружены несколько опытно-промышленных волновых энергетических систем (ВлЭС) в Великобритании, Норвегии, Исландии, Японии и др. странах. В мире уже около 400 маяков и навигационных буйев получают питание от волновых установок. В Норвегии с 1985 г. действует промышленная волновая станция мощностью 850 кВт. В 2002 г. введена в эксплуатацию ВлЭС в Португалии, которая при воздействии волн высотой до 5 м вырабатывает в год до 10 млн кВт·ч электроэнергии.

Попутно крупные волновые станции могут быть использованы в качестве волноломов и рейдовых причалов, для защиты акваторий портов и сооружений морских промыслов. Объемы вырабатываемой энергии позволяют обеспечить прибрежные поселения или начать коммерческую продажу электроэнергии от волновых электростанций. Коммерческие волновые ЭС уже работают в США, Шотландии, Испании.

На Дальнем Востоке России целесообразно развивать волновую энергетику в районах, не подключенных к общей электрической сети, а это 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 среднмировой показатель в 5 – 6 раз.

Следует отметить, что, несмотря на наличие большого количества патентов волновых генераторов, а также примеров практически реализованных проектов, существует также много примеров неудачного опыта создания или недостаточно эффективной эксплуатации волновых электростанций. При изучении этих примеров видно, что причинами проблем являются как принципиально неудачные технические решения, так и недостаточно проработанные технологии извлечения энергии волн.

Для достижения практической эффективности волновых электростанций необходима тщательная проработка и согласование их функциональных элементов, оптимизация с учётом реальных условий на местах эксплуатации. Для этого требуется разработка математических моделей и их анализ, проведение физических и компьютерных экспериментов, создание методик расчёта и проектирования. На это направлены усилия учёных в разных странах, что отражается в большом количестве научных публикаций и международных конференций по данному направлению в последние годы.

В данной работе основное внимание сосредоточено на преобразователях энергии волн двух типов:

– Oscillating Wave Surge Converter (OWSC) – система с элементами в виде створок на шарнирах, раскачивающихся от поступательного движения волн;

– Overtopping Wave Energy Converter (OWEC) – система с бассейном, заполняемым путём перелива гребней волн через край.

Рассмотрены вопросы повышения эффективности преобразователей на основе анализа результатов компьютерных и физических экспериментов, предложены некоторые новые технические решения.

СПИСОК СОКРАЩЕННЫХ НАИМЕНОВАНИЙ

АРИЗ – алгоритм решения изобретательской задачи;
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;
АЭС – атомная электростанция;
ВИЭ – возобновляемые источники энергии;
ВлЭС – волновая электростанция;
ГТУ – газотурбинная установка;
ГЭС – гидроэлектростанция;
ДВ – Дальний Восток;
ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
к.п.д. – коэффициент полезного действия;
МПУ – модельное прогнозирующее управление;
НИР – научно-исследовательская работа;
ПТУ – паротурбинная установка;
ПЭС – приливная электростанция;
РАО ЕЭС – Российское акционерное общество «Единые энергосистемы»;
ТРИЗ – теория решения изобретательских задач;
ТЭС – теплоэлектростанция;
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;
э.д.с. – электродвижущая сила;
ЭС – электростанция;
OWC – Oscillating Water Column;
OWEC – Overtopping Wave Energy Converter;
OWSC – Oscillating Wave Surge Converter;
РТО – Power-Take-Off (устройство отбора мощности).

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЫ

1.1. Ресурсы и области применения энергии морских волн

Первые количественные оценки энергетических ресурсов от морских волн были сделаны в 1974 году С. Солтером и Д. Моллисоном с использованием данных, собранных океанским судном погоды «Индия». Судно находилось в глубокой воде, в 700 км от западного побережья Шотландии. Было подсчитано, что среднегодовая валовая плотность энергии волн, определяемая как общая энергия волн, проникающих в круг диаметром один метр в год, составляет около 700 МВт·ч/м. Если бы вся эта энергия могла быть преобразована в электричество, то энергии волн, проникающих в круг диаметром один метр, было бы достаточно для обеспечения около 100 домов [68, с. 1].

Современные исследования показывают, что удельные мощности волновой энергии на океанском побережье умеренных широт составляют от 30 до 70 кВт/м, южных – от 10 до 30 кВт/м (рис. 1.1, 1.2).

Потенциал энергии ветровых волн Северо-Восточной Атлантики – 290 ГВт, Средиземного моря – 30 ГВт. Воды Индии имеют потенциал 50 ГВт волновой энергии.

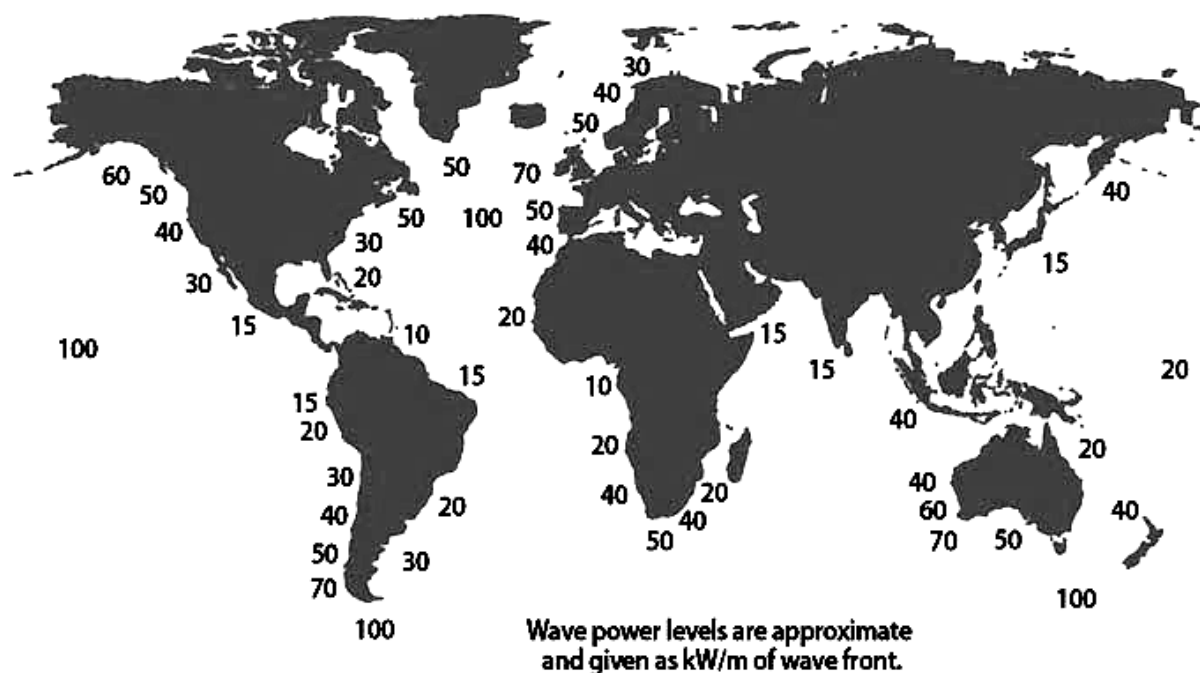


Рис. 1.1. Мощность волнения (кВт/м) в разных районах мира [91, с. 269]

для потребителей небольшой мощности также оснаждающие, особенно для районов, удалённых от общей электрической сети.

Для более практичной оценки ресурсов морских волн вводятся различные понятия, например, «технологическое волнение», «расчётное волнение» и др. [68, с. 1; 20, с. 43], которые учитывают только те волны, энергия которых может быть использована исходя из конкретной технологии. В работе [68, с. 2] вводится понятие эксплуатационной плотности энергии волн. При её определении отбрасываются волны, направление которых не соответствует сектору эффективной работы преобразователя, а также волны с мощностью, в три – четыре раза превышающей мощность, обеспечивающую среднюю выходную мощность преобразователя в номинальном режиме работы.

Исследования энергии волн на ограниченной глубине проводились в 20 км от побережья Шотландии глубине 10 м при уклоне дна 1:100. Оказалось, что здесь среднегодовая валовая плотность энергии волн уменьшилась на 30 % по сравнению с волнами открытого моря, в то время как среднегодовая эксплуатационная плотность энергии снизилась всего на 13 %. Аналогичные результаты были получены и для других прибрежных районов [68, с. 3].

Таким образом, разница между валовой и эксплуатационной энергией волн в прибрежной зоне меньше, чем в открытом море. Морское дно в прибрежном районе можно рассматривать как фильтр, который выделяет эксплуатационные волны. Направление волн упорядочивается по отношению к линии берега, а слишком крупные волны теряют свою разрушительную силу. С этой точки зрения небольшие прибрежные волновые электростанции являются не менее привлекательными, чем крупные установки для открытого моря.

Энергия волн имеет один из самых высоких показателей по практическому коэффициенту полезного действия среди нетрадиционных источников энергии. В различных источниках отмечается большой разброс к.п.д. волновых электроустановок (16 % – установка *Mighty Whale*, 20 % – системы с поршневым насосом, 45 % – многопоплавковые преобразователи, 40 – 70 % турбина Уэллса). Но следует принять во внимание, что в последнее время достигнут большой прогресс на пути повышения к.п.д., в первую очередь за счёт оптимизации конструкций, применения систем автоматического регулирования и учёта особенностей волновых режимов на месте установки.

Средний практический к.п.д. современных волновых энергетических станций (ВлЭС) при преобразовании энергии в электричество составляет 30 – 80 %. Если принять к.п.д. за 50 %, то технический потенциал ВлЭС прибрежной зоны восточного побережья Камчатки длиной 10 км может обеспечить выработку электроэнергии до 1,4 млрд кВт·ч в год – это существующее потребление всей Камчатки.

По данным зарубежных источников стоимость получаемой электроэнергии на ВлЭС сопоставима со стоимостью электроэнергии, вырабатываемой на современных электростанциях, работающих на газе. В 2002 году 1 кВт·ч электроэнергии от ВлЭС у берегов Японии и Индии стоил 0,27 долл., в 2004 году – около 0,11 долл. (для сравнения от газовых электростанций – 0,04 долл.). В 2010 году стоимость производства электроэнергии ВлЭС составляла около 0,05 долл./кВт·ч [93, с. 52; 68, с. 4].

1.2 Волновой режим побережья Дальнего Востока

Рентабельность и сроки окупаемости ВлЭС прямо зависят от параметров волнения в районах предполагаемой эксплуатации. Поэтому, с целью уменьшения стоимости и ускорения самоокупаемости установок, для разных районов надо изготавливать установки, рассчитанные на среднюю высоту волн именно в этих районах. Прочность и надёжность конструкции ВлЭС должна быть рассчитана на параметры экстремальных волн, возможных в данном районе.

В реальных условиях ветровое волнение является нерегулярными и для оценки удельной мощности ВлЭС необходимо иметь долгосрочные статистические данные по высотам и периодам волн. На сайтах [11, 89] представлены обобщённые статистические и текущие данные о распределении высоты волн в разных регионах мирового океана. В качестве характерного примера на рис. 1.3 приведены высоты волн в северной части Тихого океана.

Среднегодовой потенциал волновой энергии на Дальнем Востоке России (ДВ) представлен в таблице 1.1.

Берингово море по степени бурности занимает первое место среди морей, омывающих берега России. Значительные размеры, большие глубины и интенсивная штормовая деятельность способствуют развитию на его акватории сильного волнения в любое время года. Умеряющее влияние оказывают льды, снижая в суровые годы максимальные высоты волн в два раза по сравнению с мягкими зимами.

Таблица 1.1

Параметры волнения у побережья Дальнего Востока России

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

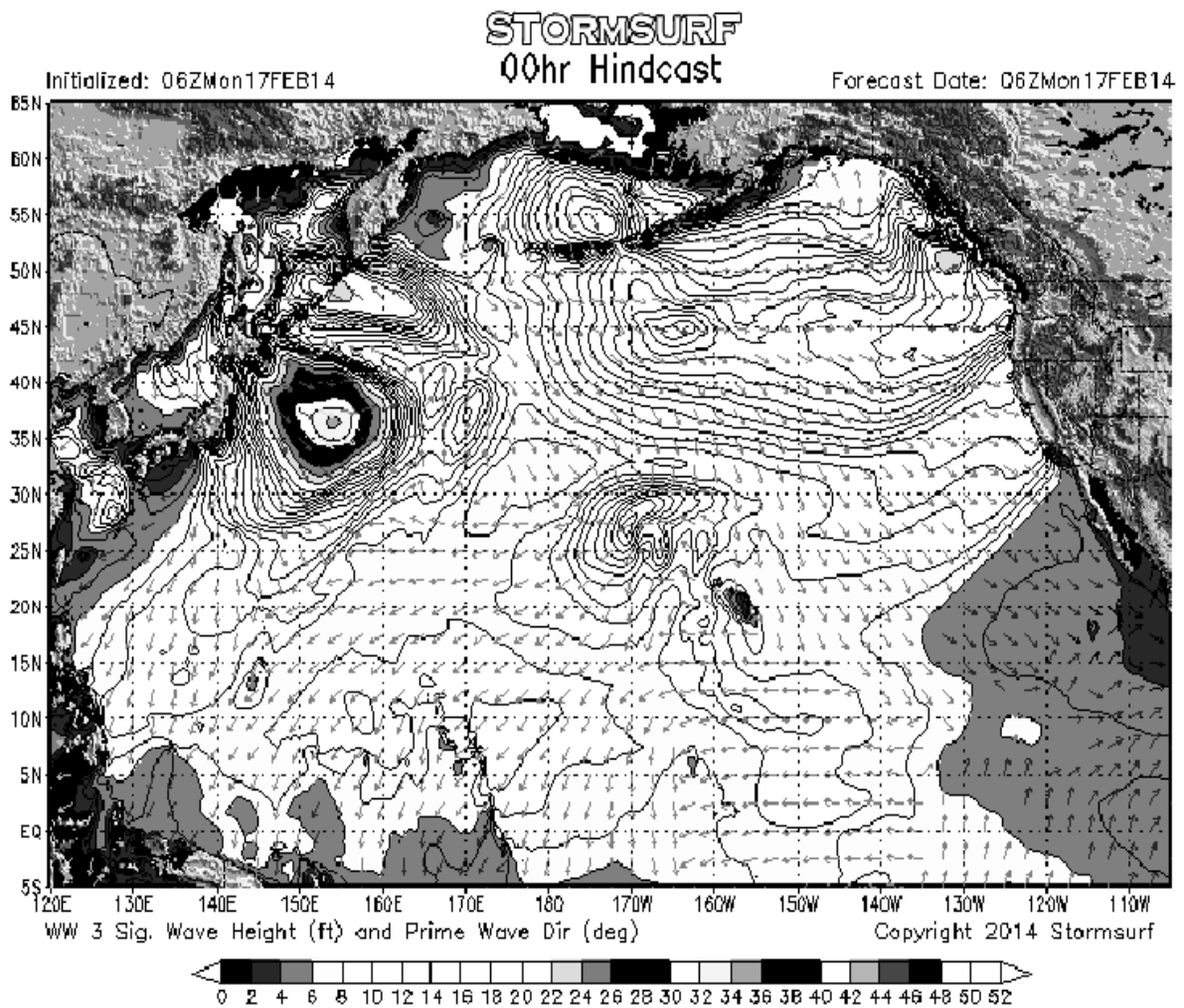


Рис. 1.3. Типичная картина распределения высоты волн (в футах) в Тихом океане (17.02.2014 г.) [89]

В течение всего года в Беринговом море преобладает волнение с высотой волн до 2 м и периодом 6 с. Летом повторяемость такого волнения у побережья составляет 90 %, уменьшаясь зимой до 70 – 80 %. В течение всего года возможна крупная зыбь высотой до 1 – 3 м. С сентября по май возможно до 6 случаев волнения с высотами волн более 8 м. Максимальная продолжительность такого явления составляет 60 ч. В открытом море зафиксирована максимальная высота волн более 20 м.

На побережье Камчатки известны два случая сильных цунами в 1960 г., максимальная высота до 2,5 м (о. Карагинский), в 1969 г. – до 10 – 15 м (м. Озерной).

Район Курильской гряды находится в зоне муссонного климата. Весенне-летний период (апрель – сентябрь) – летний муссон, преобладание юго-восточных ветров. Осенне-зимний период (октябрь – март) – зимний муссон, преобладание обратных направлений.

На Курильских островах летом крупные волны (высотой 5 м и более) встречаются в 1 % случаев. Для высот волн 2,0 – 2,5 м повторяемость летом составляет 28 – 33 %. Осенью и зимой интенсивность циклонов резко возрастает, образуются и более крупные волны. Повторяемость волн высотой 5 м и более составляет 4 – 7 %.

Величина приливных колебаний уровня составляет 1,7 – 2,5 м. Скорости приливных течений максимальны в мелководных проливах, где они достигают 2,5 м/с.

Непосредственно в Курильских проливах льдообразования в холодное полугодие не наблюдается (благодаря интенсивному приливному перемешиванию в сочетании с волнением температура воды не достигает отрицательных значений). В экстремально суровые по ледовитости годы отдельные языки плавучего льда шириной до 90 миль выходят из Охотского моря в океан у южных Курильских островов.

В Охотском море в холодный период преобладают ветровые волны и зыбь северных направлений. В отдельных районах моря их высоты могут достигать 8 м. В летние месяцы интенсивность волнения ослабевает, повторяемость высоты волны более 5 м очень мала. Преобладает волнение высотой 2 – 4 м. В этот период времени волнение в море распространяется преимущественно с юга.

Японское море (как и другие районы ДВ) лежит на пути следования тайфунов, идущих с юга. Даже если тайфун сам и не накрыл какой-либо из регионов ДВ, то разогнанная им волна приходит к побережью трехметровой зыбью.

Побережье Приморского и Хабаровского краев представляет собой высокие отроги Сихотэ-Алиня. Здесь часто наблюдаются трудно предсказуемые и порой сильные местные прибрежные ветры. Практически из любой долины, выходящей к морю, может выдуть ветер штормовой силы, распространяющийся веером в море на 5 – 10 км. В результате их взаимодействия с морской зыбью, течениями и перепадами глубин в некоторых местах характерны короткие волны высотой до 1,5 – 2 м с ломающимся гребнем. Сложный характер прибрежных явлений приводит к тому, что катера и моторные лодки не встречаются дальше двух - трех часового перехода от ближайшей бухты – убежища.

Ледяной покров в Японском море достигает максимального развития в середине февраля. В среднем льдом покрывается 52 % площади Татарского пролива и 56 % площади залива Петра Великого.

1.3. Краткий обзор волновых электростанций

Первые патенты и действующие устройства для использования энергии волн появились в начале XX века: в 1910 г. вблизи г. Бордо демонстрировалась волновая установка мощностью 1 кВт [16, с. 99]. Сейчас существует несколько сотен оригинальных технических решений волновых энергетических систем (ВлЭС). Однако практически приемлемыми оказываются лишь десятки.

В 1935 г. К. Э. Циолковский опубликовал статью «Волнолом и извлечение энергии из морских волн» [42, с. 362-364], в которой описал принципиальные схемы трех устройств – аналогов будущих наиболее известных устройств Масуды, Кайзера и Коккерелла. К. Э. Циолковский писал: «Извлекая через посредство машин энергию движения из волн, мы ослабляем их колебания и тем самым отчасти укрощаем. ... Эти двигатели могут заменить мол и явиться искусственной гаванью там, где ее нет».

Перечислим некоторые основные, принципиально разные ВлЭС:

– преобразователи энергии с качающимися шарнирно связанными элементами («утка» Солтера [77, с. 1; 88, с. 3], плот Коккерела [30, с. 55], «морские змеи» [40, с. 2; 60, с. 887], система поплавков Русецкого [31; 32]);

– точечные устройства с поплавками (буи [16, с. 143; 32], волновые насосы [16, с. 156], системы точечных устройств [30, с. 17]);

– гидропневматические плавучие системы (осциллирующие водяные колонны Масуды [16, с. 149; 55], кессонные волноломы с воздушными турбинами [16, с.152; 21, с.77]);

– гидропневматические береговые конструкции с кессонами и воздушными турбинами Уэллса и Дениса [32, 40, 55, 94];

– качающиеся пластины [32; 95, с.345; 96, с.927];

– концентраторы волновой энергии («выпрямитель» Рассела [16, с. 160; 30, с. 44], сужающиеся каналы ТАРСНАН [90, с. 265; 92, с. 12], «дамба – атолл» [9, с. 33; 76, с. 36]).

Международное Энергетическое Агенство (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. Этими странами, а также Австралией и Китаем уже реализованы и успешно эксплуатируются волновые и приливные электростанции самых разных конструкций [62; 63].

Определены основные принципы преобразования энергии морских волн в электроэнергию: преобразование процесса вытеснения воздуха водой во вращение турбины – осциллирующий водяной столб (OWC: Oscillating Water Column) с воздушной турбиной Уэллса; преобразование вертикальных перемещений штока в электрическую энергию (технология POWER BUOY); преобразование горизонтальных движений поршней гидравлических насосов во вращательное движение электрогенераторов (установка PELAMIS); преобразование кинетической энергии качающейся (перетекающей) жидкости во вращательную энергию электрогенератора (установка ANACONDA); преобразование вихревых колебаний цилиндрических объектов в движущейся жидкости в электроэнергию (преобразователь VIVACE (Vortex Induced Vibrations Aquatic Clean Energy)).

На рис. 1.4 показаны районы размещения ВлЭС. В таблице 1.2 приведены характеристики волновых электростанций, построенных за последние годы.



Рис. 1.4. Распространение ВлЭС в мире [93, с. 2]

Таблица 1.2

Нетрадиционные гидроэнергетические установки

Название и тип ВлЭС	Место и год постройки	Мощность, МВт
1	2	3
OWC	Италия, 2009 г.	0,3
OWC	о. Айлей, Шотландия, 2000 г.	0,5
Pelamis	Побережье Шотландии, 2002 г.	0,75
Oyster	Оркнейские острова, Шотландия, 2009 г.	20
Oyster	о. Lewis, Шотландия, 2009 г.	4,5
Limpet, OWC	Побережье Гебридских островов, Великобритания, 2000 г.	0,5
Pelamis + Power Buoy= Wave Hub	Корнуолл, Великобритания, 2007 г.	20
OWC	п. Митрику, Испании, 2009 г.	0,3

Продолжение табл. 1.2

1	2	3
OWC	Порт Кембла, Австралия, 2010 г.	2,5
OWC	Порт МакДоннелл, Австралия, 2013 г.	1
Pelamis	Побережье Португалии, 2008 г.	2,25
«Wave Dragon»	Агусадора, Португалия, 2013 г.	50
«Mighty Whale», OWC	Залив Gokasho, вблизи г. Нагоя, Япония, 1998 г.	0,11
«Mighty Whale», OWC	Залив Гокасе, в префектуре Миэ, Япония, 1998 г.	0,3
OWC	На волноломе, к северу от г.Токио, Япония, 1998 г.	0,13
OWC	На волноломе, в префектуре Фукусима, Япония, 2001 г.	0,13
OWC	о. Ванкувер, в провинции Британская Колумбия, Канада, 2004 г.	2
технология Aqua Buoy	В 1 км от побережья штата Орегон, США, 2008 г.	15

Анализ публикаций, в которых обсуждаются проблемы волновой энергетики, показал также, что в настоящее время встречается предвзятое мнение об экономической неэффективности ВлЭС [39].

Очевидно, что оно сложилось в результате существующих примеров неудачного опыта создания и эксплуатации опытных установок. Однако при внимательном изучении этих проектов видно, причина неудач кроется в неэффективных технологиях извлечения энергии волн, а именно:

1. Осциллирующий водяной столб (гидропневматический преобразователь) не может обеспечить высокий к.п.д., так как большая часть полезной работы теряется при сжатии воздуха. При этом практически не используется работа гидродинамических сил. Диапазон применений данного метода очень узок и ограничивается либо крупными волнами океанской зыби высотой более 2 – 3-х метров, либо крупными прибрежными волнами прибоя. Нигде не удалось обнаружить расчетов и данных о зависимости выходной мощности установок, на базе данного метода, от высоты волн и от размеров установки.

2. Известные концентраторы волновой энергии выполнены нерационально. ТАРСНАН требует больших затрат на постройку. Выпрямитель Рассела (в том виде, как он описан в работах [16, с. 162;

30, с. 88; 55]) недостаточно проработан – размеры его элементов требуют оптимизации.

3. Точечные поплавковые преобразователи имеют высокий к.п.д., но маломощны, так как они не «собирают» рассеянную по большой площади энергию волн. К тому же их подвижные элементы и якорные системы недостаточно надёжны при воздействии штормовых волн.

Таким образом, в настоящее время существует множество патентов и проектов волновых преобразователей, однако их практическая эффективность не может быть достигнута без 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.

Вследствие непостоянства морского волнения важным вопросом является проблема накопления энергии. Обычно для этих целей используют аккумуляторные батареи. Для волновых энергоустановок возможно накопление энергии в гидроаккумуляторах либо путём электролиза водорода.

Для электролиза можно напрямую использовать произвольно меняющуюся во времени мощность электрического тока. Водородная энергетика сегодня интенсивно развивается и поэтому использование ВлЭС для широкомасштабного получения водорода является перспективным.

Важным преимуществом волновой энергетики является возможность применения модульного принципа - последовательное сооружение блоков ограниченной мощности, без больших начальных затрат на капитальное строительство.

1.4. Перспективы и проблемы использования

«Многие полагают, что последствия широкого внедрения альтернативной энергетики будут катастрофическими для российской экономики, основанной сегодня на торговле нефтегазовыми ресурсами. Эта проблема создавалась десятилетиями, можно сказать, что и при социализме наша страна была сильно зависима от экспорта нефти. Тем не менее, когда Вам говорят, что нефть и газ – основа экономики страны, не верьте! Основой может быть что-то стабильное и развивающееся, например, высокотехнологичное сельское хозяйство и промышлен-

ность. Торговля ресурсами может быть источником поступления денег в бюджет, но не основой экономики» [41, с. 14].

«Дух стяжательства и дух предпринимательства – это разные понятия. Торговать сегодня топливом, особенно на внутреннем рынке, при наличии возможности развивать технологии свободной энергии, это похоже на торговлю водой около родника, причем в своей деревне. Только «закрыв» людям доступ к технологиям свободной энергии, топливным монополистам удается на этом наживаться» [41, с.14].

На Дальнем Востоке 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. Камчатка тратит более половины своего бюджета на топливо [13].

Эта проблема должна решаться. Однако способы её решения, которые предлагаются и уже 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 планировал создать до 2015 года флотилию из семи плавучих АЭС [1].

Развитие энергетики на ДВ пока остается экстенсивным. Под предлогом привлечения инвестиций проектируются и строятся крупные и экологически грязные объекты, с низким к.п.д., 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.

Между тем ДВ обладает огромным потенциалом для развития экологически чистой энергетики (ветровой, приливной, волновой и др.) на возобновляемых источниках. В 2009 г Правительством РФ были приняты и основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до

2020 года (распоряжение от 8 января 2009 г. № 1-р). Тогда же была принята стратегия развития социально-экономического развития и энергетики ДВ (распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2009 г. № 2094-р). В этих документах предполагалось увеличение доли возобновляемых источников энергии. Эта доля к 2020 году планируется на уровне 4,5 %. Однако такие темпы роста значительно отстают от мировых.

Более того, позже многие проекты строительства объектов возобновляемой энергетики были исключены из федеральных целевых программ или отложены [24]. С другой стороны, обоснованность некоторых существующих 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 потребления – неэффективной.

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

В последующих главах мы рассмотрим техническую сторону вопроса развития альтернативной энергетики, предлагая варианты использования энергии морских волн. Однако в разработке и реализации проектов экологически чистых энергетических систем технические проблемы не всегда являются главными.

Нужно учитывать фактическое противодействие развитию экологичной энергетики со стороны крупных энергетических компаний. Причиной этому является ориентированность экономики не на социальное развитие территорий, а на получение прибыли от экспорта природных богатств. В результате огромные ресурсы тратятся на поддержание технологически устаревших и экологически грязных объектов добывающей промышленности и энергетики, а для развития энергетики на возобновляемых источниках нет ни четкой государственной программы, ни организации управления, ни тщательно продуманного финансирования.

Экологические проблемы.

Атомная энергетика рассматривается в Энергетической стратегии России до 2020 г. как одна из важнейших частей энергетики страны. Но

с ростом количества АЭС возрастают риски аварий. Заверения Росэнергоатома в высокой степени безопасности АЭС нельзя назвать полностью убедительными. Известны многочисленные случаи аварий, связанные с реакторами [52]. В последнее время появились публикации, в которых доказывается потенциальная опасность аварий подобных сложных технических систем по причине того, что их проектные математические модели относятся к классу «условно корректных». Это означает, что при численном моделировании некоторых эксплуатационных условий может возникать потеря устойчивости вычислений и непредсказуемые ошибки в расчётах. Алгоритмы, исключаяющие такие ошибки при проектировании, ранее не использовались (и далеко не всегда используются сейчас). В работах Ю.П. Петрова [27] показывается, что аварий, происходящих из-за проектных ошибок, происходит гораздо больше, чем учитывается официальной статистикой.

Следует также понимать, что экологический вред от АЭС сейчас определяется не столько опасностью аварий, сколько постоянным загрязнением окружающей среды от производства ядерного топлива и утилизации его отходов.

Основой электроэнергетики России в планах до 2020 г. остаются тепловые электростанции. Они обеспечат выработку 67 – 71 % всей электроэнергии в стране. Учитывая сложную ситуацию в топливдобывающих отраслях и ожидаемый высокий рост выработки электроэнергии на тепловых электростанциях (на 40 – 80 % к 2020 г.), обеспечение топливом является одной из сложнейших проблем в энергетике.

Намечаемые уровни развития и технического перевооружения отраслей энергетического сектора страны невозможны без соответствующего роста производства в отраслях энергетического (атомного, электротехнического, нефтегазового, нефтехимического, горношахтного и др.) машиностроения, металлургии и химической промышленности. Образуется «замкнутый круг», когда большая доля энергии и тепла расходуется на добычу топлива для электростанций и ТЭЦ. В результате экологическая обстановка всё более обостряется. Например, в Хабаровском крае более 70 % горожан живут в условиях высокого и очень высокого загрязнения воздуха.

На Дальнем Востоке 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. Большинство дизельных электростанций было построено в 60 – 80-х годах прошлого века. Они морально устарели и физически изношены. В результате к.п.д. оборудования крайне низок [22].

Цель развития энергетики.

Основой нового, постиндустриального этапа развития человечества, обозначенного А. Тоффлером как «Третья волна цивилизации», является постепенный полный отказ от эксплуатации невозобновляемых источников энергии и переход на новейшие источники возобновляемой энергии и новейшие технологии с малым потреблением ресурсов [38, с.7].

Существует концепция «экологического развития», в соответствии с которой единственным условием выживания человечества является устойчивость природных экосистем, когда человеком эксплуатируются только искусственные экосистемы. Технологии «Третьей волны» рассчитаны на минимально необходимое потребление энергии. Они не будут такими громоздкими и экологически опасными, как технологии прошлого.

Экологическая политика России.

В России 8 января 2009 года было издано распоряжение № 1-р, согласно которому к 2020 году планируется объем производства и потребления электроэнергии с использованием возобновляемых источников (без учета крупных ГЭС) в 4,5 %. В 2010 году принята стратегия развития энергетики Дальнего Востока. В ней предполагается увеличение доли возобновляемых источников энергии до 38 % к 2020 году [24].

В конце 2010 года Правительство РФ утвердило государственную программу "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2025 года". Согласно программе основным источником финансирования региональных и местных программ энергосбережения и повышения энергоэффективности является внебюджет. В 2011 - 2013 гг. доли по объемам финансирования по госпрограмме составляют: внебюджетное – 93,5 %, региональное – 5,4 % и федеральное 1,1 %. [22]

По словам Д. А. Медведева на встрече с представителями деловых кругов 2 марта 2010 года «любой «зелёный рост», так называемая

новая энергоэффективная экономика, возможен только в том случае, когда мы сможем отыскать в этом бизнес-элемент. До этого все призывы к тому, чтобы снижать выбросы, заниматься охраной окружающей среды, не допускать изменения климата превращались в благие пожелания. Но как только этим вопросом стал интересоваться бизнес, у этой темы появились перспективы» [23]. О каких перспективах и интересах бизнеса можно говорить, когда в планах энергетических компаний объемы ввода в строй станций на возобновляемых источниках энергии намечаются в несколько раз меньше, чем необходимо для достижения показателя в 4,5 %? Какой интерес у бизнеса при повышенных начальных капитальных затратах на внедрение проектов возобновляемых источников энергии и отсутствии программы государственной поддержки?

В настоящее время в электрогенерирующих компаниях доля выработки электроэнергии на основе возобновляемых источников крайне незначительна. Отсутствует проектная база, нет оценок применимости проектов и планов для развития. Федеральное законодательство касается поддержки только проектов, включаемых в объединенные энергосистемы. Однако это не относится к зоне децентрализованного энергоснабжения, где экономический эффект от использования возобновляемой энергии максимален [15].

Доминирование традиционного топливно-энергетического сектора в экономике страны, политика субсидирования таких отраслей, как нефтяная, атомная энергетика, крупная гидрогенерация, препятствуют развитию экологически безопасной энергетике. Так, правительство ввело с начала 2010 года нулевые пошлины на экспорт нефти с ряда месторождений Восточной Сибири. Отсутствие экспортной пошлины приносит экономию компаниям, работающим в Восточной Сибири, бюджет недополучает около 10 млрд р., которые как раз и можно было бы направить на программы поддержки экологически чистых технологий [15].

Таким образом, намерения решения проблем энергетике и экологической безопасности декларируются, но не реализуются. Развитие энергетике является экстенсивным. Под предлогом привлечения инвестиций проектируются и строятся крупные и экологически грязные объекты, с низким к.п.д., ориентированные на обеспечение добычи полезных ископаемых и экспорт энергоресурсов. Тем самым страна в целом и Дальний Восток в частности продолжают развиваться как сырьевой придаток крупных компаний при падении уровня и качества жизни

населения. И это при наличии огромного потенциала для развития экологически чистой энергетики (ветровой, приливной, волновой и др.) на возобновляемых источниках.

Одним из показательных проектов является план строительства плавучих атомных электростанций для Арктики, Камчатки и Чукотки. Г. Греф отметил: «Стоимость одного киловатта установленной мощности плавучей атомной станции – 7 200 долл. Это никогда не окупится. Это в семь раз выше, чем в теплогенерации». Тем не менее, Росэнергоатом планировал создать до 2015 года флотилию из семи плавучих АЭС [10]. На все опасения населения и экологов, касающиеся безопасности плавучих АЭС, глава Федерального агентства по атомной энергии С. Кириенко решительно заявил: «Это не будет плавучим Чернобылем!» [52].

Другим показательным примером является Китай. В 2005 году Китай принял закон о возобновляемой энергетике. В 2007, 2008 и 2009 годах мощности установленных ветроэлектростанций в Китае увеличивались более чем на 100 % за год. В 2009 году мощность ветроэлектростанций составила 25,4 ГВт, из них более 60 % в граничащих с Россией регионах. По этому показателю Китай вышел на первое место в мире, опередив США, Испанию и Германию. При таких темпах можно ожидать, что объявленная цель довести к 2020 году общую установленную мощность ветроэлектростанций до 150 ГВт будет достигнута с опережением графика [15].

Есть ли перспективы?

Опыт развития энергетических систем на возобновляемых источниках (в том числе и волновых) в разных странах показывает, что перспектива таких систем существует. Более того, становится всё более очевидным факт, что ресурсами дальнейшего развития цивилизации являются не запасы нефти, газа, угля и ядерного топлива, а механизмы управления экологической безопасностью.

К сожалению, как показывает анализ публикаций, в России фактически пока другие приоритеты. Невозможно развивать энергетику на возобновляемых источниках и пытаться решать проблемы экологии, если основной целью государства и крупнейших компаний является экономическое развитие только на основе экспорта природных ресурсов.

В странах, где невозобновляемые энергетические ресурсы крайне ограничены (Китай, Германия и др.), переход на возобновляемые источники происходит довольно быстрыми темпами. Однако Россия и ряд других стран, богатых природными ресурсами, не должны себе позволить дойти до состояния истощения энергетических запасов, так как к этому моменту может быть достигнут предел устойчивости всей биосферы планеты.

Очевидно, что концепция «экологического развития» не согласуется с целью получения максимальной прибыли, которая характерна практически для всех частных предприятий. Однако кризисные явления в современной мировой экономике и политике, обусловленные в основном несоответствием «аппетитов» в невозобновляемых энергоресурсах и их ограниченным количеством и стоимостью добычи, показывают, что ситуация будет изменена.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

2.1. Типы морских волн и основы теории волн

Многообразие морских волн велико, поэтому существуют различные их классификации. По характеру движения волны бывают прогрессивные (бегущие) и стоячие. Морские волны, вызванные ветром, являются бегущими. Стоячие волны, характерные для замкнутых водоёмов, имеют большой период и длину, и малую высоту. На некоторых участках морского побережья большим энергетическим потенциалом обладают постоянные приливно-отливные волны, высота которых, например, в Пенжинской губе Охотского моря достигают 13 м.

По характеру физических процессов волны можно разделить на два типа: гравитационные и ударные. Гравитационные волны обусловлены гидростатическими и гидродинамическими реакциями на силы веса масс воды, выведенных из состояния равновесия. Ударные волны – это волны сжатия воды, распространяющиеся со скоростью звука.

Наибольшее влияние на судоходство и на прибрежные объекты имеют волны, вызванные действием ветра. Ветровое волнение является наиболее сложным для изучения. В условиях морских течений, прибрежных неровностей рельефа дна и сложных очертаний берегов волны могут дополнительно сложным образом изменяться, приобретая иногда необычную форму и концентрированную энергию.

С точки зрения анализа динамики морских объектов, в том числе преобразователей энергии ветровых волн, можно выделить три основные модели реального морского волнения: регулярная, нерегулярная и групповая. Эти модели отражают основные характеристики ветровых волн на разных этапах их развития.

На начальной стадии воздействия ветра на поверхность воды в результате сил трения образуются мелкие волны – рябь. При дальнейшем действии ветра кроме сил трения образуется неравномерное аэродинамическое давление на волновую поверхность, способствующее увеличению высоты и скорости волн (рис. 2.1). При достижении волнами скорости ветра аэродинамическое давление прекращается, и рост высоты волн останавливается.

С ростом скорости c волн растет и их длина λ , так как эти параметры связаны формулой дисперсии:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = 1.25\sqrt{\lambda}. \quad (2.1)$$

Вследствие нерегулярности порывов ветра и изменения его направления волнение также является нерегулярным. Однако случайные отклонения скорости и направления ветра происходят относительно некоторых средних значений. Поэтому при продолжительном воздействии ветра хаотическое волнение приобретает структуру, близкую к регулярной. При этом проявляется свойство дисперсии: нерегулярное волнение разделяется на движущиеся с разной скоростью составляющие волнового спектра. Короткие волны отстают и затухают, а наиболее длинные и высокие волны, отделяясь от других гармоник, образуют относительно регулярные структуры.

При наложении волн, имеющих небольшое отличие по длине, возникают группы (пакеты) волн (рис. 2.2). Такие последовательности штормовых волн давно подмечены моряками и даже имеют свои названия, например, «девятый вал», «три сестры».

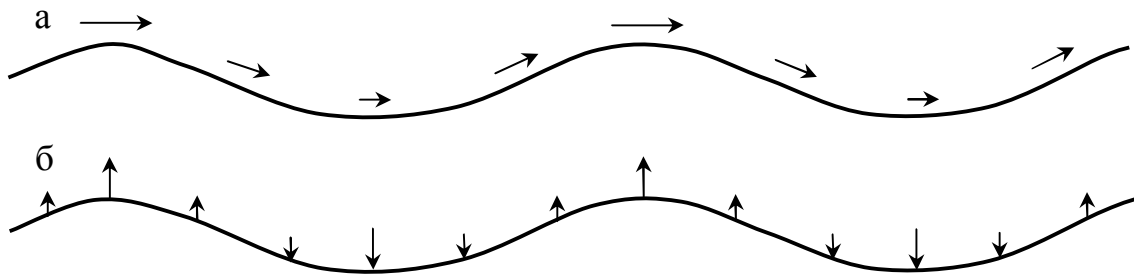


Рис. 2.1. Скорость (а) и аэродинамическое давление (б) ветра на волновую поверхность



Рис. 2.2. Групповое волнение

При дальнейшем развитии волнения отделяется основная гармоника волнового спектра, волнение становится относительно регулярным (зыбь). Такие волны затухают медленно и зачастую уходят за пре-

делы штормовой зоны и свободно движутся при отсутствии ветра (мёртвая зыбь).

В бегущей у поверхности воды волне частицы жидкости движутся по круговым орбитам, радиус которых уменьшается по мере удаления от поверхности (рис. 2.3, а). Линии тока в волне в фиксированный момент времени показаны на рис. 2.3, б. На рис. 2.4 показаны фотоснимки волн на мелкой воде с выдержкой, равной их периоду. В результате видны траектории движения подкрашенных частиц. В бегущей волне траектории частиц круговые, причём по мере приближения к дну они становятся приплюснутыми (рис. 2.4, а). Похожий эффект наблюдается при частичном отражении волн от препятствия. При этом круговые траектории вытягиваются, и формируется возвратно-поступательное движение частиц (рис. 2.4, б). В стоячей волне траектории фактически совпадают с линиями тока (рис. 2.4, в).

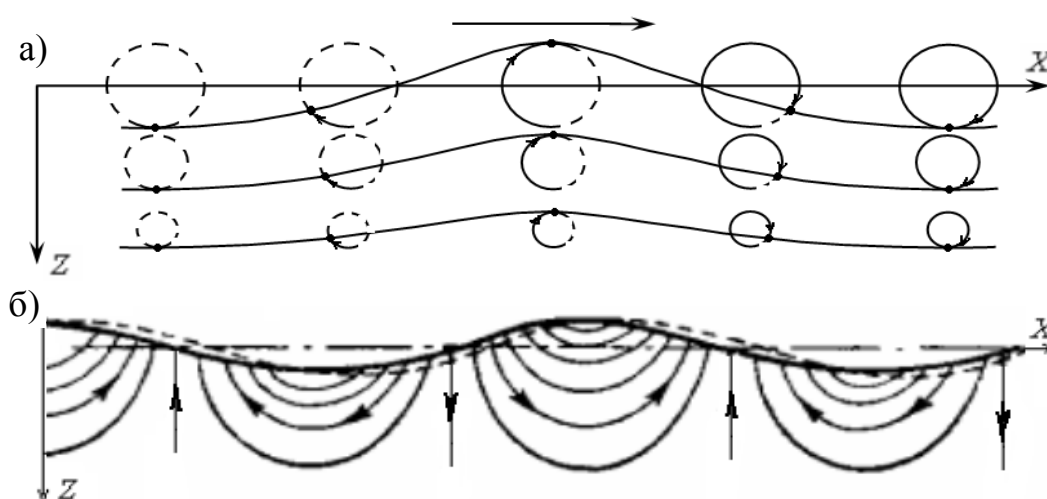


Рис. 2.3. Траектории частиц жидкости (а) и линии тока (б) под поверхностью волн

При подходе волн к берегу, когда глубина плавно уменьшается, возникает поверхностный прибой. Высота волны начинает резко возрастать: фронт волны становится крутым, а тыловая часть – полой. В результате гребень волны заостряется и опрокидывается (рис. 2.5).

Реальное волнение, обладая нерегулярной пространственной структурой, всё же имеет некоторое основное направление волн и вытянутые гребни, что позволяет его приближённо моделировать в виде двумерных волн (рис. 2.6).

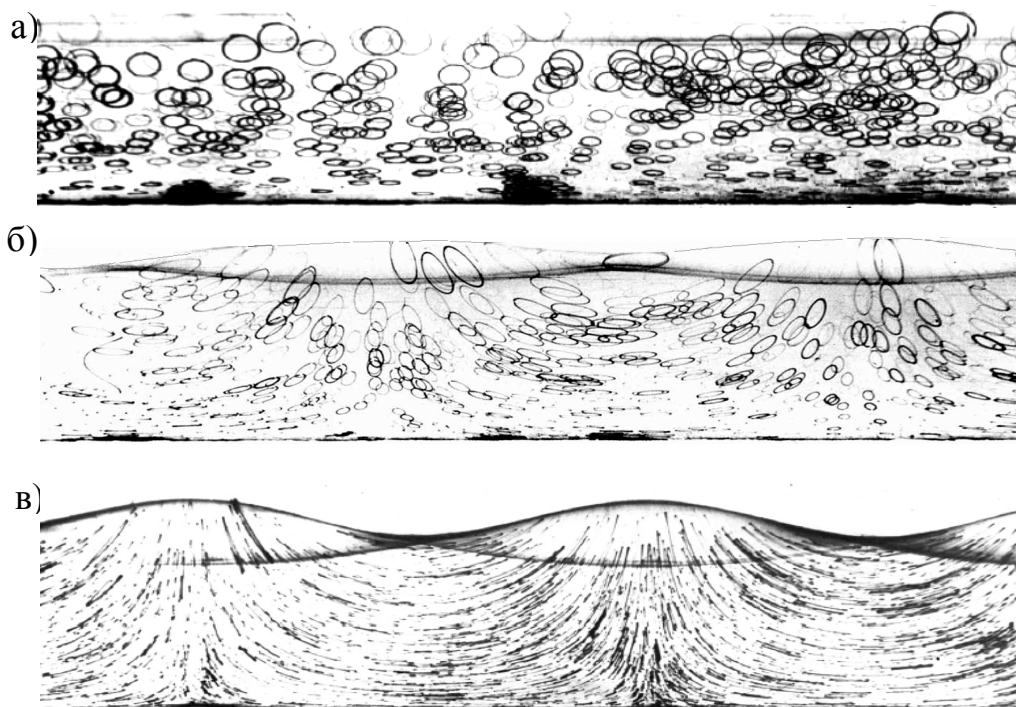


Рис. 2.4. Фотоснимки траекторий частиц в бегущих (а), частично отражённых (б) и полностью отражённых стоячих (в) волнах на мелкой воде [2]

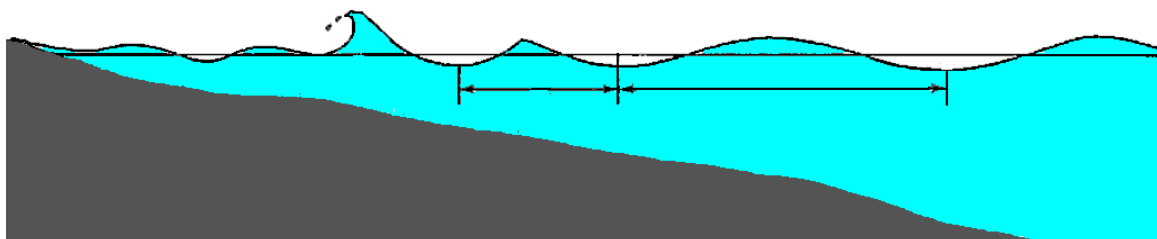


Рис. 2.5. Трансформация волн при подходе к берегу и образование прибоя

Общая модель потенциального волнения.

Морское волнение достаточно достоверно моделируется в виде потенциального движения невязкой и несжимаемой жидкости. Эта модель является общепризнанной, так как хорошо согласуется с результатами анализа физических наблюдений¹.

¹ Следует, однако, отметить, что при взаимодействии волн с морскими сооружениями, в том числе с преобразователями энергии волн, в отдельных областях может происходить значительная трансформация волновых движений, приводящая к образованию турбулентных вихрей, ударов и других эффектов. В таких областях необходимо применение моделей вязких, не потенциальных течений.

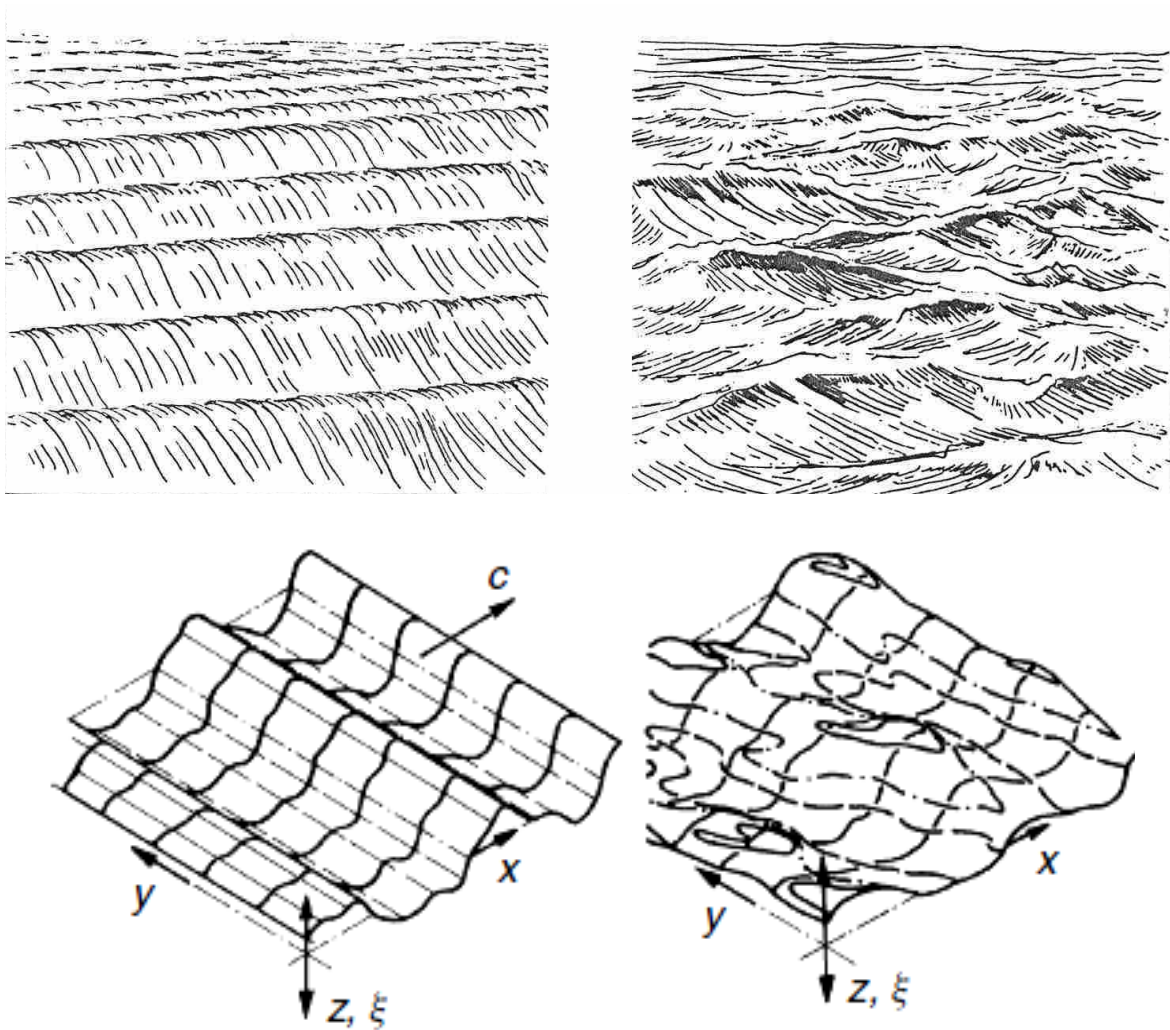


Рис. 2.6. Двумерное и трёхмерное волнение

Движение идеальной несжимаемой жидкости описывается уравнением Эйлера. Интеграл этого уравнения для нестационарного потенциального течения (интеграл Коши – Лагранжа) позволяет определить избыточное давление (то есть давление относительно атмосферного давления) в идеальной жидкости:

$$p(x, y, z, t) = -\rho \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla)^2 + gz \right), \quad (2.2)$$

где ρ – плотность жидкости, φ – потенциал скорости, t – время, g – ускорение свободного падения.

Также в области жидкости Ω (рис. 2.7) должно выполняться условие неразрывности, которое в случае потенциального течения определяется уравнением Лапласа относительно потенциала скорости:

$$\Delta \varphi(x, y, z) = 0 \quad \text{в } \Omega. \quad (2.3)$$

Решение этого уравнения позволяет для каждого момента времени найти мгновенное поле скоростей жидкости, а отсюда – движение жидкости, в том числе и положение волновой поверхности.

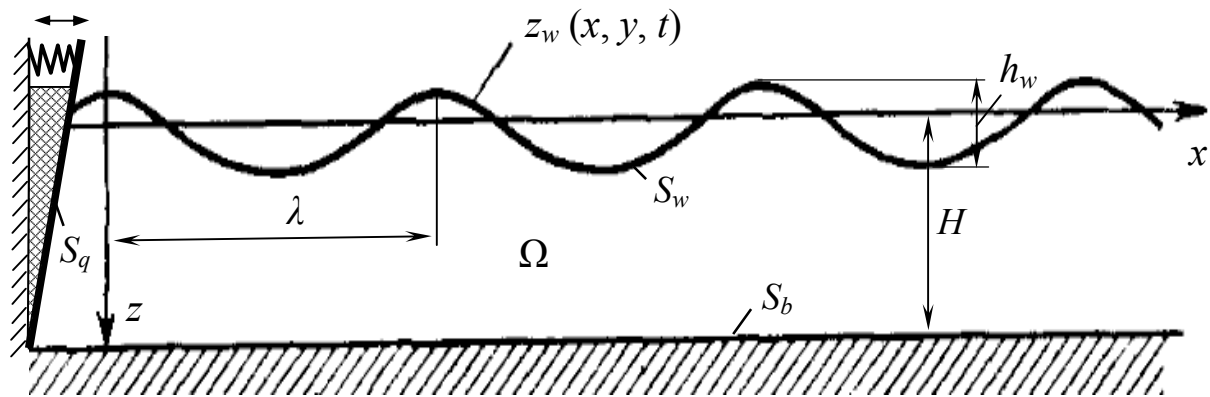


Рис. 2.7. Схема волнения

На волновой поверхности жидкости S_w должны быть заданы давления. Для ветрового волнения это сделать очень сложно по двум причинам. Во-первых, динамика ветра имеет существенные и случайные пульсации параметров. Во-вторых, вблизи волновой поверхности параметры ветра зависят от параметров самих волн. В результате, необходимо создавать общую и чрезмерно сложную для анализа модель аэро- и гидродинамики (совместного движения воздуха и воды).

Поэтому волновое движение жидкости обычно задаётся путём введения некоторой подвижной части границы S_q – волнопродуктора. Аналогично выполняется физическое моделирование волн в опытовых бассейнах. На границе S_q вводится условие

$$\frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial n} = \bar{v}_{nq}, \quad \text{на } S_q, \quad (2.4)$$

где $\bar{v}_{nq}(t)$ – заданная (обычно по гармоническому закону) нормальная скорость движения точек поверхности волнопродуктора.

При этом на поверхности волн принимается условие отсутствия избыточных давлений (свободные волны). Тогда из (2.2) получим:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \varphi)^2 + gz_w = 0 \quad \text{на } S_w, \quad (2.5)$$

где z_w – аппликата точек волновой поверхности.

Если давления на волновую поверхность задаются (в том числе $p=0$), то из решения уравнения (2.2) или (2.5) может быть найден потенциал скорости на S_w . Обозначим его $\bar{\varphi}_w$. Тогда для единственности решения уравнения Лапласа формируется граничное условие

$$\varphi(x, y, z) = \bar{\varphi}_w \quad \text{на } S_w. \quad (2.6)$$

На волновой поверхности S_w должно выполняться также условие (2.4)

$$\frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial n} = \bar{v}_{nw}, \quad \text{на } S_w,$$

где \bar{v}_{nw} – нормальная скорость движения точек волновой поверхности.

При наличии дна или твердых стенок S_b , ограничивающих объём жидкости, условие (2.4) следует применить к этим границам с учетом их неподвижности ($\bar{v}_{nb} = 0$):

$$\frac{\partial \varphi(x, y, H)}{\partial n} = 0, \quad \text{на } S_b. \quad (2.7)$$

Если границы водоёма (берега, стенки) не определены, то дополнительно необходимы условия для волн вне исследуемого участка волновой поверхности. Они формулируются по-разному в зависимости от вида исследуемого волнения (условия затухания волн, регулярности, симметрии и др.). В частности, условия затухания на большом удалении R ($R \rightarrow \infty$) от волновой поверхности (условная граница S_∞)

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \varphi = 0; \quad \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{на } S_\infty. \quad (2.8)$$

При моделировании волнения как переходного процесса должны быть также заданы начальные условия (положение волновой поверхности – обычно в виде $z_w(x, y, t = 0) = 0$, внешние давления или положение и скорость волнопродуктора при $t = 0$).

Линейная теория волн.

Численный анализ модели, представленной в предыдущем разделе, довольно сложен. Кроме того, для такой модели существует проблема подбора параметров движения волнопродуктора, таких, которые бы приводили к желаемым параметрам волнения с целью дальнейшего анализа работы преобразователя волновой энергии.

Более традиционной и простой является линейная модель волнения (теория Эри для волн малой амплитуды), в которой используются следующие допущения:

- крутизна волн является малой величиной ($h_w/\lambda \rightarrow 0$, где h_w и λ – высота и длина волн) – это позволяет перенести граничные условия на реальной волновой поверхности на плоскость $z = 0$;
- скорости в волне небольшие и их квадратом можно пренебречь

$$v^2 = (\nabla\varphi)^2 = 0.$$

Рассмотрим далее частный случай линейной модели, считая, что:

- волны свободные и движутся только под действием сил тяжести и вызванных самими волнами гидродинамических сил;
- движение плоское (в направлении оси y никакие параметры не изменяются).

В линейной теории волн используется уравнение Лапласа (2.3), а уравнение (2.2) упрощается

$$p(x, y, z, t) = -\rho \left(\frac{\partial\varphi}{\partial t} + gz \right). \quad (2.9)$$

На свободной поверхности $z = 0$ должны выполняться два условия: кинематическое (2.6)

$$\frac{\partial\varphi(x, z)}{\partial z} = \frac{\partial z_w}{\partial t}, \quad (2.10)$$

и динамическое (2.4)

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + gz_w = 0. \quad (2.11)$$

Условия (2.10) и (2.11) можно объединить. Из (2.11) получим

$$z_w = -\frac{1}{g} \frac{\partial\varphi}{\partial t}; \quad \frac{\partial z_w}{\partial t} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}.$$

Подставим второе выражение в (2.10):

$$g \frac{\partial\varphi}{\partial z} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = 0 \quad \text{на поверхности } z = 0. \quad (2.12)$$

Должно выполняться также условие на дне (2.7) или условие затухания движения на большой глубине:

$$v = grad(\varphi) = 0. \quad (2.13)$$

Поставленная задача аналитически решается путём применения к уравнениям (2.3) и (2.12) метода разделения переменных Фурье. В результате получается:

- на глубокой воде:

$$\text{потенциал скорости} \quad \varphi(x, z, t) = \frac{rg}{\omega} e^{kz} \cos(kx - \omega t), \quad (2.14)$$

$$\text{давление} \quad p(x, z, t) = \rho gr \cdot e^{kz} \sin(kx - \omega t); \quad (2.15)$$

- при ограниченной глубине:

$$\text{потенциал скорости} \quad \varphi(x, z, t) = \frac{rg}{\omega} \frac{ch(kz + kH)}{ch(kH)} \cos(kx - \omega t), \quad (2.16)$$

$$\text{давление} \quad p(x, z, t) = \rho gr \frac{ch(kz + kH)}{ch(kH)} \sin(kx - \omega t). \quad (2.17)$$

Профиль волн:

$$z_w(x, t) = r \cdot \sin(kx - \omega t), \quad (2.18)$$

где r – амплитуда волн, $\omega = 2\pi/\tau$ – круговая частота, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Гребни волн движутся вдоль оси x со скоростью c , называемой фазовой:

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{\tau_w}, \quad (2.20)$$

где τ_w – период волн.

Для волн на воде характерно свойство дисперсии (зависимость волнового числа от частоты):

$$\text{- на глубокой воде} \quad k = \omega^2/g; \quad (2.21)$$

$$\text{- при ограниченной глубине} \quad k \cdot th(kH) = \omega^2/g. \quad (2.22)$$

Свойство дисперсии означает, что волны разной частоты и длины имеют разные скорости, и поэтому они отделяются друг от друга: длинные волны убегают вперёд, а короткие волны отстают:

$$\text{- на глубокой воде} \quad c = \frac{g}{\omega} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \approx 1.25\sqrt{\lambda}; \quad (2.23)$$

$$\text{- при ограниченной глубине (рис. 2.8)} \quad c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} th\left(\frac{2\pi H}{\lambda}\right)}. \quad (2.24)$$

При малой глубине ($H/\lambda \rightarrow 0$) свойство дисперсии исчезает:

$$c = \sqrt{gH} . \quad (2.25)$$

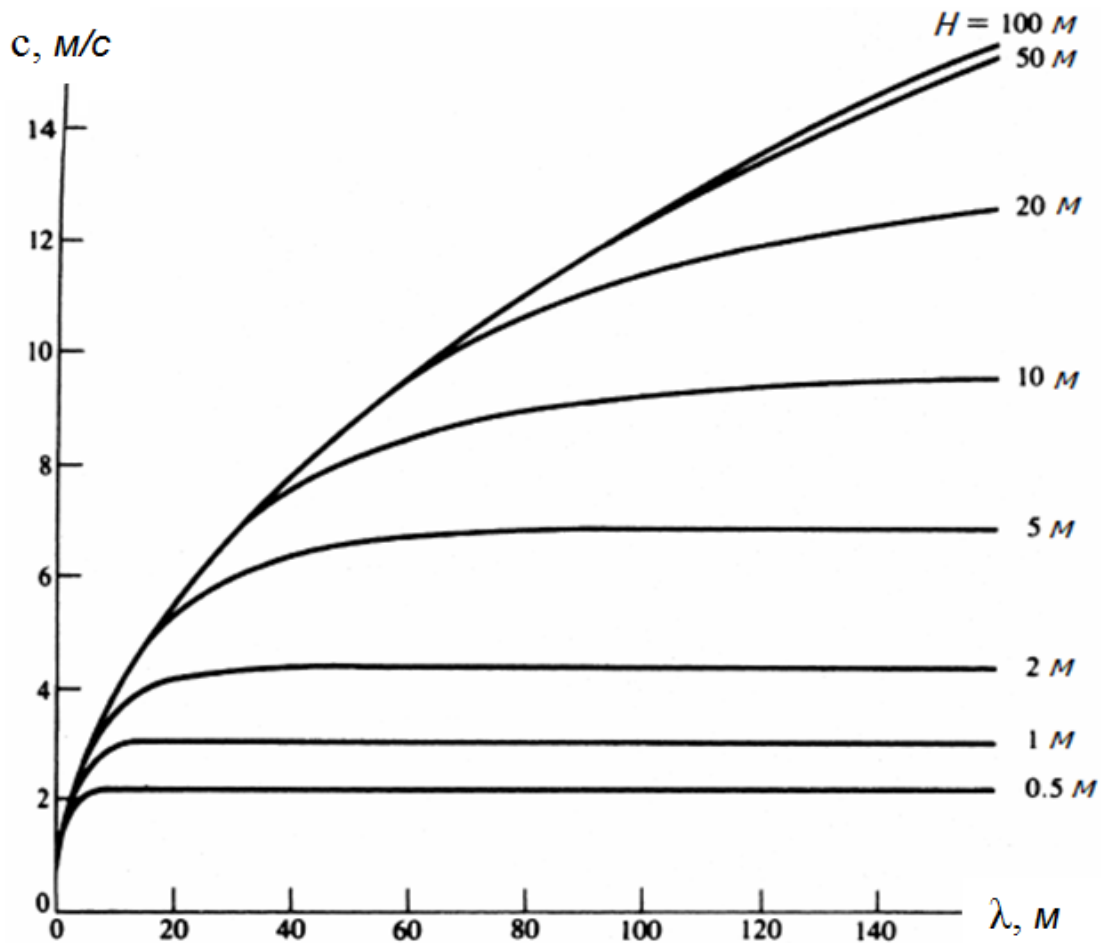


Рис. 2.8. Зависимость фазовой скорости волны от её длины

Линейная теория волн не устанавливает связи между высотой и длиной волны. В расчетах высоту волн задают, основываясь на статистических данных. В частности, находит применение эмпирическая формула Циммермана:

$$h_w = 0,17\lambda^{0,75} . \quad (2.26)$$

Крутизна h_w/λ обычно растёт с уменьшением длины волны.

Энергия одной волны на единицу длины её фронта:

$$E_1 = \frac{1}{2} \rho g r^2 \lambda . \quad (2.27)$$

Для приближенной оценки мощности одной волны средней крутизны ($h_w/\lambda \approx 1/20$) на единицу длины её фронта можно использовать формулу:

$$P_1 \approx (30 h_w)^{2,5}.$$

Нелинейные волны.

Строго говоря, теория волн малой амплитуды применима только для предварительных оценок при анализе работы преобразователей энергии волн.

Для более точного моделирования рекомендуется использовать теорию волн конечной амплитуды (теорию волн Стокса). Основная идея этой теории состоит в разложении уравнения волновой поверхности в ряд

$$z_w(x, t) = \frac{1}{k} \sum_n F_n(kH) \cos(kx - \omega t),$$

где $F_n(kH)$ – параметры формы волн, задаваемые таблично [13, с. 111].

Эта теория кроме волнового движения в принципе позволяет получить поступательное движение частиц жидкости в направлении распространения волны. Применение теории волн Стокса имеет смысл при $H/\lambda > 0.1$, так как сходимость рядов, описывающих волнение, ухудшается с уменьшением глубины моря.

Для акваторий с меньшими глубинами (при $H/\lambda < 0.1$) удовлетворительные результаты можно получить при использовании теории кноидальных волн Кортвега-де Фриза, согласно которой горизонтальная скорость и ускорение частиц воды не изменяются по глубине. Следовательно, и волновое давление постоянно высоте сооружения.

На рис. 2.9 показаны области применения рассмотренных волновых теорий при погрешности высоты гребня волны до 10 %. Отличительной особенностью нелинейных теорий является получаемая при их использовании большая высота и крутизна гребня волны.

Нерегулярность волн и изменчивость волнения.

В реальном волнении всегда накладываются друг на друга волны разной длины и частоты. Так как параметры нерегулярного волнения случайны, при их описании обычно применяются вероятностно-статистические методы. Вместе с тем развитое волнение имеет свойство стационарности. Это означает, что его вероятностные характеристики, полученные на достаточно больших выборках (порядка 1000 волн), остаются практически одинаковыми.

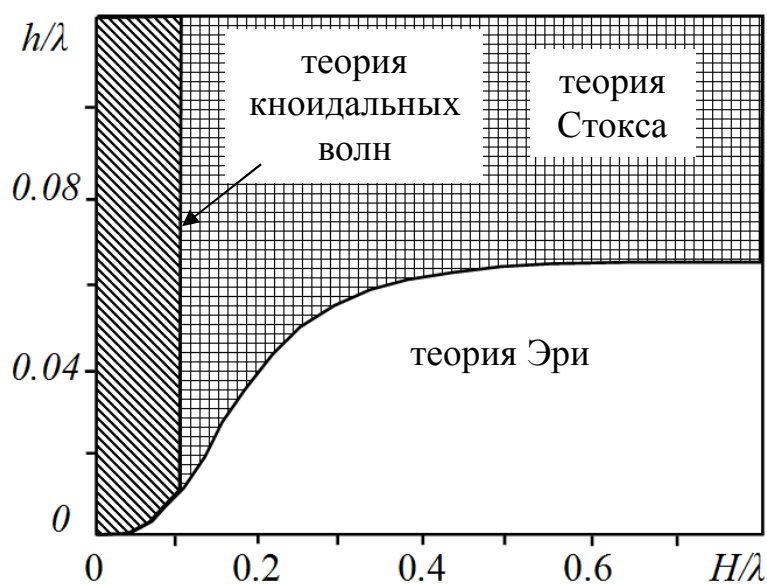


Рис. 2.9. Диаграмма применимости теорий волн

Хотя статистически стационарное состояние моря может быть описано высотой и периодом волн заданной обеспеченности, отдельные волны могут значительно различаться. При этом могут наблюдаться некоторые закономерные последовательности (группы) волн. Кроме нерегулярного характера волнения существует также изменчивость стационарных состояний волнения при изменениях погоды. Уровни мощности волнения изменяются в разных временных масштабах: от волны к волне (порядка секунд); в течение от часов до нескольких дней при изменении погоды (от местных ветровых условий или от прибытия волн из далеких штормов в океане), от сезона к сезону.

Наибольшая изменчивость состояния моря характерна в бассейнах окраинных морей умеренных широт. Здесь в разных сочетаниях наблюдаются волны различной природы: вызванные сезонными изменениями атмосферы; порожденные местными ветрами; приходящие из отдаленных просторов океана в виде зыби; разным образом трансформированные в зависимости от направления под влиянием течений, сложных очертаний берегов, островов, рельефа дна. Кроме того, дисперсия волн от шторма в открытом море (океане) на подходе к берегу постепенно изменяет параметры зыби (от длинных волн к более коротким).

Учёт изменчивости волновых режимов является ключевым при выборе типа и конструкции преобразователей энергии волн. Здесь неизбежен компромисс между недоиспользованием установленной мощ-

ности и чрезмерной потерей энергии волн при недостатке поглощаемой мощности. На рис. 2.10 представлен пример, иллюстрирующий снижение эффективности использования мощности нерегулярного волнения [93, с. 13].

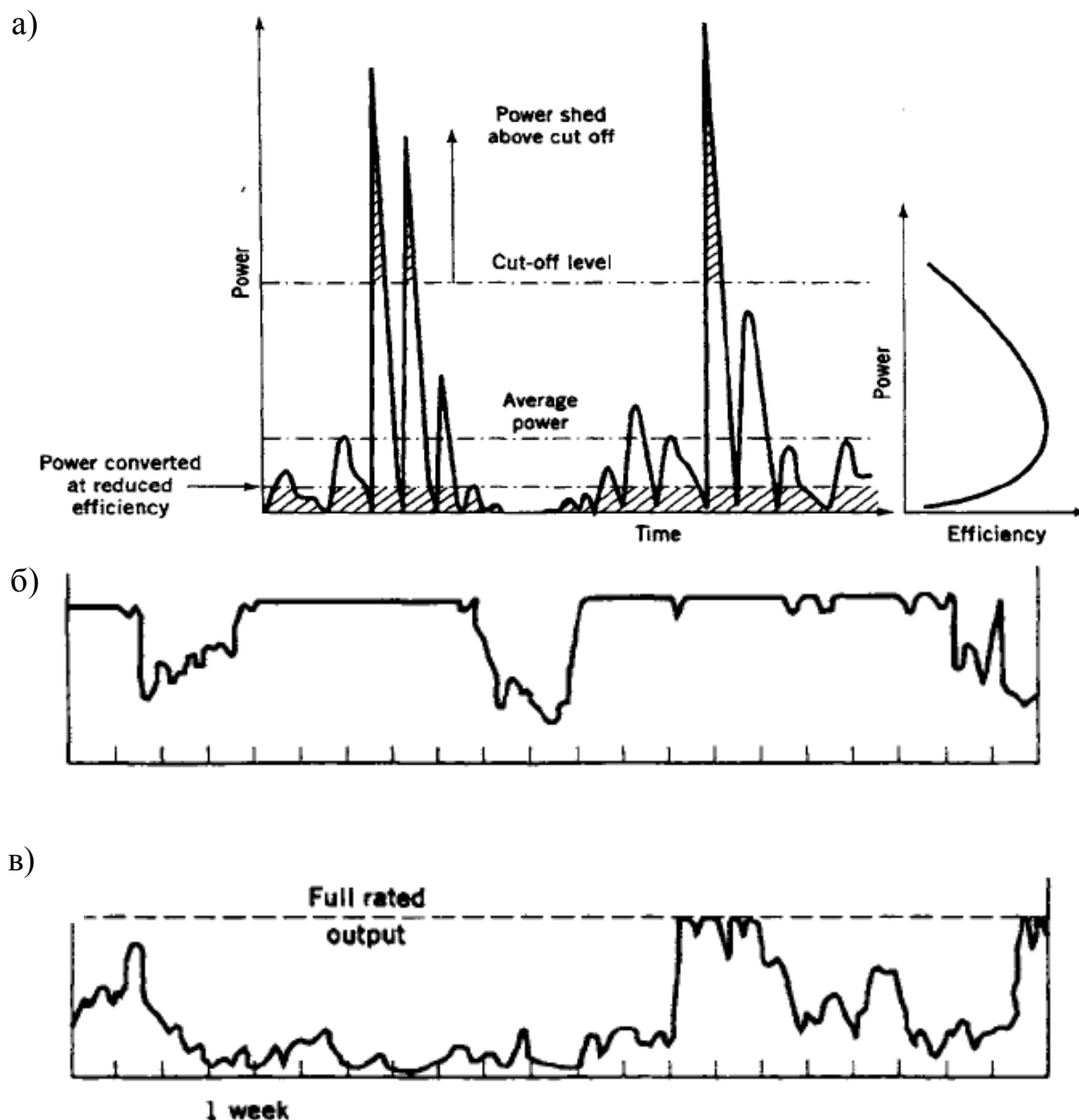


Рис. 2.10. Проблема эффективного использования мощности нерегулярного волнения [93, с. 13]: а – мощность волн и эффективность их использования; б – выходная мощность преобразователя в условиях зимнего шторма, когда большая часть энергии волн не используется; в – выходная мощность преобразователя при слабом волнении, характерном для летнего периода

На рис. 2.11 показана зависимость выходной мощности от значительной высоты волны для известной волновой электростанции «Pelamis» [85, с. 201], из которого видно, что её эффективное применение соответствует значительной высоте волн около 5 м.

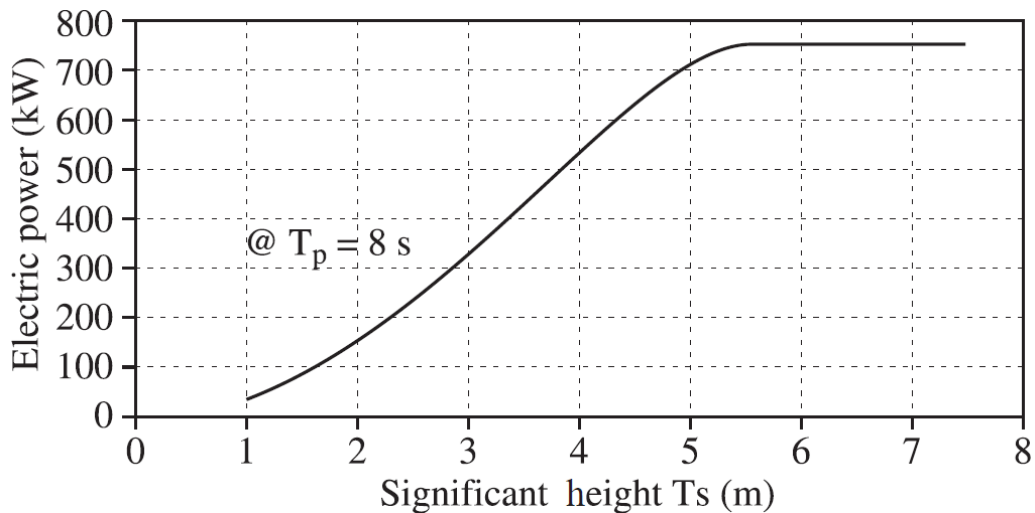


Рис. 2.11. Выходная мощность волновой электростанции «Pelamis P750» в зависимости от значительной высоты волны с периодом 8 с [85, с.201]

2.2. Физические процессы взаимодействия волн с откосным дном и неподвижной стенкой

Трансформация волн при их приближении к береговой черте.

Рассмотрим строение волн на подходе к пологому берегу подробнее. Различают четыре зоны трансформации волн по глубине водоема (рис. 2.10).

Первая зона – глубоководная с глубиной $H_1 > 0,5 \lambda$, где дно в этой зоне практически не влияет на форму и размеры волн.

Вторая зона – мелководная с глубиной $0,5\lambda > H_2 > H_{кр}$; где дно водоема начинает оказывать влияние на волновое движение воды. В этой зоне трехмерные волны под влиянием дна преобразуются в двухмерные. Критическая глубина $H_{кр}$ по разным оценкам связана с высотой прибойной волны h_3 соотношением: $H_{кр} \approx (1,1 \div 1,3) h_3$.

Третья зона – зона прибойных волн с глубинами $H_3 \leq H_{кр}$, в пределах которой начинается и завершается разрушение волн. В области критических глубин ($H \approx H_{кр}$) крутизна волны достигает предельной величины,

происходит опрокидывание гребня волны с образованием буруна. Вторая и третья зоны в некоторых случаях могут располагаться вдали от берега – в области повышения дна.

Четвертая зона – приурезная, в которой происходит окончательное разрушение волны и образование наката прибойного потока на берег (откос).

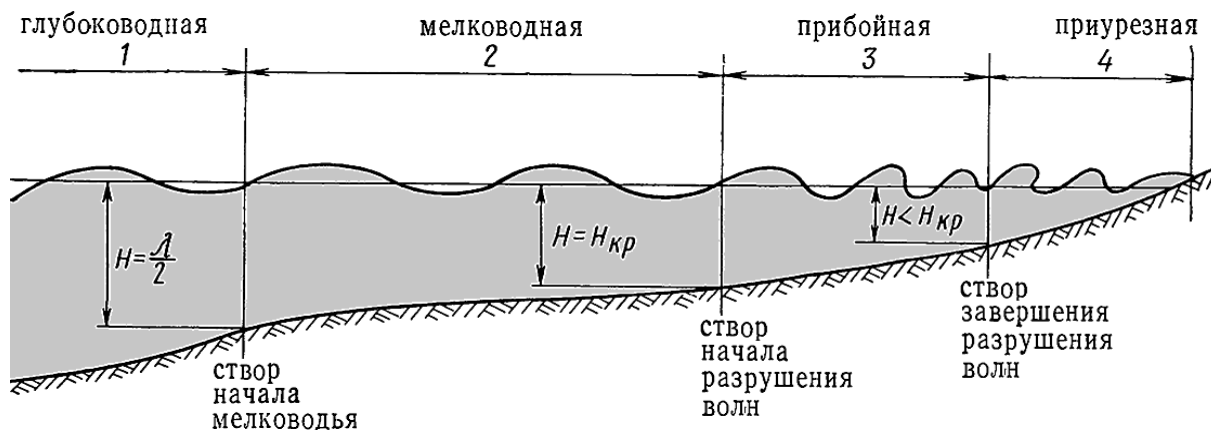


Рис. 2.10. Схема волнения при подходе к берегу

Физические процессы трансформации волн на подходе к пологому берегу достаточно полно изучены, отражены в учебной литературе и положены в основу нормативных требований, определяющих волновые нагрузки на гидротехнические сооружения [34, 36].

Различают три типа разрушения волн при подходе к берегу в зависимости от параметра ξ :

$$\xi = \frac{s}{\sqrt{h/\lambda}},$$

где s – крутизна откоса дна; h/λ – крутизны волны на глубине (рис. 2.11, 2.12):

- spilling breaker (скользящий бурун) – «растекание», «соскальзывание» крутых волн на пологой отмели с постепенной потерей энергии на трение о дно, при котором крутизна переднего склона увеличивается (рис. 2.13);

- plunging breaker (ныряющий бурун) – у менее крутых волн на отмели средней крутизны подошва волны тормозится интенсивнее, в результате чего гребень движется быстрее, высота его резко увеличивается, а передний склон нависает над подошвой и обрушивается, «ныряет» сверху вниз (прибой) (рис. 2.14);

- surging breaker – пологие волны на крутом откосе образуют «взброс» в виде подъема уровня за счёт отраженных от берега волн. Поскольку трение о дно в данном случае минимальное, волны замедляются меньше и обрушиваются на берег с большей силой. Наибольший взброс образуется на вертикальной стенке при полном отражении и образовании стоячих волн.

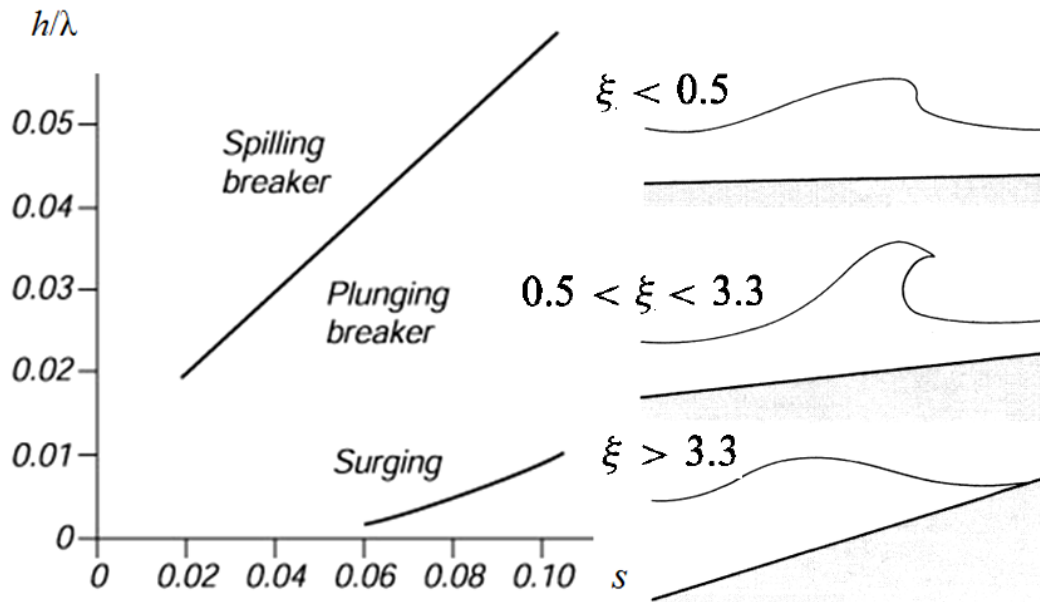


Рис. 2.11. Классификация разрушающихся волн [83]

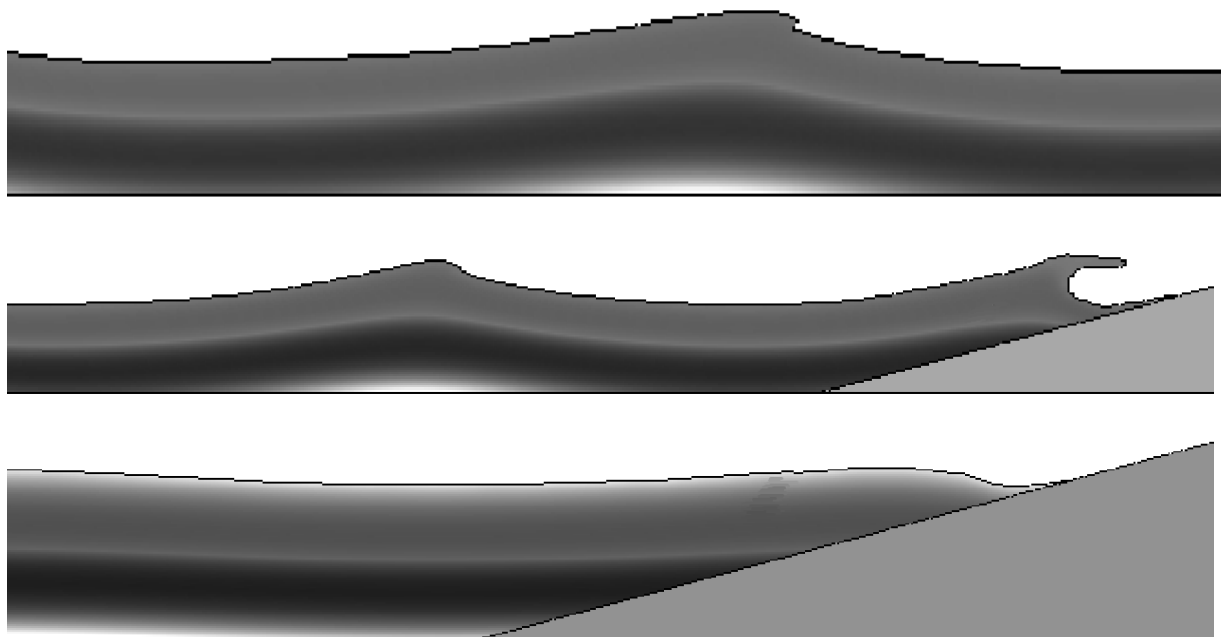


Рис. 2.12. Примеры разрушающихся волн



Рис. 2.13. Скользящие буруны (spilling breakers) [63]



Рис. 2.14. Ныряющий бурун (plunging breaker) [63]

Следует отметить, что, несмотря на рост высоты волн при их движении по откосу, уменьшение длины, а значит и скорости волн, обеспечивает баланс волновой энергии. Более того, преломление волн и их трение о дно приводит к существенному уменьшению энергии при подходе к берегу. Поэтому для получения большого количества волновой энергии необходимы волновые электростанции, расположенные на удалении от берега (в глубоководной зоне).

Однако в случае небольших энергетических потребностей (мощности порядка десятков кВт) наиболее интересны мелководные прибойные волны с максимальной концентрацией энергии в гребне либо приглубые прибрежные участки, особенно в сужающихся заливах, концентрирующие энергию в виде взбросов при отражении волн от крутых берегов.

Зависимость высоты взброса волны R от угла откоса θ для нелинейных крутых волн определяется формулой [83]

$$R = h \sqrt{\frac{\pi}{2\theta}} + \frac{h^2 \pi}{\lambda \cdot th(2\pi H/\lambda)}.$$

На рисунке 2.15 приведена эта зависимость.

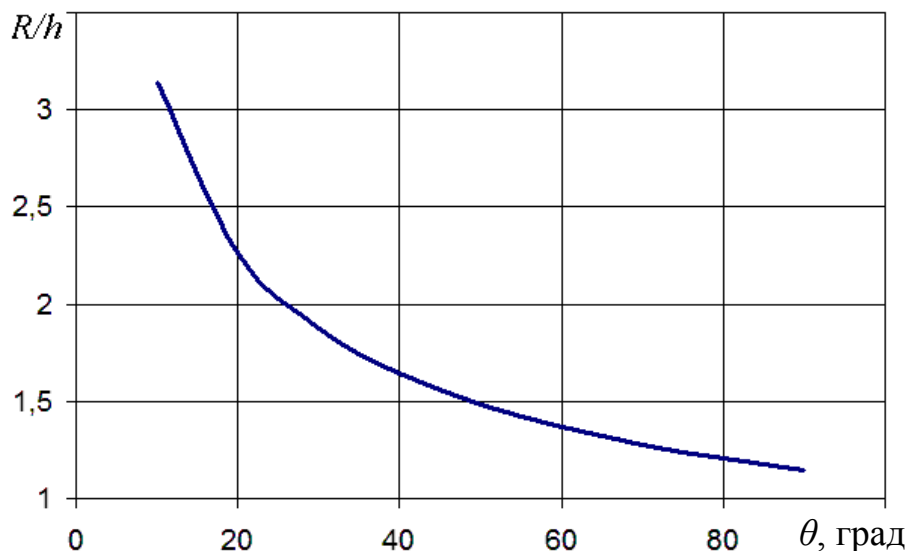


Рис. 2.15. Зависимость относительной высоты взброса волны от угла откоса

Волновые течения.

При взаимодействии ветровых волн с дном формируются прибрежные волновые течения. Эти течения могут быть поперечными и

продольными (вдольбереговыми). Поперечное течение к берегу возникает частично вследствие стока переноса масс к берегу, но главным образом в результате рассеяния волновой энергии и потери импульса. От берега образуются компенсационные противотечения и разрывные течения (rip currents) в виде узких струй.

Продольные течения условно делятся на энергетические, образуемые движением волн под углом к берегу, и градиентные, обусловленные изменениями среднего уровня [51, с. 77].

Изменения направления течений образуют так называемые циркуляционные ячейки, которые могут формироваться как в вертикальных, так и горизонтальных плоскостях, в зависимости от рельефа дна (рис. 2.16). Размеры ячеек горизонтальной циркуляции примерно соответствуют длине волны. При этом следует учитывать, что один и тот же участок берега может рассматриваться как сравнительно однородный по отношению к штормовому волнению, так и как неоднородный для небольшого волнения.

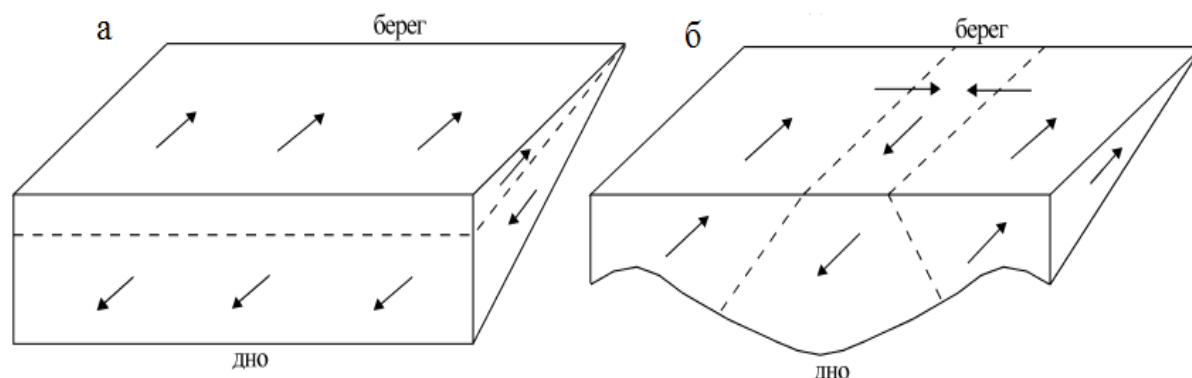


Рис. 2.16. Циркуляция воды в береговой зоне при однородной (а) и неоднородной (б) топографии дна [12, с. 195]

Разрывные течения, как видно на рис. 2.16, б, при наличии некоторого углубления, идущего от берега в виде канала, формируются именно в этом месте. Но они могут появляться и при однородной топографии дна. При этом характер их появления случайный, как по времени, так и по месту. Скорость этих течений составляет около 0,5 м/с, но при шторме может превышать 2,5 м/с. Причиной горизонтальной циркуляции с образованием разрывных течений является динамическая неустойчивость системы, в которой потенциальная энергия в виде волнового нагона равномерно распределяется вдоль берега.

Волновые нагрузки на стенку.

При рассмотрении взаимодействия волн с вертикальной стенкой различают четыре основных типа волнения: стоячие волны, волны переходного типа от стоячих к разбитым, разбитые волны и прибойные волны [28, с. 22].

Если волны подходят к сооружениям фронтально, то при достаточно большой глубине ($H > 0,5 \lambda$) у стенки вследствие интерференции прямой и отраженной волны образуется стоячая волна (рис. 2.4). При этом высота стоячей волны оказывается равной двукратной высоте подходящей волны.

При переходном режиме (на глубине ($H_{кр} < H < 0,5 \lambda$)) узлы и пучности волн горизонтально перемещаются (в отличие от стоячих волн). По мере уменьшения глубины над бермой H_6 горизонтальные составляющие скорости возрастают. В результате высота взброса волн на стенку значительно больше, чем при стоячих волнах (высота гребня значительно выше впадины). Такое явление наблюдается до глубины над бермой $H_6 = 1,25 h$. При дальнейшем уменьшении глубины H_6 гребни волн в пучностях поднимаются выше, воздействие волн на стену сопровождается всплесками с разрушением и отрывом гребня.

Наконец, при глубине $H_6 = 0,7h$ происходит удар разбитых волн о стенку с характерным хлопком (рис. 2.17). При этом пик давления достигает 1–2 МПа, а время нарастания давления уменьшается до 0,005 с.

При воздействии на вертикальную стенку прибойной волны $H_6 < 0,7 h$ давление носит, как и в случае разбитых волн, динамический характер, однако интенсивность его оказывается меньше (до 200–400 кПа), а время действия больше (около 0,05 с). Это объясняется демпфирующим действием пузырьков воздуха в разрушенном гребне прибойной волны.

Характер изменения наибольшего давления при различных типах воздействия волн на стенку приведён на рис. 2.18.

В случае линейной теории давление в волне определяется в виде (2.15) или (2.17). Эти формулы можно использовать в оценочных расчётах волновых нагрузок на сооружения. Их ограниченность определяется не только линейностью волнения, но и тем, что они не учитывают влияние сооружения на волнение.

Для определения проектных волновых воздействий на гидротехнические сооружения необходимо применять нормативные документы [34, 36]. Следует, однако, отметить, что расчётные нормативные нагрузки используются при проектировании гидротехнических сооружений с точки зрения их безопасности на воздействие экстремальных

волн малой обеспеченности. При проектировании волновых энергетических преобразователей необходимы данные о средних параметрах волн на конкретном месте установки.

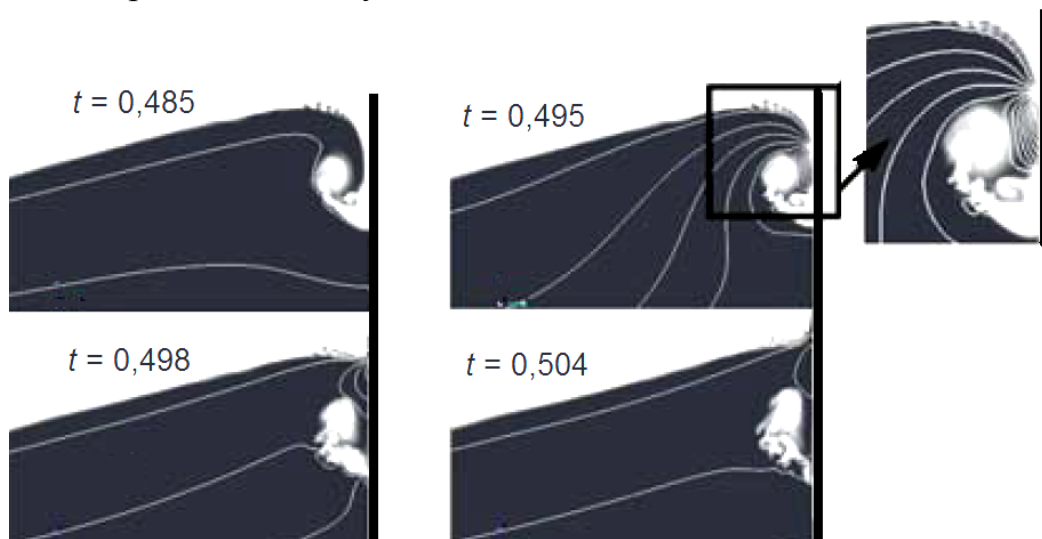


Рис. 2.17. Удар о стенку разбитой волны с хлопком [79, с. 733]

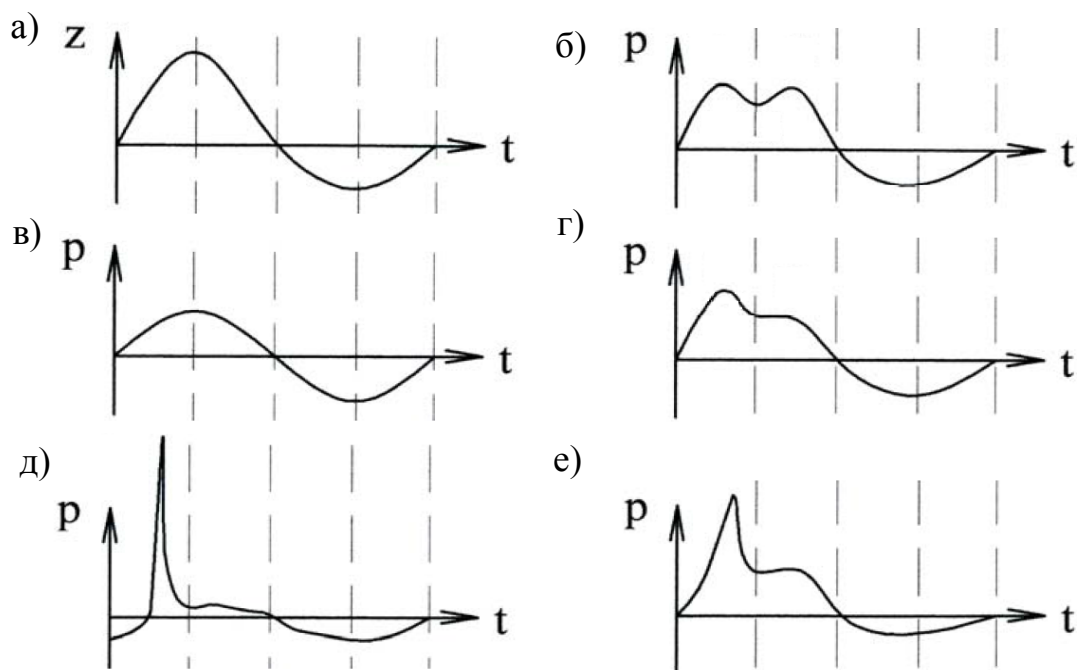


Рис. 2.18. Характер изменения наибольшего давления при различных типах волновых нагрузок на стенку [28, с. 55]:
 а – характер изменения уровня воды перед стенкой; б – стоячая волна при $H > H_{кр}$ и $H_0 > 2h$; в – стоячая волна при $H > H_{кр}$ и $H_0 \approx 2h$; г – переходный тип при $H > H_{кр}$ и $H_0 < 2h$; д – разбитая волна при $H > H_{кр}$ и $H_0 = 0,7h$; е – прибойная волна при $H < H_{кр}$

Согласно теории Морриса [80], при встрече волн с твёрдой стенкой колебания уровня воды происходят относительно горизонтальной плоскости, приподнятой на величину h_0 над уровнем тихой воды (рис. 2.19):

$$h_0 = \frac{\pi h^2}{\lambda} \operatorname{cth} \left(\frac{2\pi H}{\lambda} \right).$$

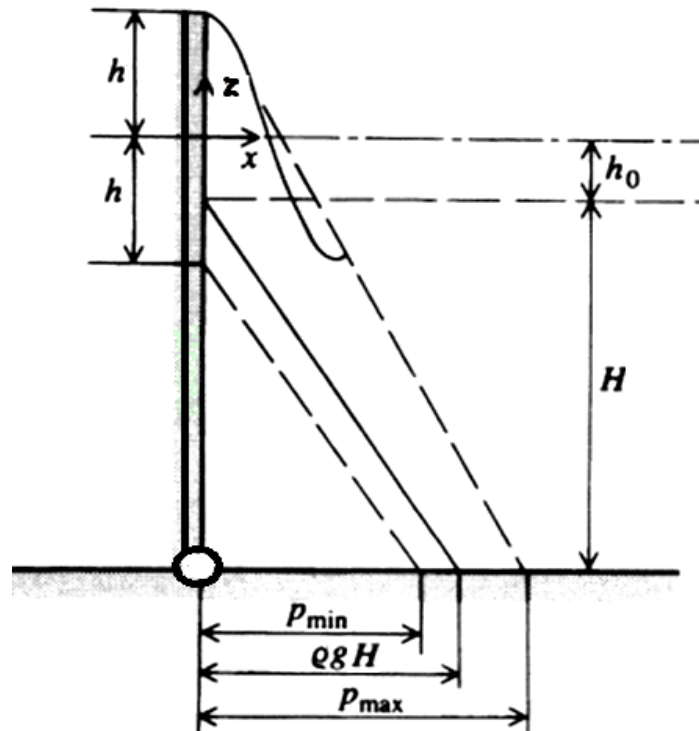


Рис. 2.19. К определению расчётных давлений

Гидростатическое и долговременное волновое давление определяется по формуле [83, с. 444]:

$$p = \rho \left[gh \cdot \frac{\operatorname{ch}(k(z+H))}{\operatorname{ch}(kH)} \cdot \sin(\omega t) + gz \right].$$

На дне ($z=H$), наибольшие давления равны

$$p = \rho g \left[\pm \frac{h}{\operatorname{ch}(kH)} + H \right].$$

Расчётная сила на единицу ширины волнового фронта:

$$F = \frac{1}{2} \rho g (H + h_0 + h) \left[\frac{h}{\operatorname{ch}(kH)} + H \right].$$

Расчётный момент в основании створки:

$$M = \frac{1}{6} \rho g (H + h_0 + h)^2 \left[\frac{h}{ch(kH)} + H \right].$$

Расчётное кратковременное (экстремальное) давление на конструкции створки от ударов обрушивающихся волн можно определить по методике Р.Р. Миникина [78, 83]. Учитывая, что длина обрушивающихся волн $\lambda \approx 10h$, давление на уровне тихой воды (рис. 2.20):

$$p_m = p_b + \frac{1}{2} \rho g h = 0,2 \pi \rho g^2 H + \frac{1}{2} \rho g h$$

Ударная сила получается интегрированием давлений по высоте створки.

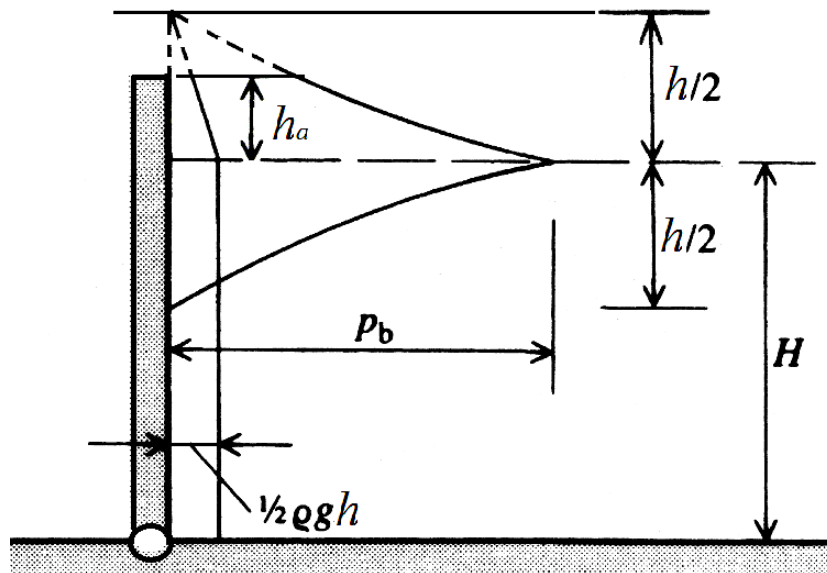


Рис. 2.20. К определению давлений от ударов обрушивающихся волн

Строительство сооружений в прибрежной части моря значительно изменяет первоначальную систему волн и течений. Это может привести как к положительному, так и к отрицательному эффекту. Для оптимизации работы гидротехнического сооружения (особенно волнового преобразователя) следует не просто учесть местные условия (характеристики подходящих волн, рельеф дна, очертания берега, параметры грунта), но и максимально их использовать. Это возможно на основе применения экспериментов (физических или компьютерных).

В случае неверного анализа влияния местных условий возможно не только снижение эффективности сооружения, но и нарушение его работы, особенно вследствие заносимости, увеличения ледовых воздействий, штормовых волн. Поглощение энергии волн может сказаться и на экологической обстановке в закрытой от волн акватории.

2.3. Физические процессы взаимодействия волн с плавающими объектами

Для моделирования взаимодействия волн с плавающими объектами можно использовать достаточно полно развитые теории и практические методики динамики судов на волнении. Традиционным здесь является использование аналитических моделей, основанных на линейной теории волн и качки. Эти модели позволяют получить простые и удобные на практике расчётные формулы и методики [1, 37].

Используя линейную теорию качки судов шесть уравнений качки плавающего объекта можно записать в корабельной системе координат в обобщённом виде:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_{PTO} = \mathbf{F} \quad (2.28)$$

где \mathbf{m} – матрица инерции (масс) объекта, $\ddot{\mathbf{q}}$ – вектор обобщённых ускорений, \mathbf{F}_{PTO} – силы сопротивления устройства отбора мощности волн (Power Take Off) волнового преобразователя, \mathbf{F} – вектор обобщённых внешних сил. Если преобразователь энергии волн состоит из нескольких связанных плавающих объектов, то вместо уравнения (2.28) следует рассматривать систему уравнений.

В правой части уравнения движения (2.28) сгруппированы внешние силы и моменты, включающие: вес объекта \mathbf{F}_G ; гидродинамические и гидростатические силы, обусловленные его взаимодействием с идеальной жидкостью \mathbf{F}_W ; не потенциальные силы сопротивления, обусловленные вязкостью жидкости и образованием вихрей \mathbf{F}_F :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_W + \mathbf{F}_F. \quad (2.29)$$

Следует отметить, что разделение гидродинамических сил на составляющие \mathbf{F}_W и \mathbf{F}_F является условным. Процессы обтекания объекта вязкой жидкостью (обычно сложные, включающие ламинарные, турбулентные и переходные потоки, крупные вихри, волнообразование и разрушение волн, кавитацию) с трудом поддаются строгому математическому описанию.

Вектор правой части системы определяется формулой (2.29), в которой потенциальное воздействие жидкости F_W , учитывая линейность задачи, можно получить суперпозицией отдельных составляющих (рис. 2.21):

$$F_W = F_{W0} + F_D + F_K + F_S, \quad (2.30)$$

где F_{W0} – силы воздействия на плавающий объект внешних волн в предположении, что поле волновых давлений не искажается его присутствием (силы Крылова – Фруда), F_D – дифракционные внешние силы (корректирующие гипотезу Крылова – Фруда), обусловленные тем, что плавающий объект искажает течение набегающих волн, F_K – гидродинамические силы, образующиеся при качке на тихой воде, F_S – гидростатические силы.

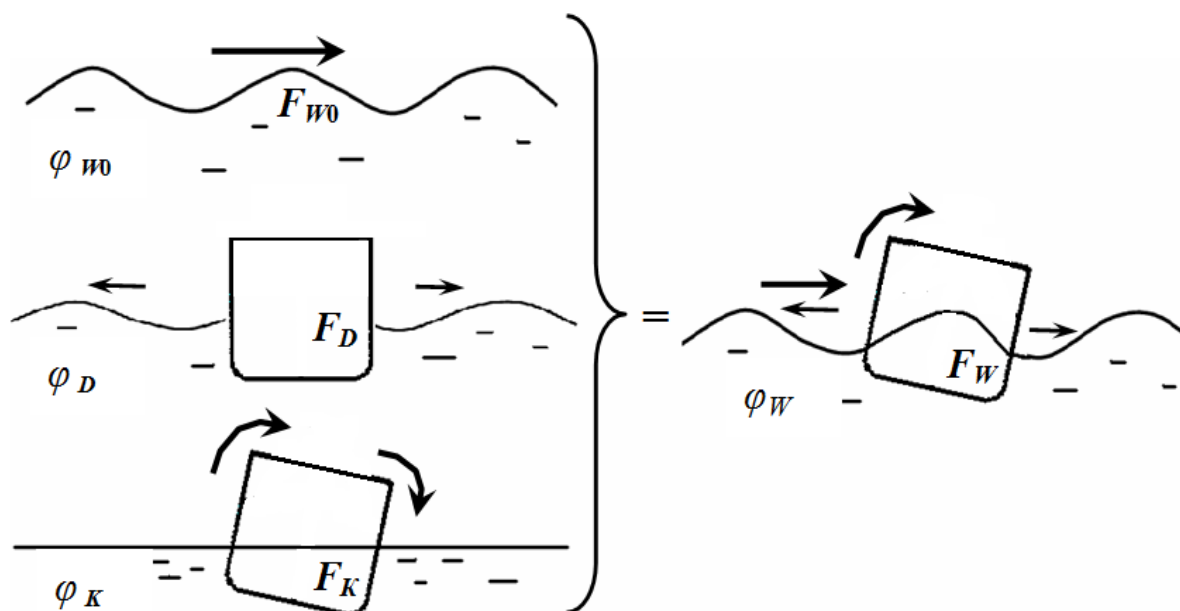


Рис. 2.21. Составляющие колебательных движений жидкости и гидродинамических сил в теории линейной качки

Внешние силы, в конечном счете, могут быть выражены в зависимости от параметров волн (высота, длина и пр.), а гидродинамические реакции на колебания плавающего объекта – от кинематических параметров качки (перемещения, скорости и ускорения). Тогда уравнения движения (2.28) можно представить в следующем виде

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{a} \dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{b} + \mathbf{b}_{\text{PTO}}) \mathbf{q} = F_{W0D} (h_w, \alpha_w), \quad (2.31)$$

где \mathbf{a} – матрица инерции жидкости (присоединённых масс), \mathbf{b} – матрица коэффициентов гидродинамического демпфирования, обусловленного

рассеянием энергии колебаний плавающего объекта расходящимися от него волнами, \mathbf{b}_{PTO} – коэффициенты сопротивления устройства отбора мощности, \mathbf{c} – матрица коэффициентов жёсткости (гидростатических сил), $\ddot{\mathbf{q}}$, $\dot{\mathbf{q}}$ и \mathbf{q} – векторы обобщённых ускорений, скоростей и перемещений, $\mathbf{F}_{\text{WOD}}(h_w, \alpha_w)$ – вектор внешних обобщённых сил, h_w, α_w – высота и наибольший угол склона волн.

Коэффициенты матриц присоединённых масс и демпфирования зависят от параметров формы плавающего объекта и частоты волн. Для практических расчётов они могут быть определены по справочным данным, приведённым в [1, 17, 37]. В общем виде матрицы присоединённых масс и демпфирования размером 6×6 являются заполненными.

Учитывая громоздкость общих уравнений линейной качки и их ограниченное прикладное значение, связанное с допущениями линейной теории, в инженерных расчётах обычно используются упрощённые уравнения частных видов качки. Они получаются, если пренебречь коэффициентами системы (2.31), связывающими уравнения. Практический интерес представляют уравнения вертикальной, бортовой и килевой качки (рис. 2.22).

Если плавающий объект симметричен относительно его продольной вертикальной плоскости, часть коэффициентов становятся равными нулю, в результате чего система шести уравнений (2.31) распадается на две независимые системы. Первая система, включающая нечётные уравнения (1, 3, 5), описывает продольную качку по степеням свободы η_1 , ζ и ψ (рис. 2.22). Вторая система уравнений (2, 4, 6) моделирует поперечную качку по степеням свободы η_2 , ϕ и χ .

- η_1 – продольные колебания (surging);
- η_2 – поперечные колебания (swaying);
- ζ – вертикальная качка (heaving);
- ϕ – бортовая качка (rolling);
- ψ – килевая качка (pitching);
- χ – рыскание (yawing).

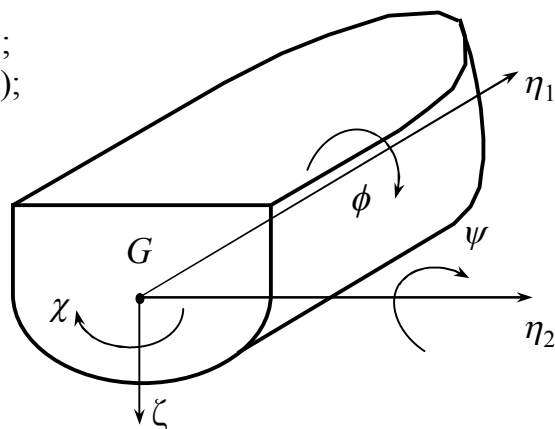


Рис. 2.22 Степени свободы при качке

Если плавающий объект имеет вытянутую форму в направлении, перпендикулярном волнам, то гидродинамические силы при его продольных горизонтальных колебаниях относительно малы и при анализе продольной качки обычно не учитываются. В результате продольная качка описывается системой двух уравнений (килевой и вертикальной качки).

$$\left. \begin{aligned} a_{33}\ddot{\zeta} + (b_{33} + b_{PTO3})\dot{\zeta} + c_{33}\zeta + a_{35}\ddot{\psi} + b_{35}\dot{\psi} + c_{35}\psi &= F_d \cos \omega_\kappa t + F_i \sin \omega_\kappa t; \\ a_{53}\ddot{\zeta} + b_{53}\dot{\zeta} + c_{53}\zeta + a_{55}\ddot{\psi} + (b_{55} + b_{PTO5})\dot{\psi} + c_{55}\psi &= M_d \cos \omega_\kappa t + M_i \sin \omega_\kappa t, \end{aligned} \right\}$$

где a_{ij} , b_{ij} и c_{ij} – присоединённые массы, коэффициенты демпфирования и гидростатических сил (матриц \mathbf{a} , \mathbf{b} и \mathbf{c} уравнений (2.31)), F_d , F_i , M_d и M_i – составляющие внешних сил и моментов, ω_κ – кажущаяся частота волн.

Удлиненный объект, плавающий вдоль волнового фронта, испытывает поперечную качку. Если он симметричен относительно поперечной вертикальной плоскости (мидель-шпангоута), центр масс лежит в этой плоскости, а удлинение большое, то из уравнений поперечной качки остаются связанными только уравнения бортовой и поперечно-горизонтальной качки (4 и 2). Но и эту систему можно упростить, рассматривая только уравнение бортовой качки и вводя приближённые поправки на влияние горизонтальных колебаний.

Уравнение вертикальной качки имеет простой вид, если при определении внешних сил считать, что плавающий объект располагается лагом к длинным волнам, существенно превышающим его ширину:

$$(m + a_{33})\ddot{\zeta} + (b_{33} + b_{PTO})\dot{\zeta} + \rho g S_0 \zeta = z_w (\rho g S_0 - a_{33} \omega_0^2 + i \omega_0 b_{33}), \quad (2.32)$$

где m – масса объекта, S_0 – площадь ватерлинии, $z_w = r e^{i\omega_0 t}$ – профиль волн, ω_0 – частота волн.

В случае качки буя в виде вертикального кругового цилиндра или полупогруженной сферы:

$$a_{33} = \frac{\pi \rho D^3}{6}; \quad b_{33} = \frac{\pi^2 \rho g^2 r^2 D}{8 a^2 \omega_0}; \quad S_0 = \frac{\pi D^2}{4}.$$

Уравнение бортовой качки приведем, пренебрегая дифракционными силами и считая, что центр масс объекта лежит близко к ватерлинии:

$$(I_{\xi\xi} + a_{44})\ddot{\phi} + (b_{44} + b_{PTO})\dot{\phi} + mgh \phi = mgh \kappa_\phi \alpha, \quad (2.33)$$

где h – поперечная начальная метацентрическая высота, κ_φ - поправочный коэффициент волнового момента [17, 18], $\alpha = \alpha_0 e^{i\omega_0 t}$ – угол волнового склона, $\alpha_0 = 2\pi r/\lambda$ – амплитуда угла волнового склона.

При отсутствии волнения в уравнениях (2.31) – (2.33) правые части равны нулю. Приближённые изолированные уравнения основных свободных колебаний имеют вид:

$$\begin{aligned} (m + a_{33})\ddot{\zeta} + b_{33}\dot{\zeta} + \rho g S_0 \zeta &= 0 ; \\ (I_{\xi\xi} + a_{44})\ddot{\phi} + b_{44}\dot{\phi} + mgh\phi &= 0 ; \\ (I_{\eta\eta} + a_{55})\ddot{\psi} + b_{55}\dot{\psi} + mgH\psi &= 0 , \end{aligned} \quad (2.34)$$

где H – продольная метацентрическая высота.

Такие однородные уравнения позволяют вычислить соответствующие собственные частоты ω и периоды $\tau = 2\pi/\omega$:

$$\tau_3 = 2\pi\sqrt{\frac{m + a_{33}}{\rho g S_0}} ; \quad \tau_4 = 2\pi\sqrt{\frac{I_{\xi\xi} + a_{44}}{mgh}} ; \quad \tau_5 = 2\pi\sqrt{\frac{I_{\eta\eta} + a_{55}}{mgH}} . \quad (2.35)$$

Учитывая влияние на бортовую качку поперечно-горизонтальных колебаний, её собственная частота несколько больше (на 7 – 8 %). Соответствующий период определяется по формуле:

$$\tau_4 = 2\pi\sqrt{\frac{I_{\xi\xi} + a_{44} - (a_{24}^2/(m + a_{22}))}{mgh}} .$$

Вычисление собственных периодов качки по формулам (2.35) затрудняется тем, что входящие в них присоединённые массы a_{ij} сами зависят от периодов качки, что требует применения метода последовательных приближений.

Характер поперечной качки зависит в первую очередь от отношения частоты волнения к собственным частотам бортовой и вертикальной качки.

При вынужденном крене плавучего объекта с углом φ возникает восстанавливающий момент M_φ , обусловленный противодействием силы веса и архимедовой силы с некоторым плечом l :

$$M_\varphi = mgl = mgh \cdot \sin \varphi . \quad (2.36)$$

Здесь $h = r_c - a$ – поперечная начальная метацентрическая высота, r_c – поперечный метацентрический радиус, a – расстояние между центром тяжести и центром величины при положении объекта на тихой воде.

Метацентрический радиус r_c прямо пропорционален моменту инерции площади ватерлинии I_x :

$$r_c = I_x / V, \quad (2.37)$$

где V – объёмное водоизмещение объекта. Тогда формулу (2.36) можно представить в виде:

$$M_\varphi = \rho g I_x \cdot \sin \varphi - mga \cdot \sin \varphi = M_\phi + M_\epsilon. \quad (2.38)$$

Здесь первое слагаемое называется моментом остойчивости формы, второе – моментом остойчивости веса.

Плот имеет большой момент остойчивости формы, в то время как M_ϵ близок к нулю (центр тяжести почти совпадает с центром величины. Большой остойчивостью формы обладает также катамаран – из-за большого значения I_x . Большую остойчивость веса имеет буй – благодаря хвостовику с балластом под корпусом.

Большинство плавучих преобразователей энергии волн проектируются под один вид качки, под который настраивается собственный период качки. При хорошей остойчивости формы наблюдается преимущественно бортовая или килевая качка, при которой основная плоскость плота огибает волновую поверхность (рис. 2.23). При большой остойчивости веса и малой остойчивости формы (буй) наблюдается преимущественно вертикальная качка без существенного крена (рис. 2.24).

Рассмотрим далее, при каких параметрах качки обеспечивается наиболее эффективный отбор энергии волн на примере колебаний линейной системы с одной степенью свободы. Её перемещение при гармоническом возбуждении $F(t) = F_a \cos \omega t$:

$$\zeta = \frac{F_a (c - \omega^2 m)}{(c - \omega^2 m)^2 + \omega^2 b^2} \cos \omega t + \frac{F_a \omega b}{(c - \omega^2 m)^2 + \omega^2 b^2} \sin \omega t,$$

где c , m и b – коэффициенты жёсткости, масс и сопротивления соответственно.

Дифференцирование этого выражения по времени определяет скорость перемещения системы

$$\dot{\zeta} = \frac{-\omega F_a (c - \omega^2 m)}{(c - \omega^2 m)^2 + \omega^2 b^2} \sin \omega t + \frac{F_a \omega^2 b}{(c - \omega^2 m)^2 + \omega^2 b^2} \cos \omega t.$$

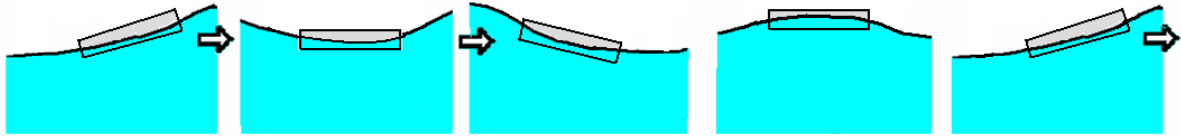


Рис. 2.23. Поперечная качка плота

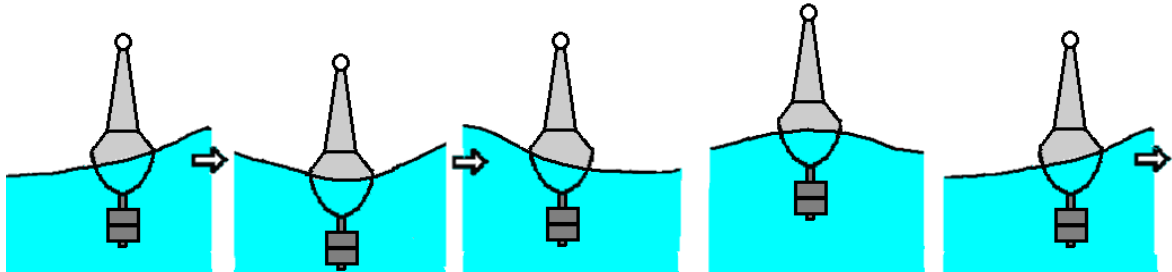


Рис. 2.24. Поперечная качка боя

Общее количество энергии, поглощённое сопротивлением

$$E = \int_0^{2\pi/\omega} b \dot{\zeta}^2 dt = \frac{\pi F_a^2 \omega b}{(c - \omega^2 m)^2 + \omega^2 b^2}.$$

На рис. 2.25 приведен пример зависимости амплитуды колебаний и поглощения энергии волн от сопротивления системы, из которого видно, что наибольшее поглощение энергии происходит при сопротивлении системы, соответствующем колебаниям с амплитудой, составляющей около 60 – 70 % от максимальной амплитуды (при отсутствии сопротивления).

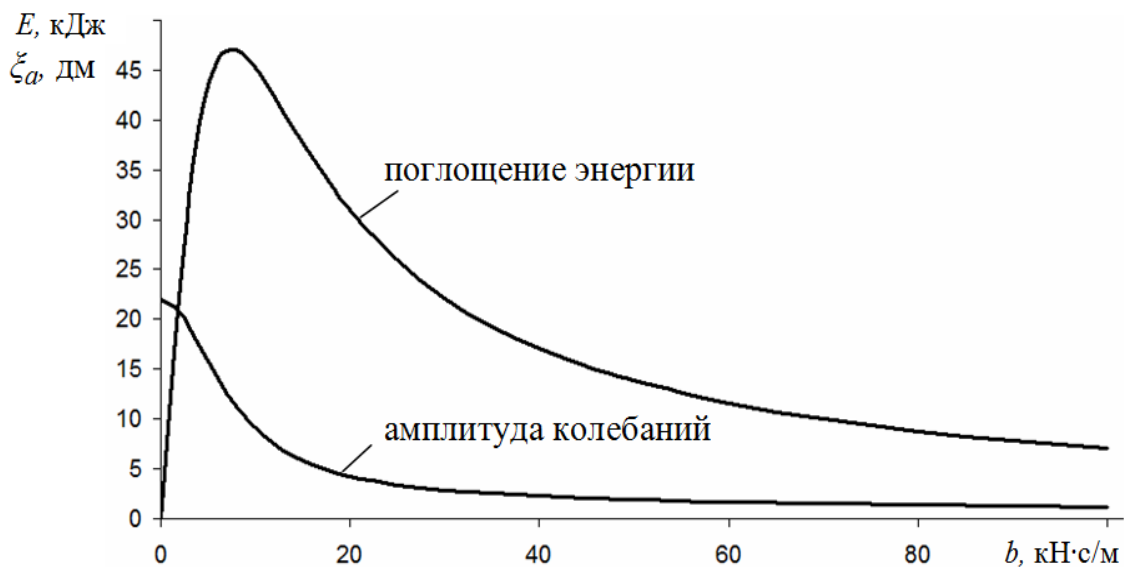


Рис. 2.25. Зависимости амплитуды колебаний и поглощения энергии волн от сопротивления плавучего преобразователя энергии

2.4. Обобщения

В соответствии с законом сохранения энергии «приёмник» энергии волн должен уменьшать количество энергии в море, то есть гасить волны.

Неподвижное препятствие в основном трансформирует энергию волн путём отражения, преломления, «захвата» потенциальной энергии волн или преобразования кинетической энергии волн в потенциальную энергию (путем формирования гидростатического напора). Гашение энергии неподвижным препятствием обеспечивается за счёт сил трения, причём эта энергия не попадает в «приёмник», а теряется (вихреобразование, разрушение гребней, трение о дно и движение наносов и пр.). Таким образом, для наиболее полного приёма энергии волн необходимо:

- 1) максимально уменьшить потери энергии на трение;
- 2) иметь поглотитель энергии волн, мощность поглощения которого соответствует мощности волны.

Если преобразователь энергии волн подвижный, то он непосредственно использует кинетическую энергию волн. В этом случае, чтобы морские волны успокоились, поглощающее их устройство должно иметь конструкцию, обеспечивающую способность генерировать такие же по мощности волны. «Для того чтобы колебательная система была хорошим поглотителем волны она должна быть хорошим генератором волны» [65, с. 4]. Отсюда можно сделать вывод о том, что наиболее эффективные подвижные приёмники энергии волн по своим параметрам должны соответствовать наиболее эффективным волнопродукторам.

Учёт изменчивости волновых режимов является ключевым при выборе типа и конструкции преобразователей. Здесь неизбежен компромисс между недоиспользованием установленной мощности и чрезмерной потерей энергии волн при недостатке поглощаемой мощности. Поскольку море большую часть времени имеет энергию волн, меньшую ее среднего значения, преобразователь энергии волн должен проектироваться с наибольшим к.п.д. при этом пониженном уровне входной мощности. С учетом этого, повышения эффективности волновых преобразователей можно добиться либо путём комбинации разных типов преобразователей, рассчитанных на разные уровни волнения, либо путём выбора места установки преобразователя в районах, где изменчивость и нерегулярность волнения меньше.

В прибрежной области степень нерегулярности волнения уменьшается, а их направление упорядочивается по отношению к линии берега. Крупные волны теряют свою разрушительную силу. Другими словами, морское дно в прибрежном районе можно рассматривать как фильтр, который выделяет эксплуатационные волны. Таким образом, разница между валовой и эксплуатационной энергией волн в прибрежной зоне меньше, чем в открытом море. С этой точки зрения небольшие прибрежные волновые электростанции являются не менее привлекательными, чем крупные установки для открытого моря.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ВОЛН

3.1. Обзор классификаций по различным принципам

В наиболее общем виде схема любого преобразователя энергии волн может быть схематически представлена так, как на рис. 3.1.

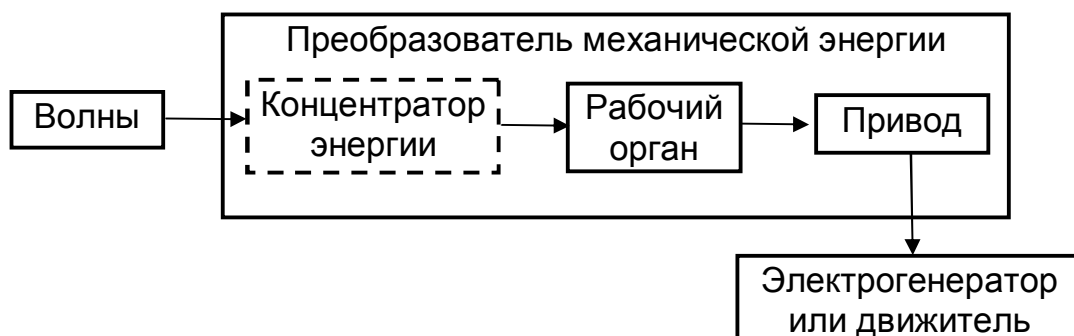


Рис. 3.1. Общая структура преобразователя энергии волн

Однако в отличие от ветровых турбин, существует широкий спектр принципиально отличающихся конструкций и технологий преобразования энергии волн, полученных на основе большого количества изобретений [4, с. 28; 16, с. 132; 72, с. 435]. Эти отличия определяются принципами действия, размерами, формой, конструкцией, расположением по глубине и относительно береговой линии. Имеются более ста проектов на различных стадиях развития, и их число растет: новые концепции и технологии заменяют или развивают те, от которых в настоящее время отказались.

Европейский исследовательский центр морской энергии (European Marine Energy Centre – ЕМЕС) в 2008 году принял деление преобразователей энергии волн на 6 категорий [62]:

- Point absorbers – точечные преобразователи на основе буёв;
- Attenuators (surface following) – на основе линейных плавучих изгибаемых элементов (шарнирных или гибких), расположенных по ходу движения волн;
- Oscillating wave surge converters (OWSC) – системы с элементами обычно в виде створок на шарнирах, раскачивающихся от поступательного движения волн;

- Oscillating Water Columns (OWC) – на основе колонны с осциллирующим внутри водным столбом;
- Overtopping Wave Energy Converters (OWEC) или Terminators – системы с бассейнами, заполняемыми путём перелива гребней волн через край;
- Submerged pressure differential – заглубленные конструкции, использующие волновое давление на поверхность.

В настоящее время введены новые категории:

- Bulge wave – эластичные изгибаемые «шланги», через которые происходит «прокачка» воды за счёт волнового давления;
- Rotating mass – плавучие качающиеся устройства с вращающимися массами, использующие реакции от прецессии гироскопа;
- в отдельную категорию включены уникальные устройства, принципиально отличающиеся от тех, которые перечислены выше.

Эта относительно свободная классификация преобразователей энергии волн основана на основных принципах их действия и распространённости на практике. Однако она недостаточно полна, глубока и системна для её применения, как в научно-исследовательской, так и в проектной деятельности.

Проект WaveNet европейского сообщества по энергии волн (European Thematic Network on Wave Energy) классифицирует волновые преобразователи по принципам действия (P) и расположению (L) [59, с. 106]:

- P1: Oscillating Water Columns (OWC);
- P2: Wave activated bodies. Этот класс объединяет все системы с подвижными элементами, раскачиваемыми волнами;
- P3: Overtopping Wave Energy Converters (OWEC);
- P4: Unclassifiable (неклассифицируемые устройства, не принадлежащие ни к одной из вышеуказанных категорий);
- L1: Shoreline (непосредственно связанные с берегом);
- L2: Nearshore (расположенные вблизи берега или в море на ограниченной глубине);
- L2: Offshore (плавающие в открытом море).

С другой стороны, во многих работах предложены более полные классификации преобразователей энергии волн [4, 5, 7, 16, 20, 81, 87], однако зачастую они существенно различаются. На рис. 3.2 представлена классификация на основе работы А. Фалькао [64, с. 899].

Г. Хагерман [70, с. 2859] в основе классификации преобразователей определил сочетание нескольких признаков (рис. 3.3):

– формы колебаний первичных рабочих элементов (непосредственно подверженных волновым нагрузкам): колебания по линии движения волн (surge), вертикальная качка (heave), угловые колебания (pitch), а также сочетания этих движений;

– тип поглощающей энергию волн поверхности: твёрдая, упругая или свободная поверхность (признак А);

– способ формирования реактивных сил (признак В): инерция конструкции, якорные системы, жестко фиксированные конструкции.

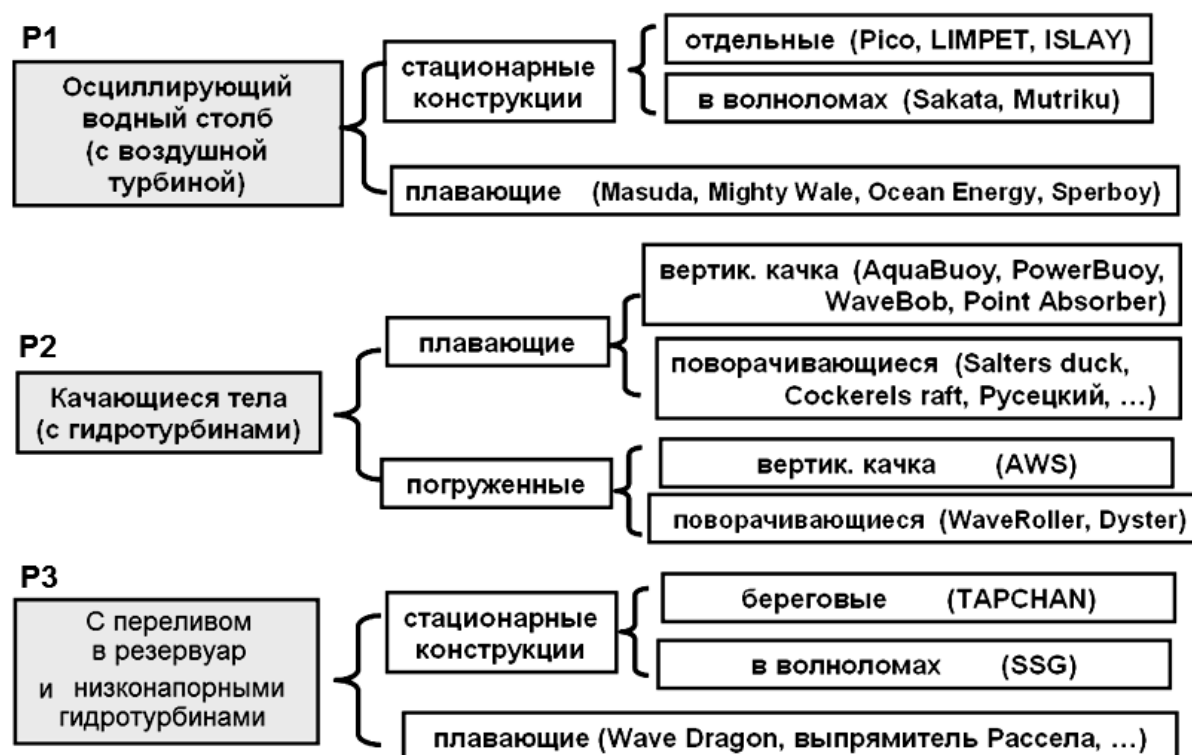


Рис. 3.2. Классификация преобразователей энергии волн по принципам действия

Дж. Брук [93] дополнил классификацию Г. Хагермана (табл. 3.1), определив условия размещения преобразователей (на берегу, вблизи берега на ограниченной глубине и на удалении от берега).

Выбор преобразователя в первую очередь зависит от места расположения и соответствующих волновых условий. Он может быть расположен на берегу, частично выше или частично ниже среднего уровня воды, полностью погружен или размещен на дне. Кроме того, устройство может быть заякорено в плавающем положении или в несколько заглубленном положении, в мелководном, прибрежном районе или в открытом море.

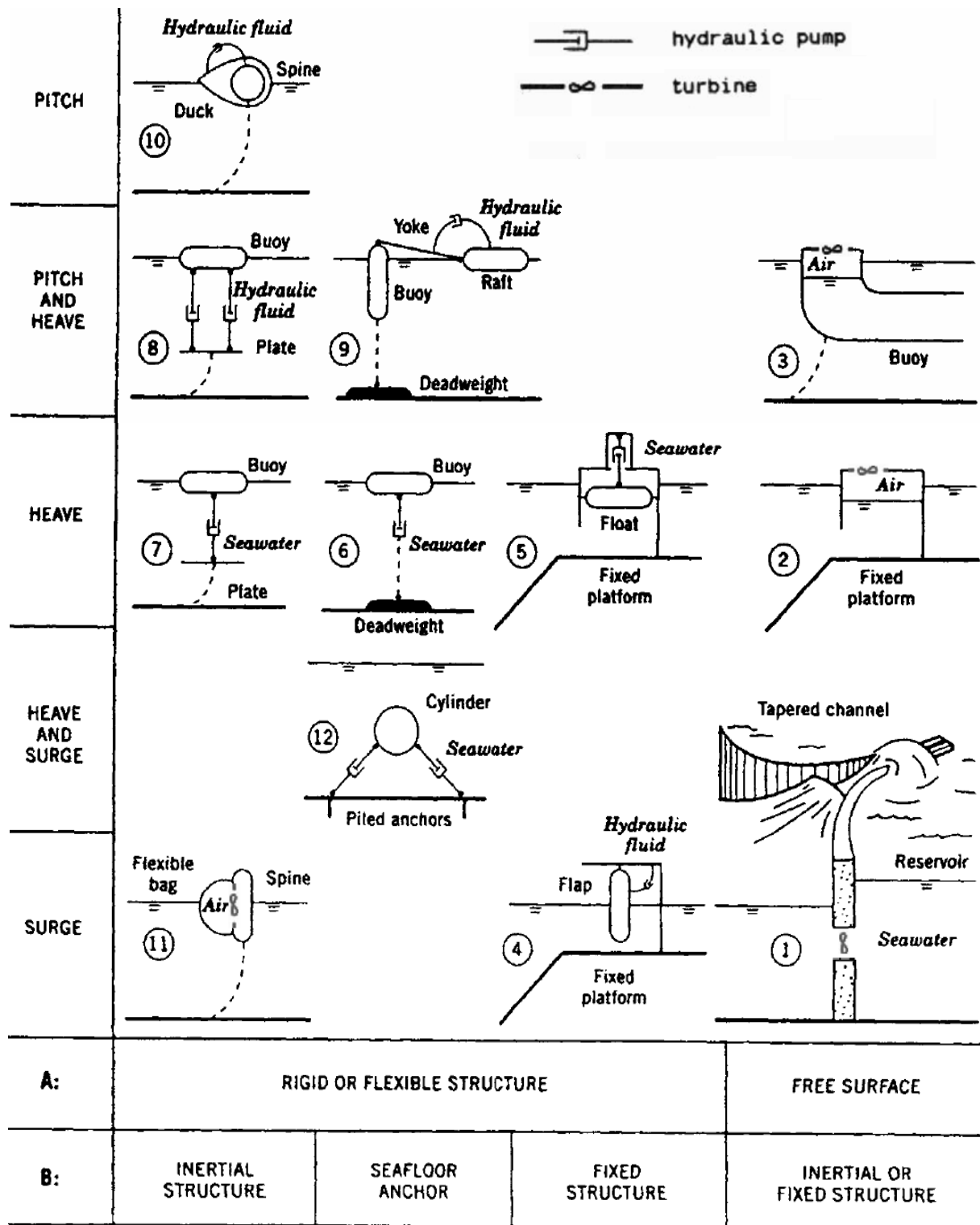


Рис. 3.3. Классификация процессов преобразования энергии волн на основе форм колебаний, типов элементов, поглощающих энергию волн (A), а также способов формирования реактивных сил (B) [70, 93]

Таблица 3.1

Классификация преобразователей энергии волн Дж. Брука [93]

Но- мер	Типы преобразователей энергии волн	Номер на рис. 3.3
1. Расположение у берега (Onshore)		
1.1	Фиксированный осциллирующий водный столб (OWC)	2
1.2	Система с концентратором (сужающимся и откосным каналом) и переливом гребней волн в резервуар (OWEC)	1
1.3	Система с поворотной створкой (OWSC)	4
2. Вблизи берега на ограниченной глубине (Near-shore to Offshore)		
2.1	Свободно плавающий осциллирующий водный столб (OWC)	3
2.2	Заякоренный плавающий осциллирующий водный столб (OWC)	3
2.3	Закрепленный на дне осциллирующий водный столб (OWC)	2
2.4	Система с непосредственным переливом гребней волн в резервуар (OWEC)	1
2.5	Гибкая конструкция, использующая волновое давление на поверхность	11
2.6	Заякоренный подводный плавучий абсорбер	12
2.7	Качающийся поплавковый преобразователь в закреплённой на дне или заякоренной кессонной камере	5
2.8	Плавающий сочлененный цилиндр с взаимной реактивной силой	
3. На удалении от берега (Offshore)		
3.1	Свободно качающийся буй с закреплением на дне моря	6
3.2	Свободно качающийся буй с закреплением на подводной плите	7
3.3	Качающийся плот с закреплением на подводной плите	8
3.4	Плот, качающийся относительно заякоренного буя	9
3.5	Качающийся поплавок с взаимной реактивной силой	10
3.6	Гибкая подводная конструкция, использующая волновое давление на поверхность	11
3.7	Конструкция с подводным пульсирующим объемом, с закреплением на дне моря	

Следует отметить, что до сих пор нет чёткой классификации волновых преобразователей по условиям их размещения, позволяющей достаточно обоснованно выбирать тип и основные проектные параметры системы.

Распространённый принцип классификации волновых преобразователей введён М. Френчем [69]. Он основан на их функциональной декомпозиции по четырем основным признакам:

- тип рабочих поверхностей: твёрдые, гибкие или воздушные;
- тип связей (реакций): закрепленные, например, к морскому дну или берегу; балансирующие; инерционные;
- конфигурация (форма взаимодействия с волнами): terminator (прерыватель – протяжённая конструкция, расположенная параллельно фронту волн); attenuator (поглотитель – линейная конструкция, расположенная нормально к фронту волн); point-absorber (точечный поглотитель);
- способ извлечения энергии: пневматический; гидравлический; прямой электрический.

С. Солтер и др. [88, с. 3] предложили классификацию по подсистемам, среди которых можно выделить:

- первичные преобразователи с медленными перемещениями (с частотой волн): поплавки; створки; шарнирные плоты; водяные столбы и т.п.;
- средства формирования реактивных сил: крепления; балансирующие и инерционные устройства (грузы, противовесы, гироскопы); системы инерции водных масс (водяные столбы, цистерны);
- соединительные элементы, передающие рабочие усилия и предотвращающие опасные нагрузки;
- устройства контроля, регулирования рабочих параметров и направления потоков и воздействий;
- генераторы: быстро движущиеся и направленные элементы, приводящие в движение электрические машины;
- трансмиссии: кабели, трансформаторы, редукторы, и распределительные устройства для передачи энергии на берег.

Фактически классификация С. Солтера также основана на функциональной декомпозиции, как и у М. Френча, однако она систематизирует не функции, а подсистемы, выполняющие функциональные задачи, касающиеся преобразования и передачи энергии, а также управления процессами.

3.2. Последовательности преобразований. Вепольные структуры

Анализируя различные классификации преобразователей энергии волн, представленные во многих работах [4, 7, 16, 20], можно прийти к выводу, что они существенно различаются не только по элементам классов, но и по принципам классификации. В результате получается довольно пёстрая и сложная картина в виде множества предложений и патентов, из которой, тем не менее, «выпадают» некоторые интересные идеи, не укладывающиеся в рамки классификаций.

Причиной этого является сложность физических процессов и вытекающая отсюда сложность большинства устройств, в которых используются одновременно несколько типов преобразований энергии. Так, в работах [20, 93] отмечается наличие первичных и вторичных преобразователей: «Первичные преобразователи – преобразователи, осуществляющие преобразования энергии волн в поток энергоносителя или механический момент. Вторичные преобразователи применяются для преобразования энергии рабочего тела – энергоносителя, или механического момента в электрическую, или другие виды энергии» [20].

А. А. Е. Price [84, с. 22] выделяет три стадии передачи энергии (рис. 3.4):

- 1) поток энергии волн и её приём первичным преобразователем;
- 2) поток энергии от первичного преобразователя к устройству отбора мощности (РТО) и её отбор;
- 3) поток энергии от РТО и её окончательное преобразование.

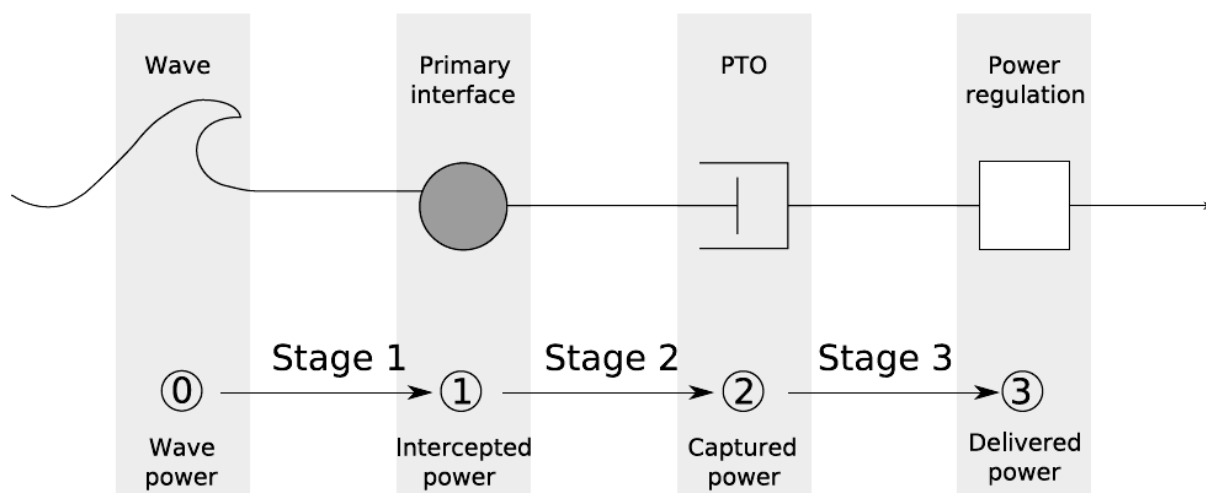
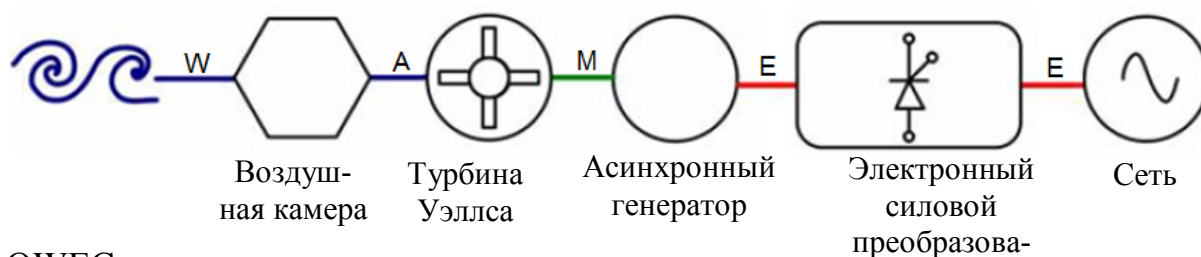


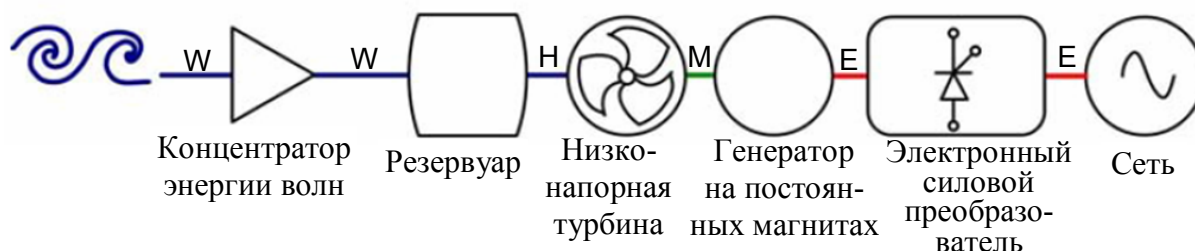
Рис. 3.4. Последовательность преобразования энергии волн [14]

В работе [53; 86, с. 273] рассмотрена классификация преобразователей энергии волн на основе структурных моделей, примеры которых приведены на рис. 3.5. Анализ таких моделей выполнялся в целях выбора сценариев развития энергетической системы штата Орегон (США).

OWC:



OWEC:



OWSC:

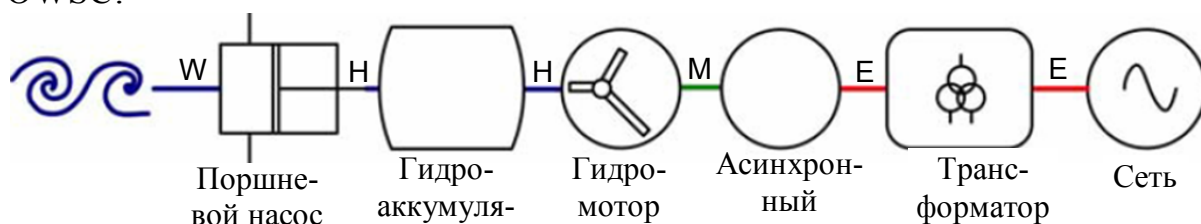


Рис. 3.5. Примеры структурных моделей преобразователей (W – энергия волн, А – энергия сжатого воздуха, М – механическая энергия, Н – гидравлическая энергия, Е – электрическая энергия)

Выделим четыре типа (уровня) преобразований (см. рис. 3.1):

- нулевой уровень – концентрация энергии волн путём изменения их входных параметров;
- первый уровень – передача энергии волн рабочему органу (первичному преобразователю);
- второй уровень – преобразование энергии рабочего органа и её передача электрогенератору через устройство привода (трансмиссии, РТО);

– третий уровень – преобразование механической энергии в электрическую (в генераторе).

Здесь мы ограничились сложностью, не рассматривая всю систему «волновая электростанция». На самом деле далее присутствуют и последующие этапы, связанные с преобразованиями и аккумулярованием электрического тока. Кроме того, в отдельных случаях могут быть выделены подпроцессы и дополнительные параллельные процессы, в частности, управление потоками энергии, защита от экстремальных нагрузок и др.

Таким образом, преобразователи энергии волн следует рассматривать как сложные системы, состоящие из связанных подсистем, принципы классификации которых определяются целями их анализа.

Если рассматривать классификацию преобразователей в целях решения изобретательских задач, то можно воспользоваться понятиями вепольного анализа теории ТРИЗ [3]. В этом случае каждое элементарное преобразование энергии рассматривается как веполь², а волновая электростанция – как вепольная система.

Совершенствование волновых преобразователей идет по пути получения более управляемых технических систем, которые, в соответствии с законом увеличения степени вепольности, имеют более сложную вепольную модель.

Для каждого уровня преобразований можно выделить ряд вариантов – веполь, моделирующих те или иные физические эффекты. Анализ возможности их применения и эффективности в конкретных условиях эксплуатации позволяет построить структуру вепольной системы, то есть модель всего устройства. На рис. 3.6 показан пример вепольной модели преобразователя типа OWC, где индексами обозначено: W – волны, A – сжатый воздух в камере, S – поток воздуха через сопло, M – механическая энергия турбины, E – электрическая энергия, K – камера, N – сопло, T – турбина, G – электрогенератор, C₁ и C₂ – элементы управления параметрами работы турбины и генератора. В табл. 3.2 представлены некоторые примеры описаний веполь. Расширение этой таблицы позволит создать базу данных, как основу для структурного проектирования преобразователей.

Построение веполь и анализ вепольных систем основано на использовании физических явлений. Для этой цели в ТРИЗ используются

² Веполь – простейшая система взаимодействия трёх элементов, в качестве которых используются обобщённые понятия «вещество» (В) и «поле» (П).

информационные базы физических эффектов. Выделим физические факторы, имеющие отношение к первичным преобразованиям энергии волн, отмеченные в работе [16, с. 136]:

- изменение уровня моря относительно неподвижного тела;
- разность фаз колебаний уровня (давления) воды в пространственно разнесенных точках;
- разность фаз колебаний плавающих тел в пространственно разнесенных точках;
- периодичность колебаний суммарного давления относительно уровня тихой воды;
- периодическое изменение наклона волновой поверхности;
- концентрация волновой энергии по фронту;
- концентрация волновой энергии по глубине;
- скоростной напор жидкости (гидродинамическое давление);
- комбинация эффектов.

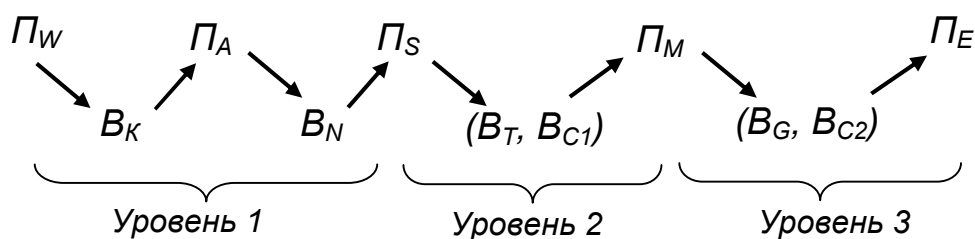


Рис. 3.6. Вариант вепольной модели преобразователя типа OWC

Данная классификация преобразований энергии волн в принципе позволяет анализировать возможность применения тех или иных технических решений в конкретных условиях. Однако для этих целей она также еще должна быть доработана, а именно: распространена на все стадии преобразования энергии; расширена (так как к настоящему времени предложено много устройств на основе новых физических эффектов); систематизирована (например, с разделением на статические и динамические факторы, по степеням свободы колебаний, по свойствам взаимодействующих сред, сочетаниям сложных эффектов и пр.). Связь физических явлений с функциональными, структурными и математическими моделями позволит эффективно решать задачи анализа и проектирования преобразователей.

Таблица 3.2

Примеры веполей

Поле 1	Элемент (вещество)	Поле 2	Условия применения	Пример или тип
1	2	3	4	5
Уровень 0. Концентрация энергии волн				
Волна на глубокой воде	Откос	Волна с высоким гребнем	Согласование с направлением волн	Дамба - атолл
Прогрессивная волна	Сужающийся канал или залив	Волна с высоким гребнем	Согласование с направлением волн	ТАРСНАН
Волна под углом к рабочему телу	Рулевое устройство	Волна по нормали к рабочему телу	Обеспечение автоматического поворота	Mighty Whale
Уровень 1. Первичное преобразование				
Волна	буй	Вертикальные колебания относительно дна	Ограниченная глубина	Точечные преобразователи
Гребень волны	Стенка камеры	Гидростатическое давление в камере	Волны с высоким гребнем	OWEC
Гидростатическое давление в камере	камера с отверстием	Течение воды через отверстие	Низконапорные гидротурбины	OWEC
Волна	Камера кесонного типа	Сжатие воздуха в камере	Ширина нижней части камеры меньше половины длины волны.	OWC
Сжатый воздух	Камера с воздуховодом	Поток воздуха	Воздушная турбина выше подъема уровня воды.	OWC

1	2	3	4	5
Уровень 2. Передача энергии рабочего органа электрогенератору				
Поток воды через отверстие	Водяная турбина	Момент вращения оси генератора	Обеспечение достаточного напора. Низконапорная турбина.	OWEC
Поток воздуха через отверстие	Воздушная турбина	Момент вращения оси генератора	Обеспечение достаточного напора.	OWC
Поворот створки	Мультипликатор	Вращение оси генератора с повышенной частотой	Работа под водой. Большие динамические нагрузки от штормовых волн.	OWSC
Поворот створки	Шатун	Линейные перемещения	Линейный электрогенератор.	OWSC

3.3. Проблемы использования энергии волн. Критерии выбора преобразователей

Идея использования колоссальной энергии морских и океанских волн стара как мир, однако она довольно сложна в осуществлении из-за непредсказуемости и большого диапазона интенсивности волнения. Волнение является нерегулярным. Небольшая морская волна имеет мощность порядка 10 кВт/м, в то время как шторм может генерировать 10 МВт/м. Поэтому сложно разработать устройство для эффективного извлечения мощности в широком диапазоне амплитуд и частот.

Энергоустановка, рассчитанная только на крупные волны, не будет работать при слабом волнении, а установка, предназначенная лишь для слабых волн, может быть легко разрушена штормовыми волнами. Всегда существует некоторая вероятность экстремальных волн. Обычно за период 50 лет встречается волна в 10 раз выше средней. Таким образом, конструкции должны быть способны выдерживать волну в сотни раз большей мощности по сравнению со средней волной. Поэтому при проектировании ВлЭС необходимо закладывать большой запас прочности. Отсюда вытекает большая стоимость конструкций и уменьшение эффективности преобразователей при нормальных условиях эксплуата-

ции. В результате многие известные технические решения оказываются малорентабельными из-за высокой материалоемкости конструкций.

Наибольшая мощность волн характерна для открытых морских пространств при большой длительности преобладающего ветра. Однако существуют естественные трудности постройки и закрепления установок для этих районов и волновых режимов, а также передачи энергии на берег. Поэтому пока чаще всего используются преобразователи энергии волн для прибрежных акваторий.

Периоды морских волн составляют несколько секунд. Такие нерегулярные и медленные движения трудно преобразовать в высокочастотную нагрузку для эффективной работы электрических генераторов, номинальная частота вращения которых составляет сотни Герц.

В настоящее время существует большой выбор преобразователей энергии волн, однако большинство из них недостаточно теоретически обоснованы и практически проработаны. Отсутствуют методики проектирования, четкие рекомендации по районам установки. В результате выбор эффективных устройств осложнен.

Недостатком волновых электростанций является также невозможность работать в замерзшем море.

Несмотря на то, что существует большое разнообразие запатентованных преобразователей энергии волн (некоторые из них будут представлены в следующих главах), попробуем заранее выделить некоторые критерии выбора наилучших вариантов с точки зрения наибольшей эффективности «захвата» и использования энергии. Эти критерии представляются нам в следующем виде.

1. Количество получаемой энергии прямо пропорционально длине используемого фронта волны, поэтому рабочий орган преобразователя должен быть вытянут по фронту (или по фронту формируется последовательность рабочих органов). С этой точки зрения преобразователи типа «терминатор» имеют преимущество. Атенюаторы и точечные преобразователи будут эффективны только в системах с относительно небольшим выходом энергии (например, на судах, плавучих навигационных огнях и т.п.) или в сети из многих преобразователей.

2. Для наиболее полного захвата энергии волны по высоте рабочий орган в виде вертикальной преграды должен иметь высоту, соответствующую глубине распространения основного возмущения воды (порядка высоты характерной волны). Если же рабочий орган располагается горизонтально на поверхности воды, принимая энергию от вертикальных движений частиц волны, то его размер по направлению движения волны должен быть соизмерим с длиной характерной волны, что значительно больше, чем высота волны. Следовательно, сопоставимые по мощности поглотите-

ли энергии на основе вертикальных конструкций будут более компактны, чем системы в виде плавучих плотов или понтонов.

3. Для уменьшения площади рабочего органа может быть применен концентратор энергии волн. Однако известные концентраторы в виде каналов, имеющих сужающиеся стенки и наклонное дно, как правило, слишком громоздки, дороги и малоэффективны, так как кроме концентрации энергии волн в довольно узком частотном диапазоне они приводят к потерям энергии за счёт трения о стенки и дно канала и разрушения относительно небольших волн. В связи с этим в качестве концентратора энергии, если возможно, желательно использовать естественные условия: рельеф дна и форму береговой линии (для прибрежных установок) или противотечения.

4. Рабочий орган должен иметь не только большую площадь «захвата» волны, но и наибольшую эффективность отбора её мощности. Для этого он, как любая колебательная система, должен иметь оптимальное сочетание упругих и инерционных свойств, по возможности обеспечивая работу в резонансе. Так как волнение обычно характеризуется довольно широким частотным спектром, желательно чтобы была возможность автоматического управления собственной частотой колебаний рабочего органа.

5. «Гибкость» автоматического управления параметрами работы преобразователя может быть тесно и эффективно связана с физической гибкостью (эластичностью) рабочих органов. По-видимому, не случайно в последние годы увеличилось количество практических предложений и реализаций устройств, состоящих из гибких элементов, например, Vulge wave, DEAP (Диэлектрические электроактивные полимеры или искусственные мускулы). Эластичные конструкции могут также обеспечить большую безопасность при воздействии экстремального волнения.

6. Конструкция привода тесно связана с типом электрогенератора. Генератор электрического тока наиболее эффективен при высокой частоте вращения, так как э.д.с. пропорциональна скорости изменения магнитного потока. Следовательно, привод должен обеспечивать преобразование низкочастотных колебаний морских волн во вращение генератора с высокой частотой. При этом механические мультипликаторы, по-видимому, будут недостаточно надёжны и эффективны. Привод может быть гидравлическим или пневматическим, как например, в осциллирующем водном столбе (OWC), когда турбину генератора вращает сжатый в столбе воздух. Система OWC обычно недостаточно эффективна по причине малой площади сечения и высоты подъема водного столба (особенно при пониженной высоте волн), однако идея пневматического привода может быть перенесена на другие типы преобразователей (например, в комбинации с качающимися элементами).

4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С КАЧАЮЩЕЙСЯ СТВОРКОЙ

4.1 Математические модели

В качестве модели преобразователя волновой энергии рассмотрим конструкцию, представленную на рис. 4.1. Её основным элементом является шарнирно закреплённая створка – пластина 1, подверженная воздействию волн. Отбор энергии волн осуществляется преобразователем 2 (рис. 4.1). Кроме того, обмен энергией между волнами и створкой происходит за счёт растяжения – сжатия эластичных связей 3, а также за счёт погружения – всплытия элемента плавучести (поплавка) 4. Эластичные связи (например, в виде резиновых нитей или пружин) прикреплены к качающейся пластине и к неподвижному основанию 5.

Устройство отбора мощности 2 может быть выполнено в различных исполнениях. На рис. 4.2 представлена схема, в соответствии с которой створка приводит в движение поршневой насос, и далее через гидравлическую систему энергия передаётся на электрогенератор. Может быть применен также линейный электромагнитный генератор или традиционный генератор в водозащищенном исполнении с приводом через кривошипно-шатунный механизм и мультипликатором.

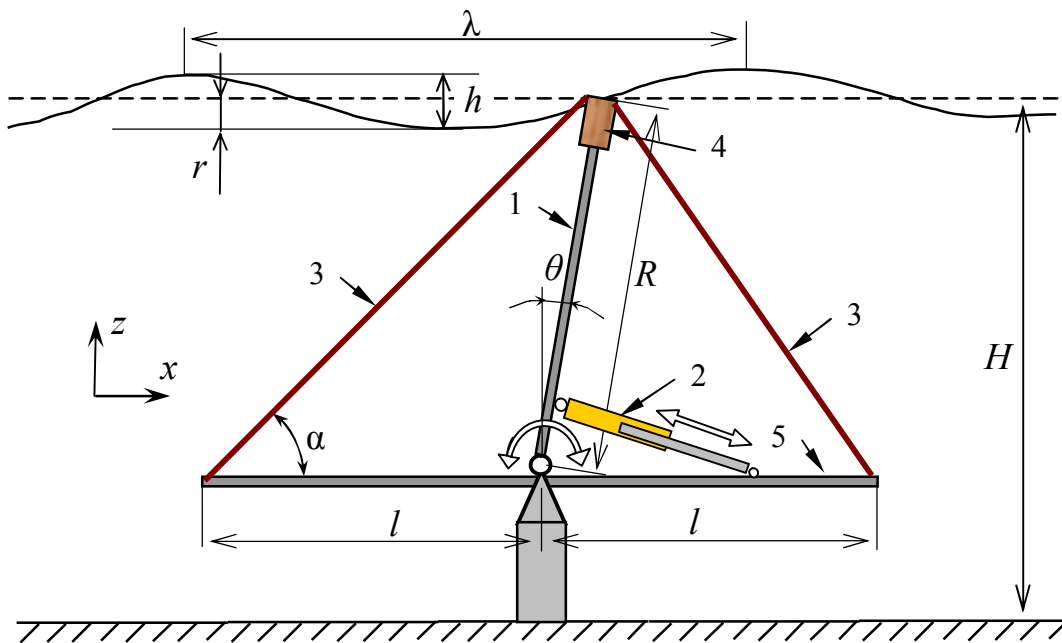


Рис. 4.1. Модель преобразователя энергии волн

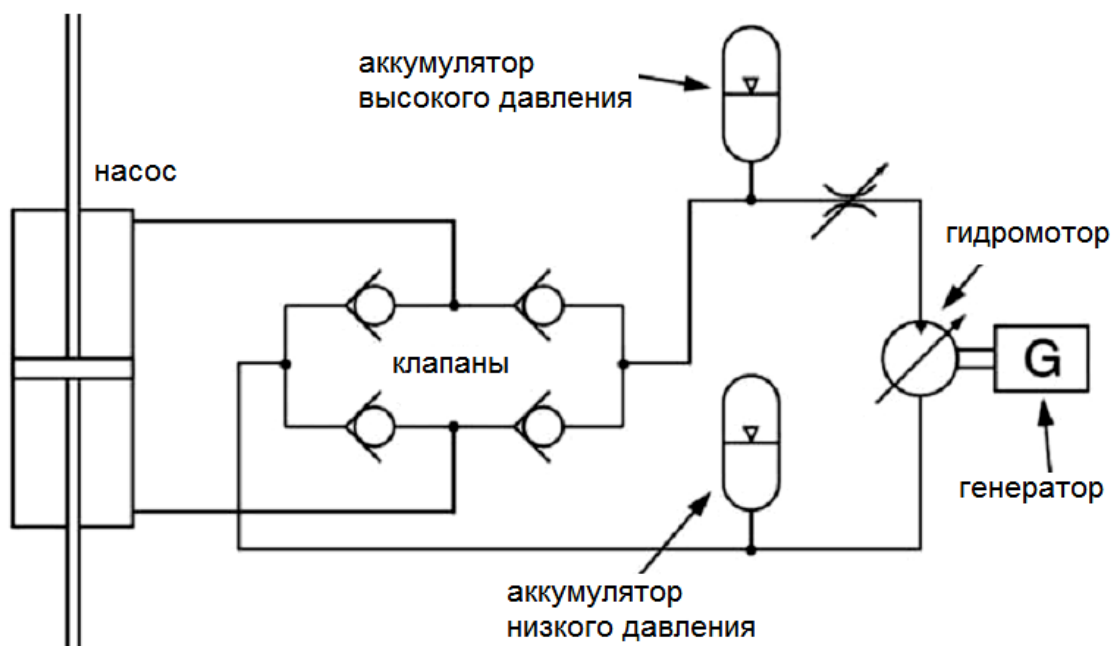


Рис. 4.2. Схема поршневого гидравлического преобразователя энергии [95, с. 345]

Поплавок 4 и эластичные связи 3 обеспечивают возвращение пластины в вертикальное положение после наката волны. Следует отметить, что в известной установке «Oyster» [95, с. 345; 96, с. 927] возврат рабочего органа (створки) в вертикальное положение обеспечивается силами плавучести. Однако для обеспечения достаточного восстанавливающего момента створка состоит из пяти весьма объёмных цилиндрических поплавков (рис. 4.3), что снижает её гидродинамическое качество и увеличивает вес подвижной конструкции.

В связи с этим в предлагаемом варианте волнового преобразователя введены эластичные элементы, обеспечивающие дополнительный восстанавливающий момент. Элемент плавучести (поплавок) в этом случае имеет относительно небольшой объём. Эластичные элементы 3 имеют нелинейную характеристику восстанавливающего момента, которая отличается от характеристики системы с поплавками. Таким образом, сочетание двух способов создания восстанавливающего момента позволяет подобрать оптимальную амплитудно-частотную характеристику колебательной системы. Более того, оптимальную АЧХ можно обеспечить и без применения поплавков, - только за счёт регулирования жёсткости эластичных элементов, а также их длины и углов наклона.

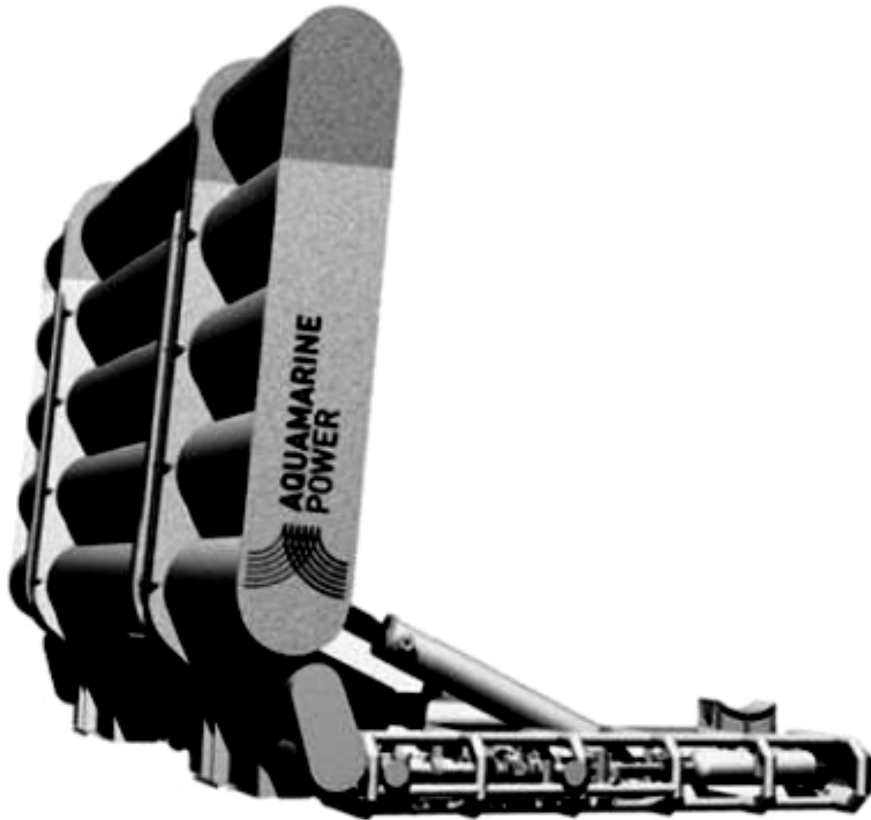


Рис. 4.3. Преобразователь энергии волн «Oyster» [96, с. 927]

4.1.1. Линейная модель

Приближённая аналитическая модель гармонических колебаний створки описывается линейным дифференциальным уравнением:

$$(I_{yy} + i_{yy})\ddot{\theta} + (B_{yy} + b_{yy})\dot{\theta} + \left(m_b g R_b - m_p g \frac{R}{2} \right) \theta + k_e \theta = \int_z p_w z dz, \quad (4.1)$$

где I_{yy} – погонный момент инерции пластины относительно шарнира, i_{yy} – присоединённый момент инерции жидкости (на единицу длины пластины); B_{yy} – коэффициент демпфирования устройства отбора мощности; b_{yy} – коэффициент волнового демпфирования; m_b и m_p – погонная масса поплавка и пластины; R_b – расстояние от центра тяжести поплавка до оси поворота створки; k_e – коэффициент жёсткости упругих связей, приведенный к единице длины пластины; p_w – волновое давление.

Волновая нагрузка моделируется на основе линейной теории волн. В этом случае давление в волне определяется в виде (2.15) или

(2.17) в зависимости от соотношения длины волн и глубины.

Линейная модель колебаний предполагает малые углы отклонения пластины θ и снос граничного условия на волновой поверхности на плоскость уровня спокойной воды. Интегрирование давлений выполняется по вертикальной оси. Уравнение (4.1) может быть записано в виде

$$I\ddot{\theta} + \beta\dot{\theta} + k\theta = M_a \sin \omega t, \quad (4.2)$$

где $I = I_{yy} + i_{yy}$, $\beta = B_{yy} + b_{yy}$, $k = m_b g R_b - m_p g R/2 + k_e$,

$$M_a = \rho g r \frac{e^{kR}}{k^2} \left(kR + \frac{1}{e^{kR}} - 1 \right).$$

Момент инерции пластины с поплавком определяется в виде:

$$I_{yy} = m_p \left(\frac{R^2}{12} + \left(\frac{R}{2} \right)^2 \right) + m_b \left(\frac{c^2}{12} + \left(R - \frac{c}{2} \right)^2 \right),$$

где c – высота поплавка.

Присоединённый момент инерции определяется по формуле [17, с. 24]

$$i_{yy} = \pi \rho \frac{R^4}{8} \cdot k_{3D},$$

где k_{3D} – поправочный множитель, учитывающий пространственный характер обтекания пластины.

Коэффициент жёсткости упругих связей на единицу длины пластины по фронту волн L (считая малыми углы θ и постоянными углами α):

$$k_e = \frac{M_e}{\theta L} = \frac{E \Delta l_e f l \sin \alpha}{l_e \theta L} = \frac{E f R l \sin \alpha \cos \alpha}{L \sqrt{R^2 + l^2}},$$

где M_e – момент реакции растяжения упругих связей; E – модуль упругости упругих связей; f – площадь сечения упругих связей (с одной стороны от пластины); Δl_e – удлинение упругих связей; l_e – длина упругих связей.

Уравнение (4.2) можно переписать в виде

$$\ddot{\theta} + \nu_0 \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = W_a \sin \omega t,$$

где $\nu_0 = \frac{\beta}{I}$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{I}}$; $W_a = \frac{M_a}{I}$.

Его решение:

$$\theta = \theta_a \sin(\omega t - \varepsilon),$$

где
$$\theta_a = \frac{W_a}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + \nu_0^2 \omega^2}}; \quad \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\nu_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

За один период колебаний $T = 2\pi/\omega$:

мощность системы:
$$P = \frac{1}{2} I \nu_0 \theta_a^2 \omega^2;$$

работа:
$$A = \pi I \nu_0 \theta_a^2 \omega.$$

Данная математическая модель является упрощенной. Для того, чтобы она была практически применимой непосредственно, необходимо её уточнение путём согласования с экспериментальными данными. Основная проблема заключается в определении коэффициентов демпфирования, которые достоверно могут быть определены только путём экспериментального исследования декрементов затухания свободных колебаний. Факторами, ограничивающими применение линейной модели, также являются:

- существенные нелинейные эффекты при больших амплитудах колебаний, включающие геометрическую нелинейность и физические нелинейности (обусловленные несколькими причинами: нелинейностью при больших деформациях упругих связей, вихревыми эффектами, перехлёстыванием вершины волны через пластину, переменной площадью смоченной поверхности пластины при прохождении впадины волны);

- сложности анализа колебаний на нерегулярном волнении, так как процесс колебаний фактически является неустановившимся (достоверность результатов спектрально-вероятностного анализа колебаний на волнах значительной амплитуды снижается, а кроме того, имеется проблема определения волнового спектра);

- отклонения реальной формы волн от гармонической (профиль и его изменение по фронту волны), особенно в прибрежной зоне.

Несмотря на это, данная модель может быть полезна при качественном анализе волнового преобразователя, в частности, на этапе предварительного подбора размеров и жёсткостных параметров системы из условий выхода на резонансные режимы работы и высокие показатели эффективности.

4.1.2. Нелинейная модель

Уточненная по сравнению с (4.1) аналитическая модель колебаний створки описывается нелинейным дифференциальным уравнением:

$$(I_{yy} + i_{yy})\ddot{\theta} + (B_{yy} + b_{yy})\dot{\theta} + \left(m_b g R_b - m_p g \frac{R}{2}\right) \cdot \sin \theta + k_e(\theta)\theta = \int_0^R p_w \zeta d\zeta, \quad (4.3)$$

где интегрирование давления выполняется по направлению ζ ширины створки с учетом её наклона.

Уравнение (4.3) можно переписать в виде:

$$I\ddot{\theta} + \beta\dot{\theta} + k_m \sin \theta + k_e(\theta)\theta = \int_0^R p_w \zeta d\zeta,$$

где $I = I_{yy} + i_{yy}$, $\beta = B_{yy} + b_{yy}$, $k_m = m_b g R_b - m_p g R/2$.

Коэффициент жёсткости упругих связей на единицу длины пластины L :

$$k_e = \frac{M_e}{|\theta|L} = \frac{E \Delta l_e f l \sin \alpha}{l_e |\theta|L} = \frac{E f l R \cos \theta}{|\theta|L} \cdot \frac{(l_e - l_{e0})}{l_e l_{e0}},$$

где M_e – момент реакции растяжения упругих связей; E – модуль упругости; f – площадь сечения упругих связей (с одной стороны от пластины); l_e – длина, Δl_e – удлинение; l_{e0} – длина упругих связей при нулевом наклоне пластины ($\theta = 0$):

$$l_e = \sqrt{R^2 \cos^2 \theta + (R|\sin \theta| + l)^2}; \quad l_{e0} = \sqrt{R^2 + l^2}.$$

Уравнение (4.3) можно переписать также в виде

$$\ddot{\theta} + v_0 \dot{\theta} + \sigma_m \sin \theta + \sigma_e \theta = W(x, z, t),$$

где $v_0 = \frac{\beta}{I}$; $\sigma_m = \frac{k_m}{I}$; $\sigma_e = \frac{k_e}{I}$; $W = \frac{1}{I} \int_0^R p_w \zeta d\zeta$.

Это уравнение (4.3) можно решить численным методом. В частности, далее используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка с модификацией Фельберга.

Характер нелинейности упругой системы существенно зависит от расположения эластичных связей. Его можно эффективно регулировать путём изменения положения точек крепления упругих нитей. Если на-

клонять стержни 5 (см. рис. 4.4), то в уравнении (4.1) слагаемое $k_e \theta$ следует заменить на M_{eL} :

$$M_{eL} = \frac{M_e}{L} = \frac{E(l_e - l_{e0})f r}{l_e L},$$

где $l_{e0} = \sqrt{(R - b)^2 + a^2}$, $a = l \cdot \cos \gamma$, $b = l \cdot \sin \gamma$,

$$r = \frac{2}{l_e} \sqrt{p(p - l_e)(p - R)(p - l)}, \quad p = \frac{1}{2}(R + l + l_e),$$

если $\psi = (90^\circ - \gamma + \theta) \geq 90^\circ$:

$$l_e = \sqrt{(R + b_1)^2 + a_1^2}, \quad a_1 = l \cdot \cos(\psi - 90^\circ), \quad b_1 = l \cdot \sin(\psi - 90^\circ),$$

если $\psi < 90^\circ$:

$$l_e = \sqrt{(R - b_1)^2 + a_1^2}, \quad a_1 = l \cdot \cos(90^\circ - \psi), \quad b_1 = l \cdot \sin(90^\circ - \psi).$$

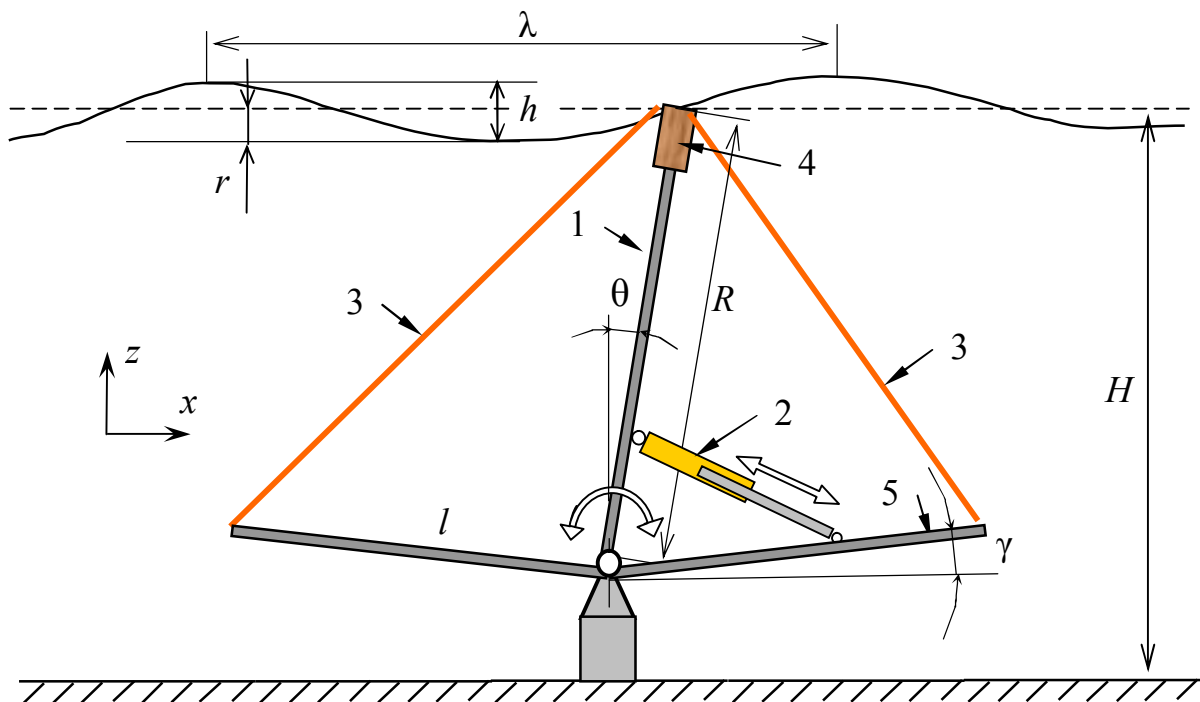


Рис. 4.4. Модель преобразователя с наклонными стержнями

Упругие связи могут быть более короткими, как показано на рис. 4.5. В этом случае в вышеприведенных формулах следует заменить R на R_r .

Следует отметить перспективность дальнейших исследований в области применения автоматических и интеллектуальных устройств, регулирующих величину восстанавливающего момента, в первую очередь за счёт изменения жесткости упругих элементов, в зависимости от параметров каждой конкретной набегающей волны.

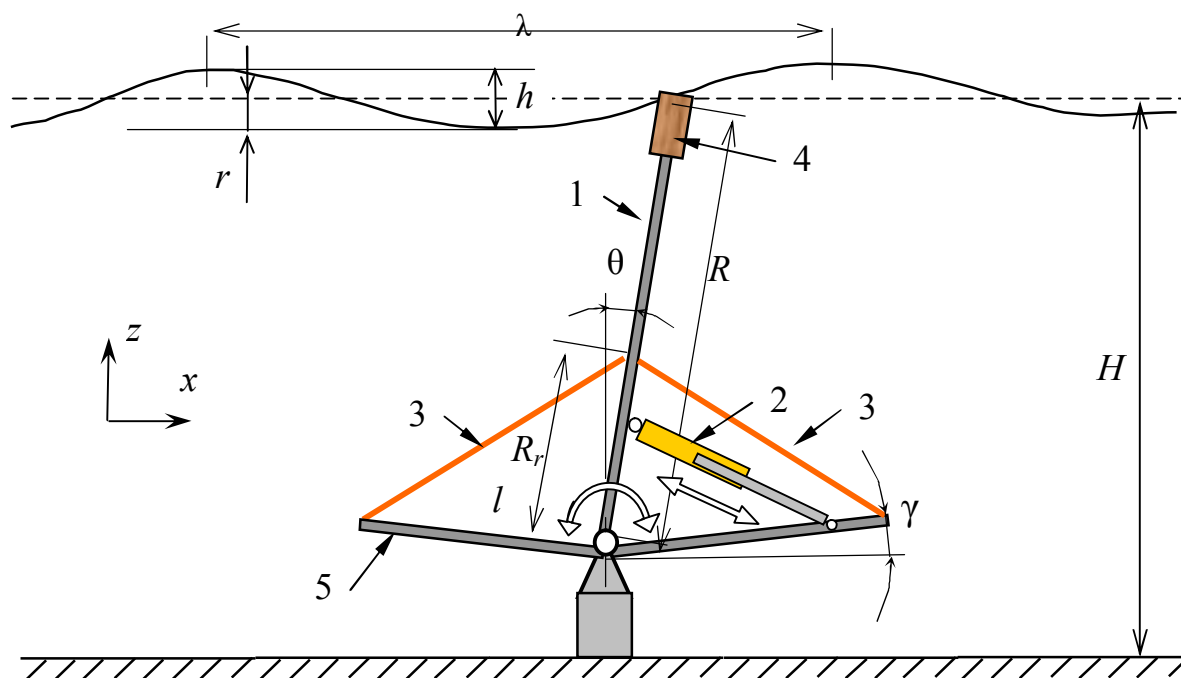


Рис. 4.5. Модель преобразователя с укороченными упругими связями

Приведенная математическая модель учитывает нелинейную зависимость кренящих и восстанавливающих сил, обусловленных нелинейностью упругих сил, а также веса пластины и поплавка. Следует отметить, что здесь мы не учитываем зависимость коэффициентов сопротивления от частоты колебаний и других параметров системы.

4.2. Результаты расчётов

В качестве расчётной модели преобразователя волновой энергии рассмотрена конструкция, представленная на рис. 4.1.

Расчёты были выполнены для системы, имеющей следующие параметры³: $l = 235$ мм; $R = 205$ мм; $l_e = 335$ мм; $L = 415$ мм. Пла-

³ Обозначения величин приведены в разделе 4.2

стина изготовлена из пластика толщиной 1,5 мм и плотностью 1,3 г/см³. Поплавок имеет: размеры 12x22x415 мм; плотность 0,5 г/см³. Упругие связи – резиновые нити имеют диаметр 2 мм.

Собственная частота колебаний системы зависит от количества резиновых нитей с каждой стороны пластины n : $n = 1$: $\omega_0 = 0,161$ Гц; $n = 2$: $\omega_0 = 0,237$ Гц; $n = 3$: $\omega_0 = 0,293$ Гц; $n = 4$: $\omega_0 = 0,341$ Гц; $n = 5$: $\omega_0 = 0,382$ Гц; $n = 6$: $\omega_0 = 0,419$ Гц; $n = 8$: $\omega_0 = 0,485$ Гц.

Коэффициент демпфирования определён путём экспериментального исследования декрементов затухания свободных колебаний соответствующей опытной модели. На рис. 4.6 представлен график затухающих свободных колебаний модели в воде при $n = 2$. Коэффициент демпфирования приближённо определяется по формуле:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{|\theta_i| + |\theta_{i+1}|}{|\theta_{i+2}| + |\theta_{i+3}|}.$$

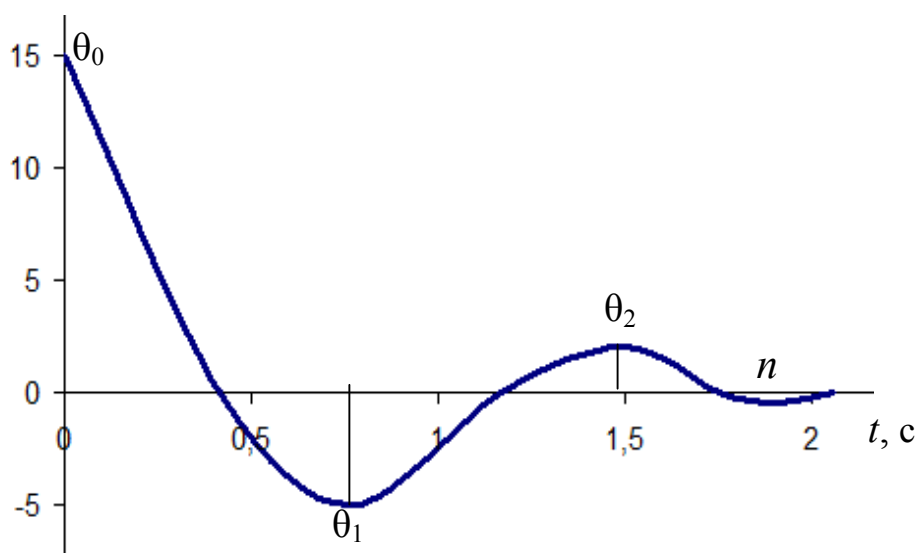


Рис. 4.6. Затухание свободных колебаний модели в воде

На рис. 4.7 и 4.8 представлены полученные расчётом амплитудно-частотные характеристики $\theta_a(\omega)$ линейной системы при разной жёсткости эластичных элементов (и соответствующей собственной частоте ω_0).

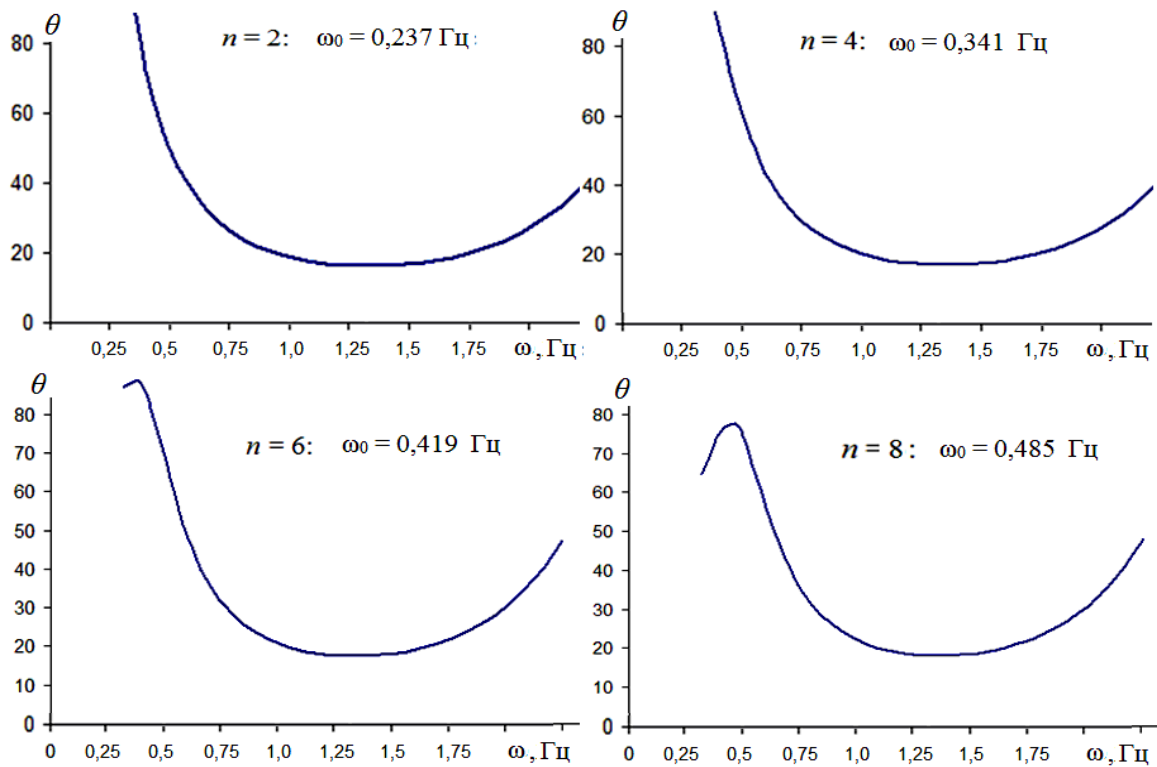


Рис. 4.7. Амплитудно-частотная характеристика системы при разном количестве резиновых нитей. Расчетная амплитуда волны равна 33,5 мм

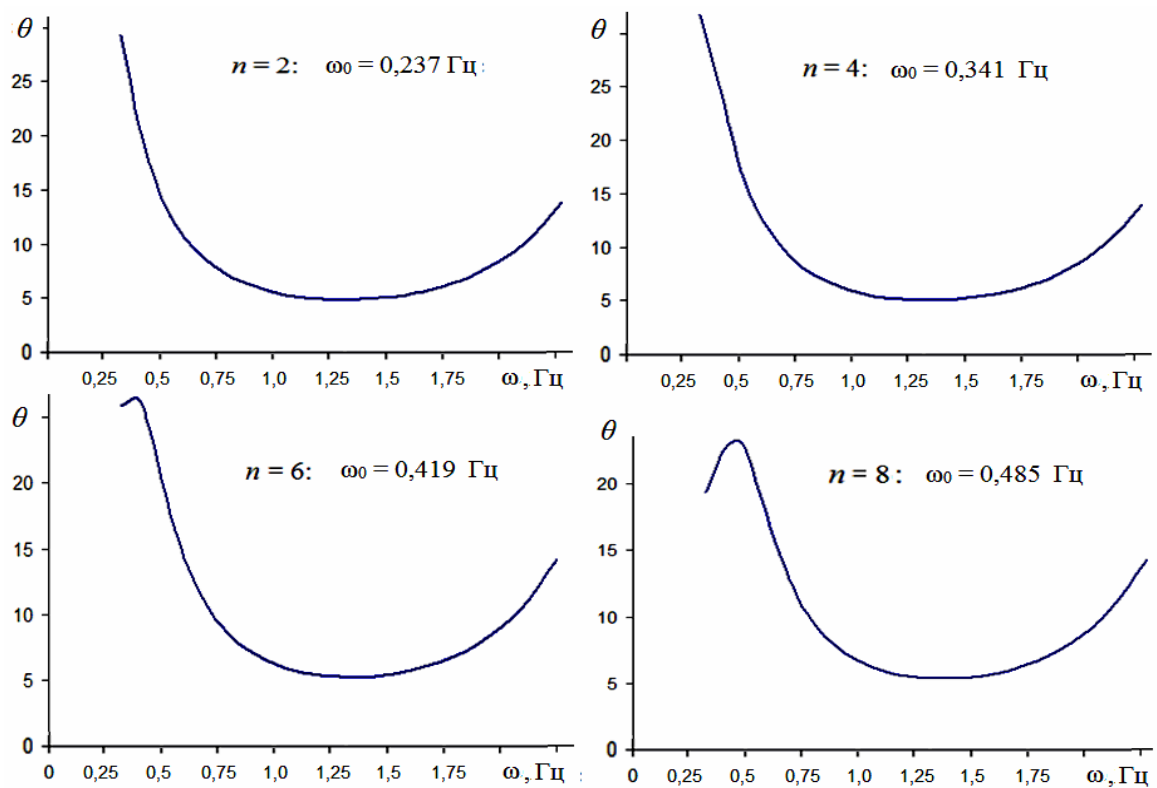


Рис. 4.8. Амплитудно-частотная характеристика системы при разном количестве резиновых нитей. Расчетная амплитуда волны равна 10 мм

На рис. 4.9 показано изменение к.п.д. установки от частоты волн и жёсткости эластичных элементов (определяемой количеством резинок n с каждой стороны пластины на длине L). К.п.д. определяется отношением работы установки за один период колебаний к энергии одной волны. Видно, что эффективность преобразования энергии повышается в области резонансных колебаний.

Вместе с этим следует отметить, что ограничения линейной модели не обеспечивают достоверное определение амплитуд колебаний и к.п.д., особенно в резонансных частотных областях.

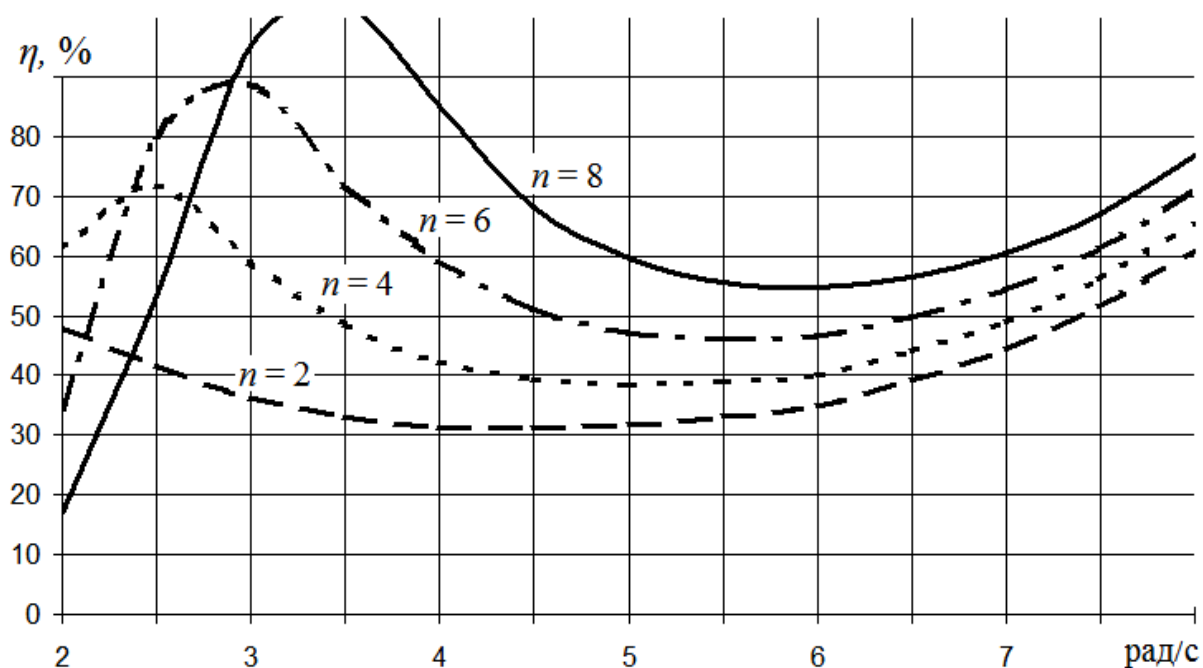


Рис. 4.9. Зависимость к.п.д. установки от частоты волн и жёсткости эластичных элементов при сопротивлении $\beta = 0,8 \text{ Н}\cdot\text{с/рад}$ (линейная модель)

На рис. 4.10 и 4.11 представлено соотношение амплитуд угловых перемещений системы, полученных в расчётах в нелинейной и линейной постановках: $\theta_a^{\text{нелин}} / \theta_a^{\text{лин}}$. Результаты приведены для волн высотой 6,7 см для двух вариантов коэффициента сопротивления β и для двух вариантов жёсткости эластичных элементов. Видно, что влияние нелинейности системы возрастает: с уменьшением частоты волн; с уменьшением жёсткости системы; с уменьшением коэффициента сопротивления.

На рис. 4.12 – 4.15 представлены полученные расчётом ампли-

тудно-частотные характеристики (АЧХ) $\theta_a(\omega)$ системы при разных значениях жёсткости эластичных элементов, амплитуды волн и общего коэффициента сопротивления.

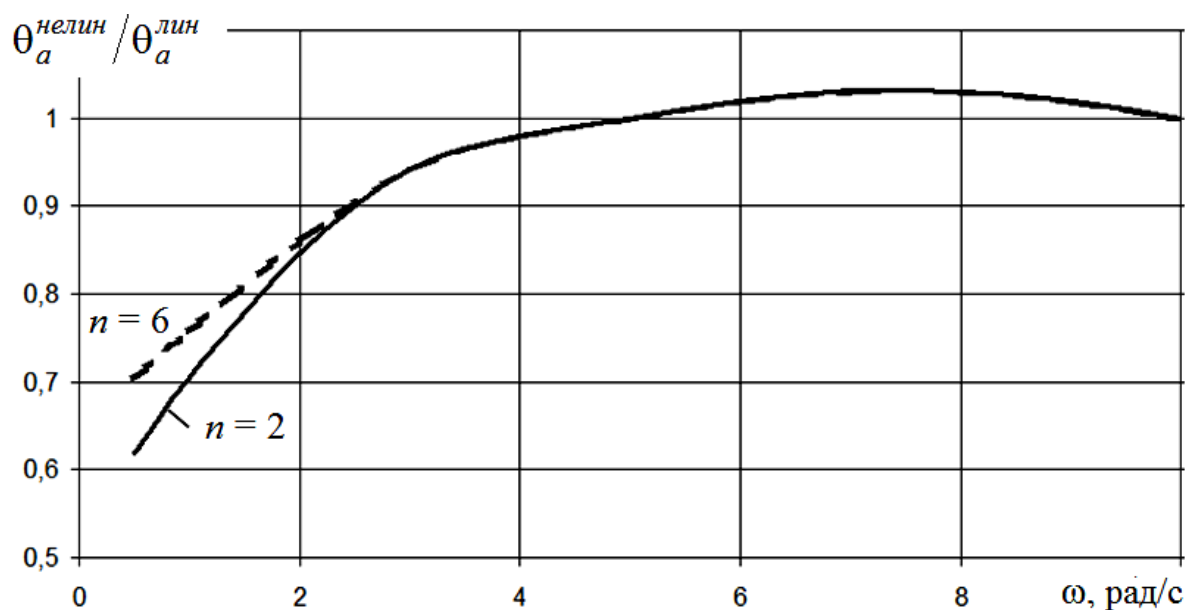


Рис. 4.10. Влияние нелинейности системы на результаты расчётов при $\beta = 7 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{рад}$

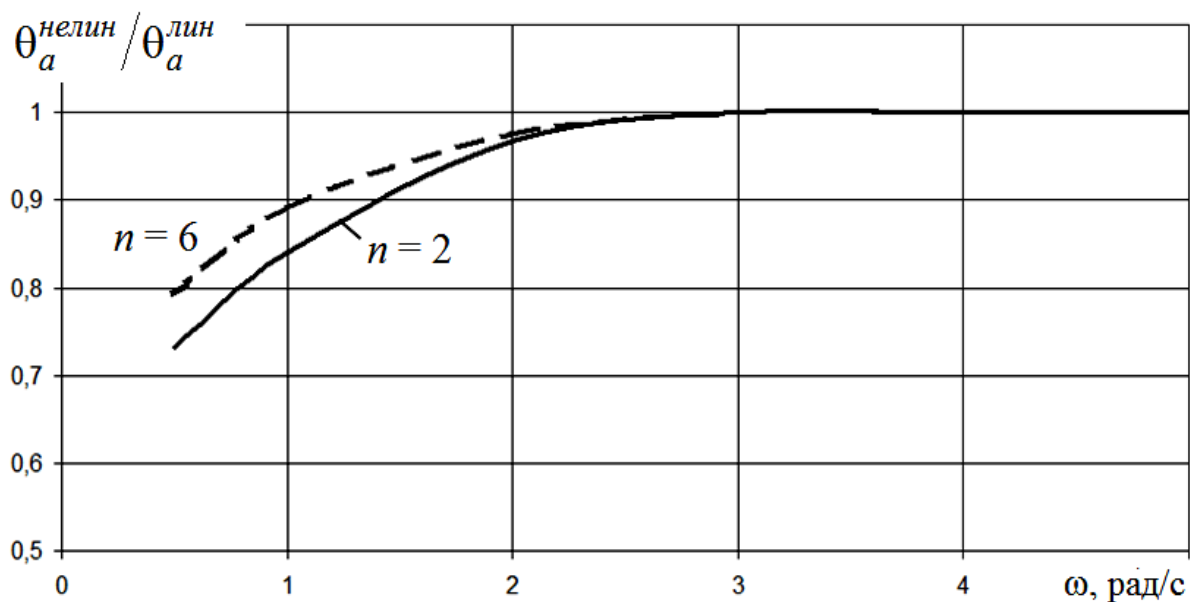


Рис. 4.11. Пример влияния нелинейности системы на результаты расчётов при $\beta = 15 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{рад}$

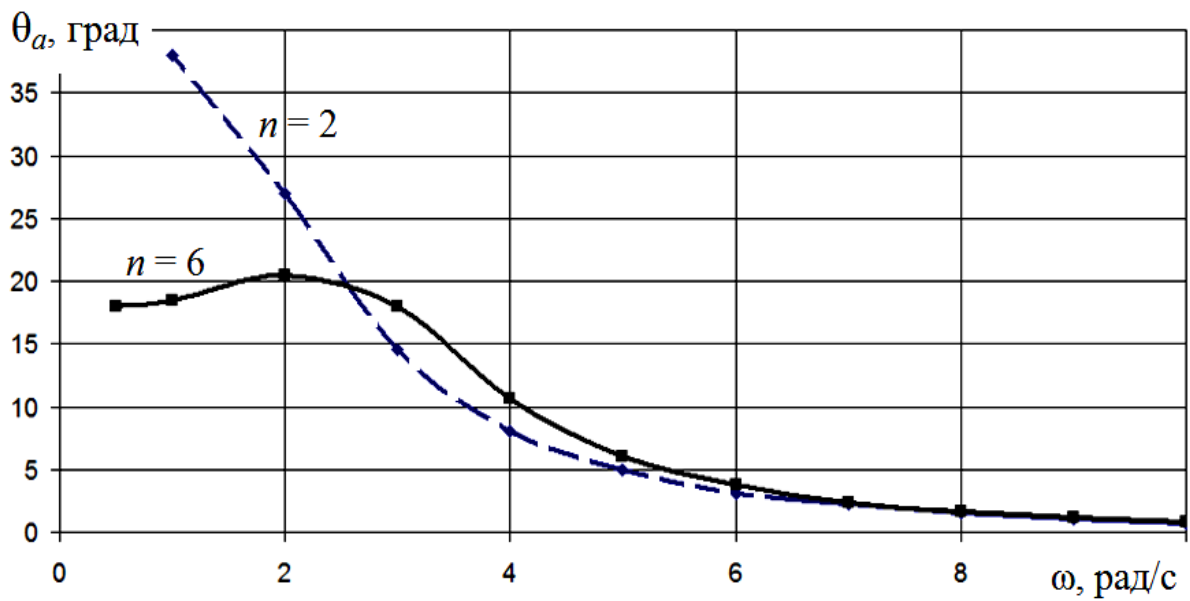


Рис. 4.12. АЧХ системы при разном количестве резиновых нитей n .
 Расчетная амплитуда волны $r = 10$ мм; $\beta = 2$ Н·с/рад

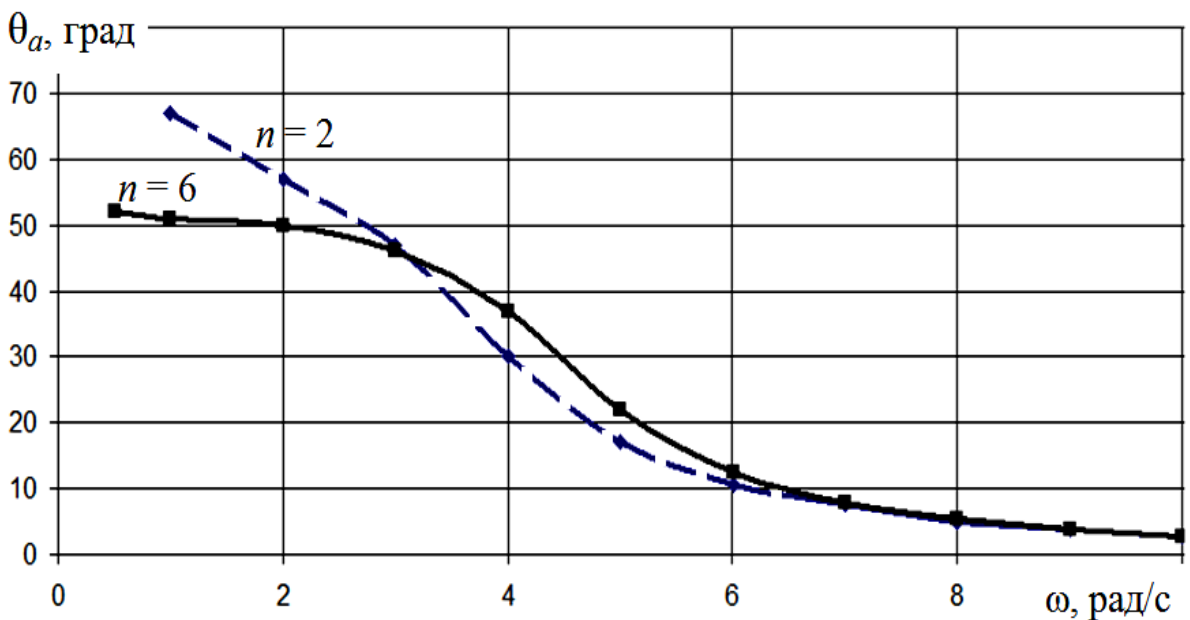


Рис. 4.13. АЧХ системы при разном количестве резиновых нитей n .
 Расчетная амплитуда волны $r = 33,5$ мм; $\beta = 2$ Н·с/рад

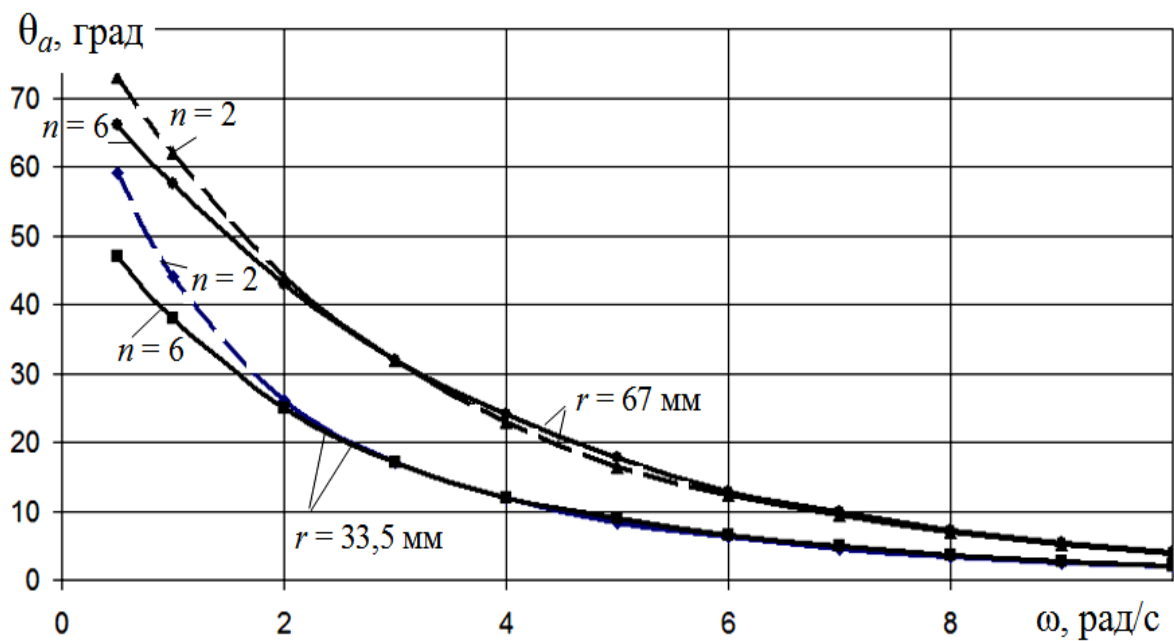


Рис. 4.14. АЧХ системы при разных значениях амплитуды волн и жесткости упругих элементов. Коэффициент сопротивления $\beta = 7$ Н·с/рад

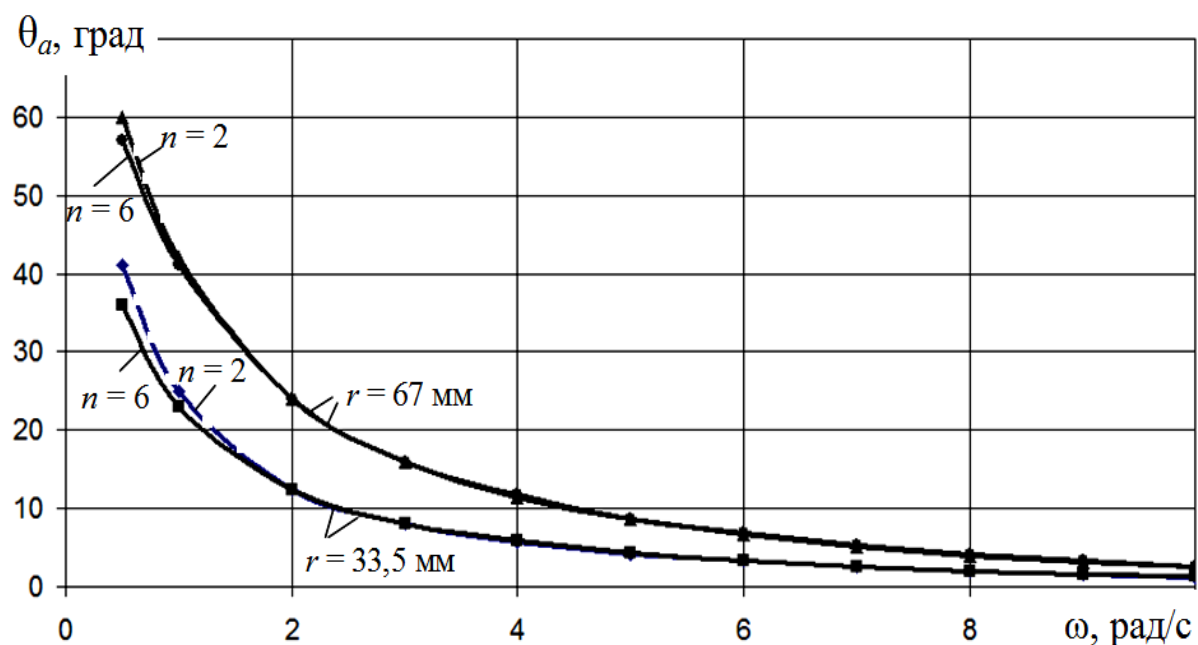


Рис. 4.15. АЧХ системы при разных значениях амплитуды волн и жесткости упругих элементов. Коэффициент сопротивления $\beta = 15$ Н·с/рад

Коэффициент полезного действия системы определяется соотношением её полезной работы к энергии волн:

$$\eta = A_e / E.$$

Если пренебречь влиянием ограниченной глубины, энергия одной волны определяется зависимостью

$$E = \frac{1}{2} \rho g r^2 \lambda = \frac{\pi \rho r^2 g^2}{\omega}.$$

Работа преобразователя за один период колебаний $T = 2\pi/\omega$:

$$A = 2\pi I v_0 \theta_a^2 \omega = 2\pi \beta \theta_a^2 \omega.$$

Учитывая, что сопротивление преобразователя включает сопротивление устройства отбора мощности и волновое демпфирование ($\beta = B_{yy} + b_{yy}$), полезная работа

$$A_e = 2\pi B_{yy} \theta_a^2 \omega.$$

На рис. 4.16 и 4.17 показано изменение к.п.д. установки от жёсткости эластичных элементов и частоты волн при сопротивлении устройства отбора мощности $B_{yy} = 0,8 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{рад}$ и $B_{yy} = 5,8 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{рад}$. Видно, что эффективность преобразования энергии повышается не в области резонансных колебаний, а при более высоких частотах.

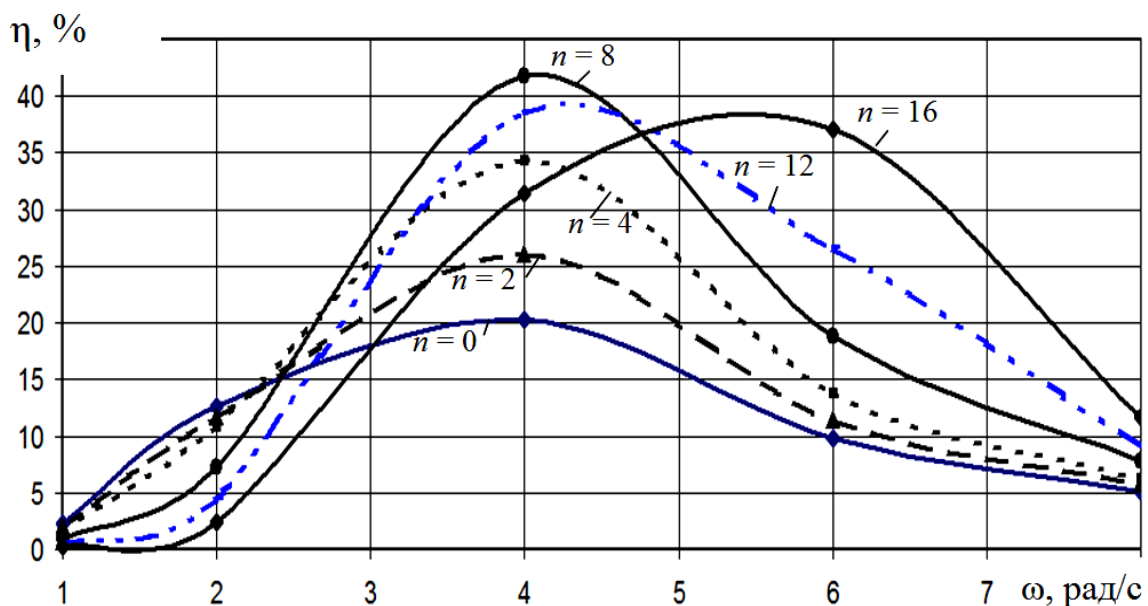


Рис. 4.16. Зависимость к.п.д. установки от частоты волн и жёсткости эластичных элементов при полезном сопротивлении $B_{yy} = 0,8 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{рад}$

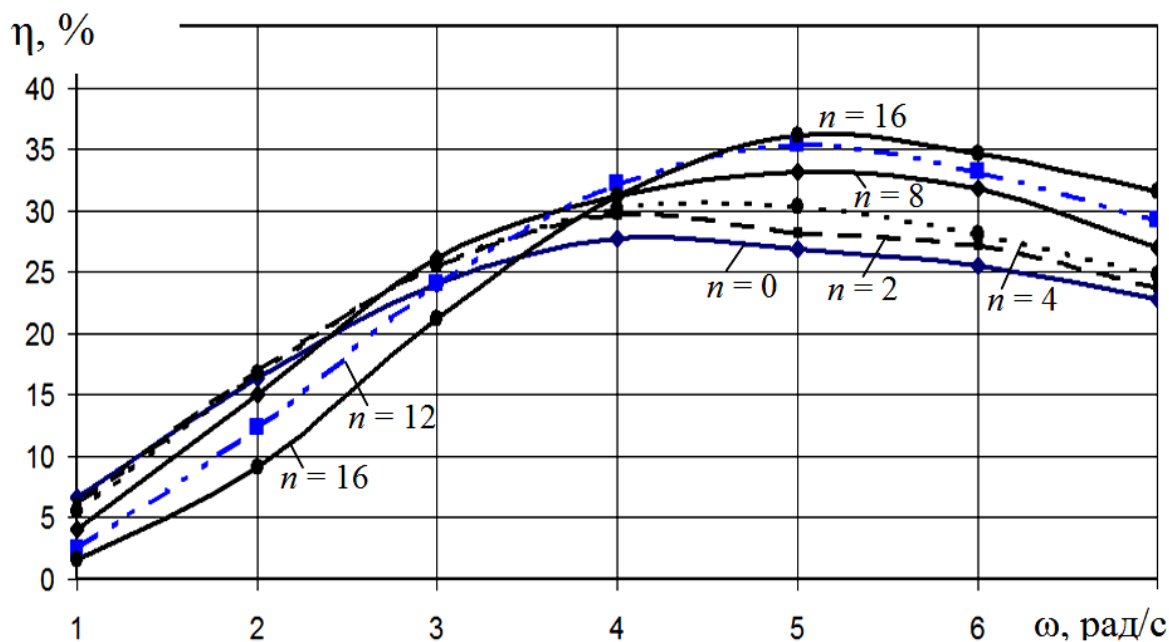


Рис. 4.17. Зависимость к.п.д. установки от частоты волн и жёсткости эластичных элементов при полезном сопротивлении $B_{yy} = 5,8 \text{ Н}\cdot\text{с/рад}$

Следует отметить довольно широкий диапазон частот, соответствующих практически привлекательным значениям к.п.д., а также большой диапазон полезного сопротивления, соответствующий стабильным значениям к.п.д. от 25 до 40 %. Особо отметим, что подбором жёсткости эластичных элементов можно добиться оптимальных значений к.п.д. в широком диапазоне частот.

Для более наглядного представления особенностей работы модели преобразователя, приведём дополнительные иллюстрации.

Примеры отклонений пластины при статическом нагружении.

На рис. 4.18 – 4.21 приведены зависимости углов отклонения пластины от прилагаемого статического момента M (на ед. ширины пластины). Видно, что резиновые нити способствуют существенной нелинейности системы на больших углах отклонений. Поплавки формируют слабую нелинейность системы.

Примеры временных зависимостей.

На рис. 4.22 – 4.23 представлены свободные затухающие колебания модельной системы (углы и угловые скорости) от импульсного момента продолжительностью 0,5 с. Коэффициент демпфирования $\beta = 1,2 \text{ Н}\cdot\text{с/рад}$. Видно, что регулировка жесткости эластичных элементов позволяет управлять собственными частотами системы в большем диапазоне, чем изменением плавучести.

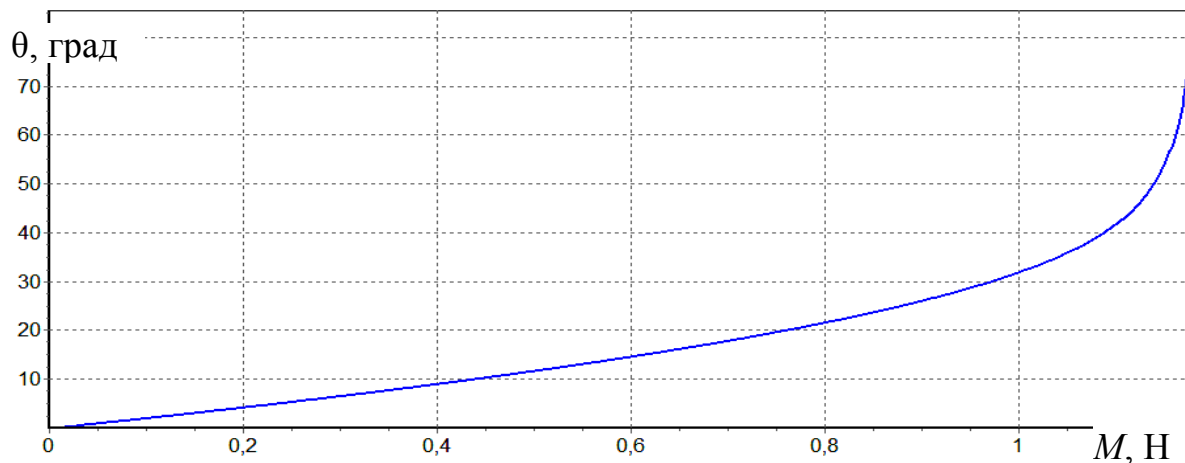


Рис. 4.18. Зависимость углов отклонения пластины от прилагаемого статического момента при $n = 2$. Площадь сечения поплавка $f_{\text{плав}} = 2,64 \text{ см}^2$

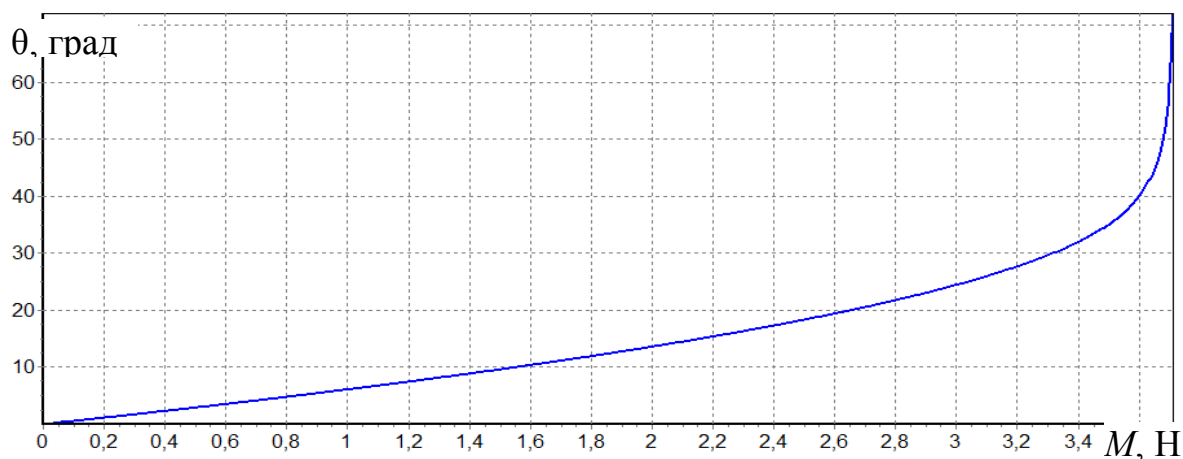


Рис. 4.19. Зависимость углов отклонения пластины от прилагаемого статического момента при $n = 8$. Площадь сечения поплавка $f_{\text{плав}} = 2,64 \text{ см}^2$

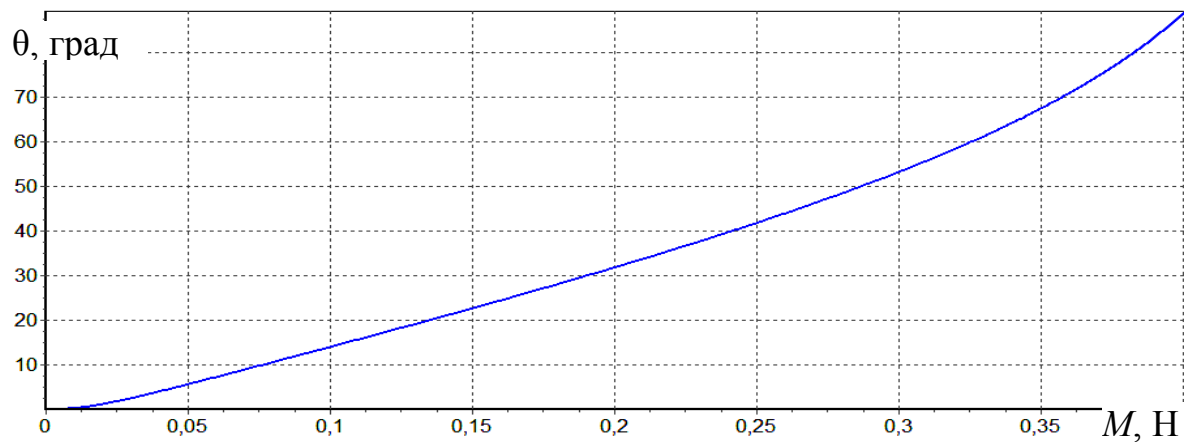


Рис. 4.20. Зависимость углов отклонения пластины от прилагаемого статического момента при $n = 0$. Площадь сечения поплавка $f_{\text{плав}} = 2,64 \text{ см}^2$

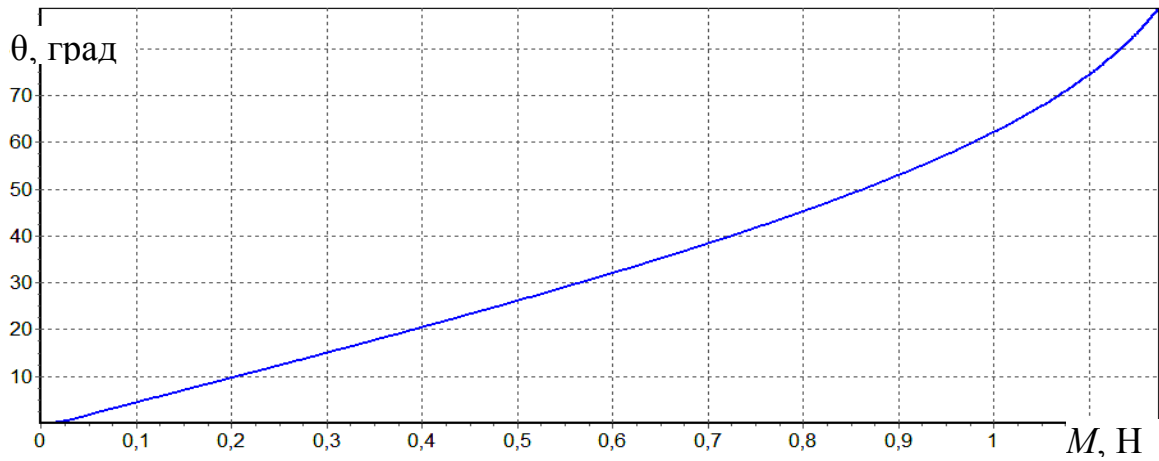


Рис. 4.21. Зависимость отклонений пластины от прилагаемого статического момента при: $n = 0$. Площадь сечения поплавка $f_{\text{плав}} = 10,6 \text{ см}^2$ (увеличена в 4 раза)

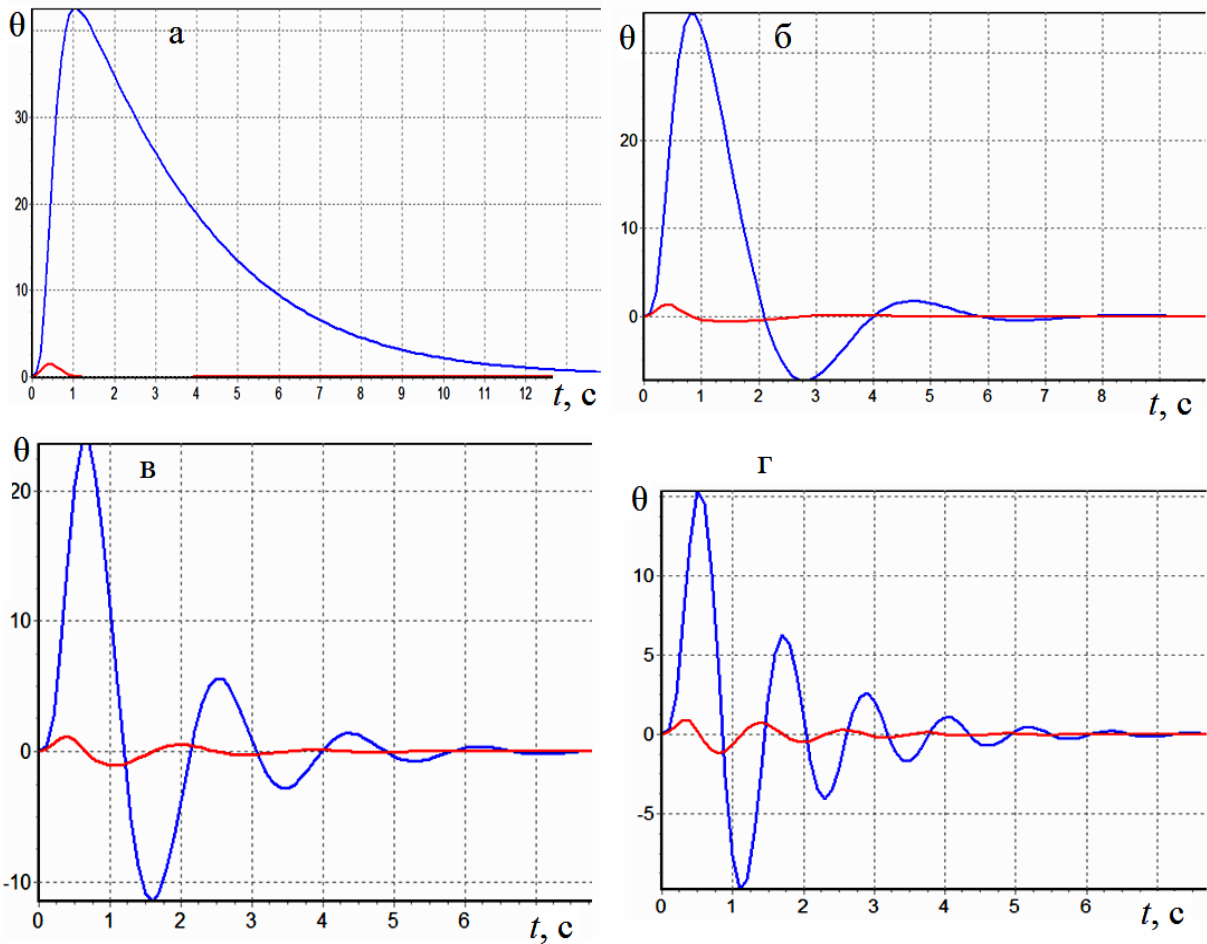


Рис. 4.22. Затухание свободных колебаний при разной жёсткости упругих элементов ($\beta = 1,2 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{рад}$):
а – при $n = 0$; б – при $n = 2$; в – при $n = 8$; г – при $n = 20$

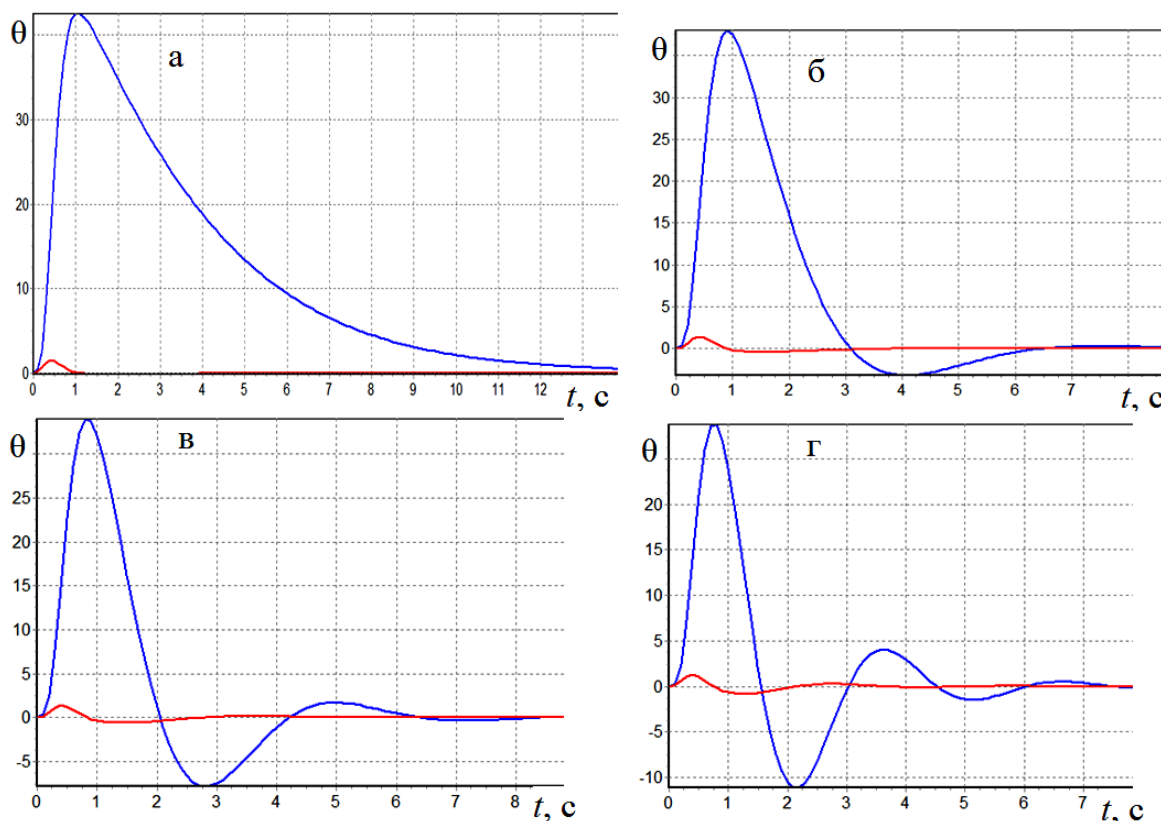


Рис.4.23. Затухание свободных колебаний при разной площади сечения поплавка ($\beta = 1,2 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{рад}$, $n = 0$): а – при $f_{\text{плав}} = 2,75 \text{ см}^2$; б – при $f_{\text{плав}} = 11 \text{ см}^2$; в – при $f_{\text{плав}} = 22 \text{ см}^2$; г – при $f_{\text{плав}} = 44 \text{ см}^2$

На рис. 4.24 представлены вынужденные колебания (углы и угловые скорости) при амплитуде волны 1 см, частоте 10 рад/с и общем сопротивлении $\beta = 2 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{рад}$. На рис. 4.25 – 4.27 представлены колебания при амплитуде волны 3,35 см и частоте 5,0 рад/с. Из этих рисунков видно, что при отсутствии упругих элементов и существенном сопротивлении, колебания пластины длительное время несимметричны.

Колебания происходят относительно отклонённого положения пластины. И только через несколько десятков циклов колебания устанавливаются относительно состояния равновесия. Очевидно, что при нерегулярном волнении, особенно на волнах с более крутым передним склоном, эта несимметричность колебаний будет только увеличиваться. Это может привести к существенному уменьшению размаха колебаний. Добавление упругих элементов позволяет быстро привести колебательный процесс к симметричному виду. Кроме того, регулированием жесткости упругих элементов можно настроить колебания на резонансный режим.

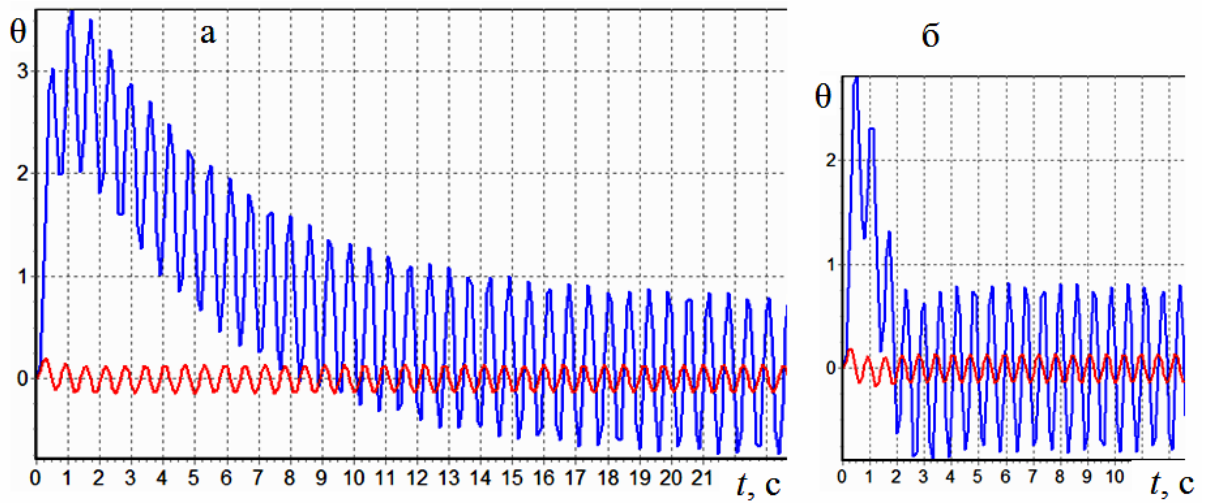


Рис. 4.24. Вынужденные колебания при амплитуде волны 1 см; частоте 10 рад/с и $\beta = 2$ Н·с/рад: а – $n = 0$; б – $n = 2$

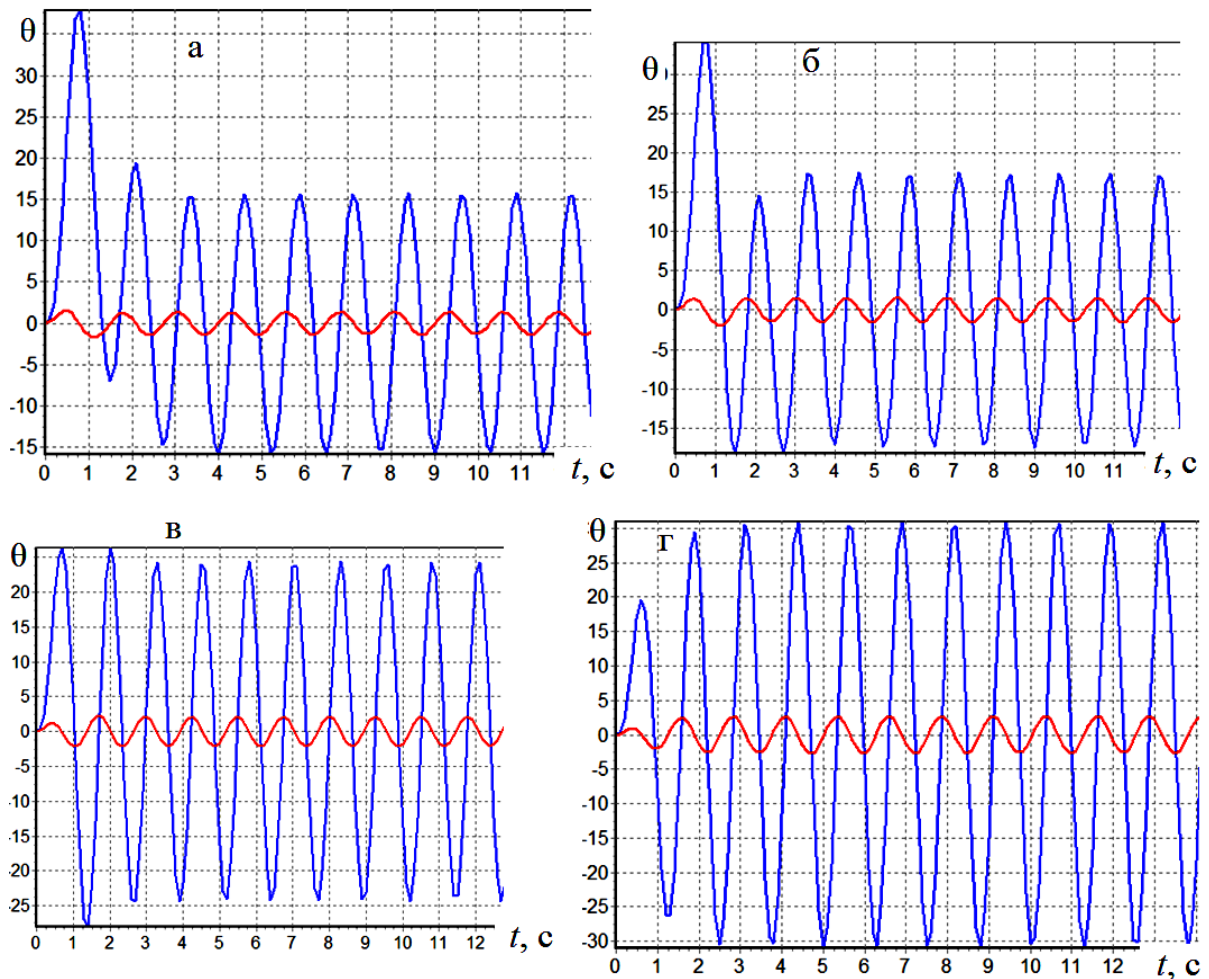


Рис. 4.25. Вынужденные колебания при амплитуде волны 3,35 см; частоте 5,0 рад/с и $\beta = 2$ Н·с/рад: а – $n = 0$; б – $n = 2$; в – $n = 8$; г – $n = 16$

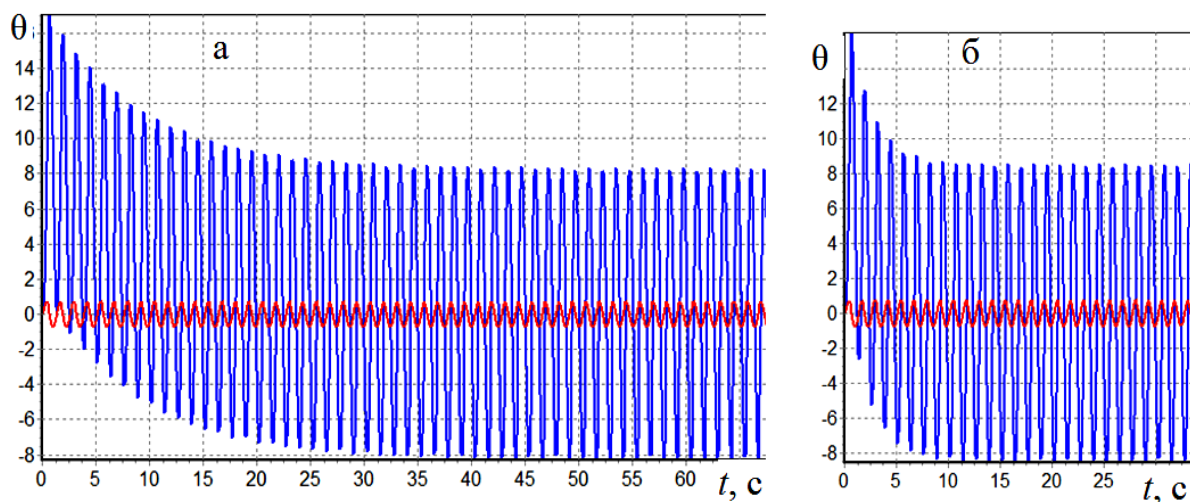


Рис. 4.26. Вынужденные колебания при амплитуде волны 3,35 см; частоте 5,0 рад/с и $\beta = 7$ Н·с/рад: а – $n = 0$; б – $n = 2$

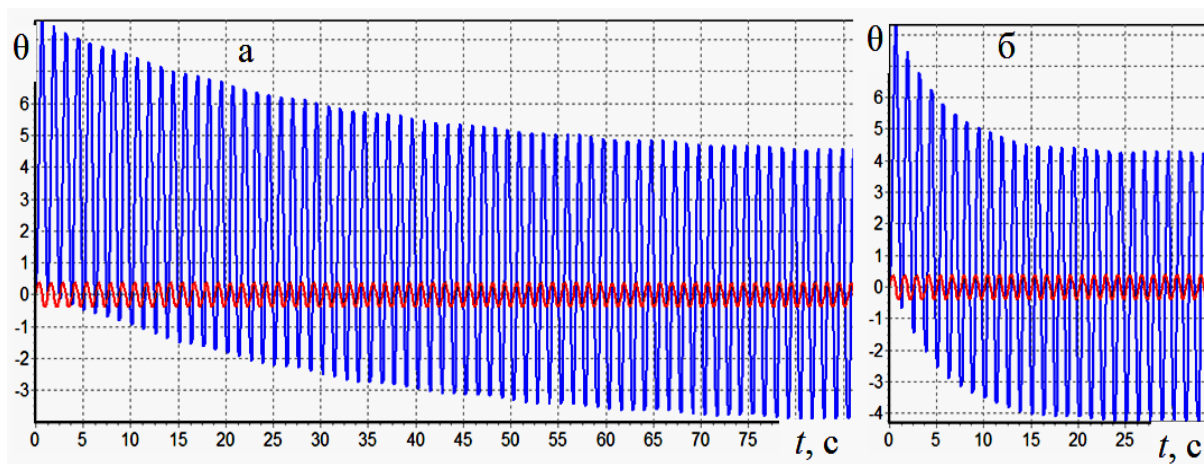


Рис. 4.27. Вынужденные колебания при амплитуде волны 3,35 см; частоте 5,0 рад/с и $\beta = 15$ Н·с/рад: а – $n = 0$; б – $n = 2$

Динамика OWSC на нерегулярном волнении.

Для качественного проектирования преобразователя энергии волн необходим анализ динамики на волнении, приближенном к реальному. В случае линейной системы применяется спектрально-вероятностная модель динамики. Однако при существенной нелинейности, как волнения, так и характеристик преобразователя, спектрально-вероятностная модель может давать существенные погрешности. В этом случае может быть более полезным прямое моделирование нестационарного процесса волнения и динамики преобразователя с последующим анализом результатов моделирования.

Особенностью прибрежного волнения является его существенная

нелинейность в виде явного отклонения формы профиля волн от синусоидального. Вершины волн являются более острыми и высокими, а подошвы – более пологими. Кроме этого, передний склон волны является более крутым, чем задний. В связи с этим одной из задач является разработка моделей реализации волнения как функций времени.

Для моделирования нерегулярного линейного волнения используется суперпозиция линейных волн:

$$p_w(x, z, t) = \sum_n \rho g r_n \cdot e^{k_n z} \sin(k_n x - \omega_n t).$$

Учёт несимметричности переднего и заднего склонов волн в первом приближении можно учесть некоторым увеличением давлений при накате волны и уменьшением давлений при откате волны. Величину этой поправки можно определить на основе экспериментальных данных. В частности, для волн, которые наблюдались на естественной акватории, несимметричность давлений приближённо составляет 5 – 7 %. На рис. 4.28 представлено сопоставление динамики преобразователя на синусоидальном нерегулярном (пакетном) волнении, состоящем из четырёх гармоник, при симметричном профиле волн и при учёте несимметричности (5 %). Видно, что во втором случае колебания происходят относительно отклонённого положения створки примерно на пять градусов.

Несимметричность профиля волн относительно свободной поверхности воды (трохоидальность) приближённо можно представить формулой

$$z_w(x, t) = r \cdot \left(\sin(kx - \omega t) + \frac{\pi r}{\lambda} \cos 2(kx - \omega t) \right).$$

Для давлений соответственно получим:

$$p_w(x, z, t) = \rho g r \cdot e^{kz} \left(\sin(kx - \omega t) + \frac{\pi r}{\lambda} \cos 2(kx - \omega t) \right).$$

На рис. 4.29 представлено сопоставление динамики преобразователя на нерегулярном синусоидальном и трохоидаальном волнении. Во втором случае отклонение среднего положения створки от вертикальной плоскости увеличивается ещё примерно на два градуса и составляет около семи градусов.

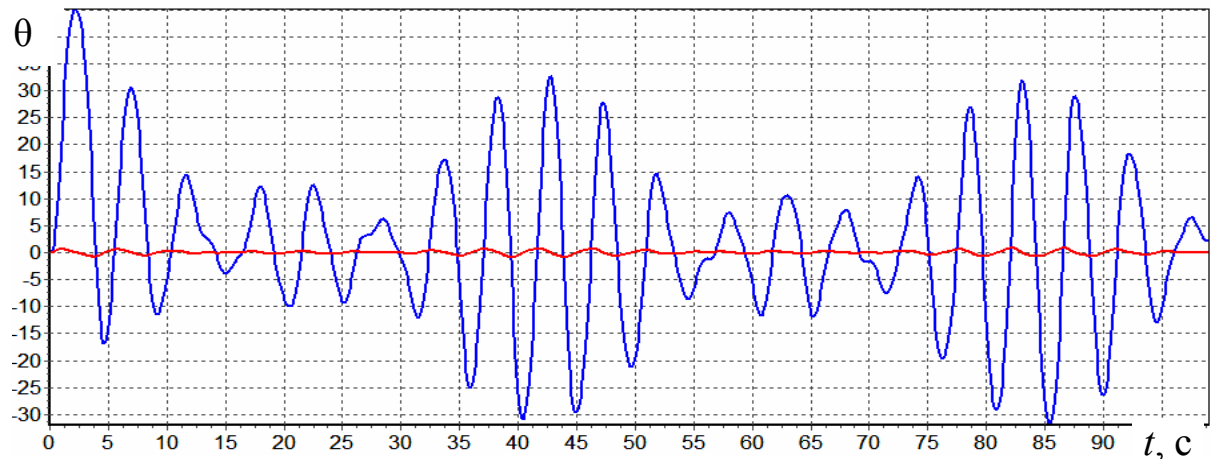
На рис. 4.30 представлена иллюстрация влияния на динамику преобразователя величины сопротивления, показывающая, что при увеличе-

нии отбора мощности (полезного сопротивления) колебания уменьшаются, а их несимметричность (относительно вертикального положения створки) увеличивается.

а)

1.4	1.55	1.25	3.0	четыре частоты волнения, 1/с	omega
0.2	0.18	0.22	0.08	четыре амплитуды волн, м	ampl_w
0				число резинок (с обоих углов с одной стороны)	n_rez
5000.0				коэф. демпфирования устройства отбора мощности	Nu0_PTO
2000.0				коэф. демпфирования волновой	Nu0_w
1.5				высота пластины, м	R_pl
1.5				длина стержня, м	L_st
1.0				длина пластины, м	L_pl
0.05				толщина пластины, м	s_pl
0.2				толщина поплавок, м	b_plav
0.3				высота поплавок, м	h_plav
1300				плотность материала пластины, кг/м ³	ro_pl
100				плотность материала поплавок, кг/м ³	ro_plav
2.0e6				модуль упругости резины, Па	E_rez
0.002				диаметр резинки, м	d_rez

б)



в)

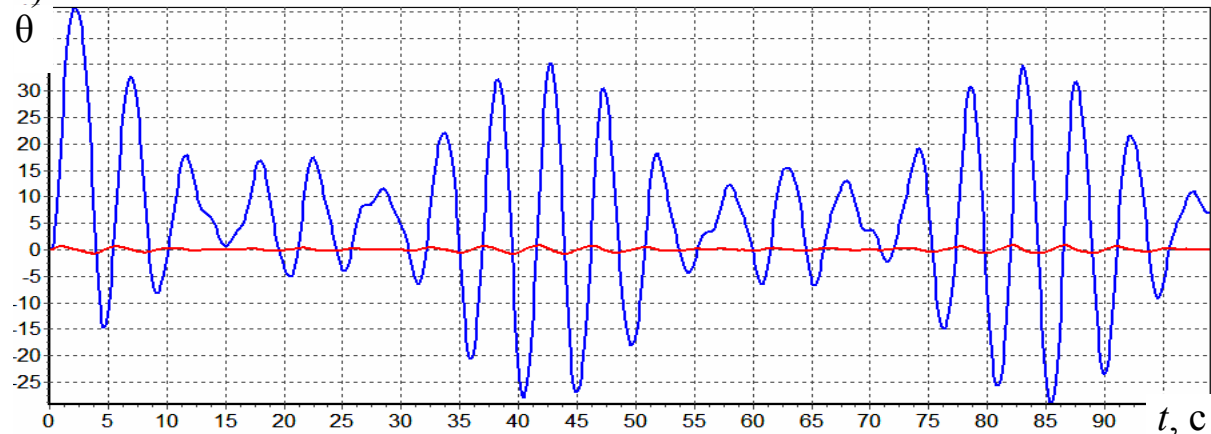


Рис. 4.28. Колебания створки преобразователя на пакетном синусоидальном волнении: а – исходные данные; б – на симметричных волнах; в – на волнах с более крутым передним склоном

а)

1.4	1.55	1.25	3.0	четыре частоты волнения, 1/с	ω
0.2	0.18	0.22	0.08	четыре амплитуды волн, м	ampl_w
0	число резинок (с обоих углов с одной стороны)				n_{rez}
5000.0	коэф. демпфирования устройства отбора мощности				Nu0_PTO
2000.0	коэф. демпфирования волновой				Nu0_w
1.5	высота пластины, м			R_{pl}	
1.5	длина стержня, м			L_{st}	
1.0	длина пластины, м			L_{pl}	
0.05	толщина пластины, м			s_{pl}	
0.2	толщина поплавок, м			b_{plav}	
0.3	высота поплавок, м			h_{plav}	
1300	плотность материала пластины, кг/м ³			ρ_{pl}	
100	плотность материала поплавок, кг/м ³			ρ_{plav}	
2.0e6	модуль упругости резины, Па			E_{rez}	
0.002	диаметр резинки, м			d_{rez}	

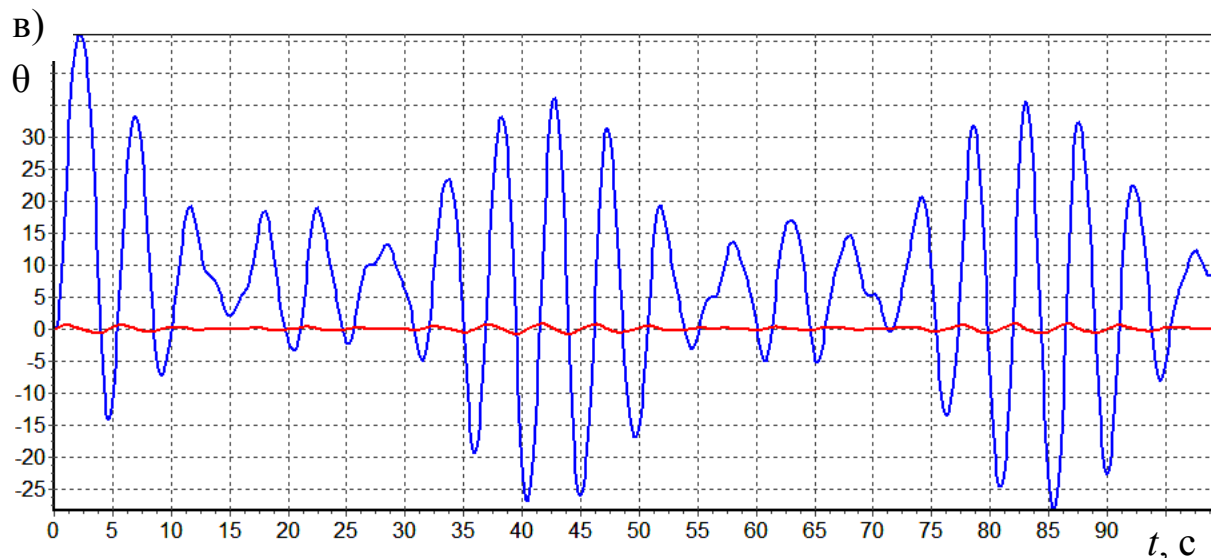
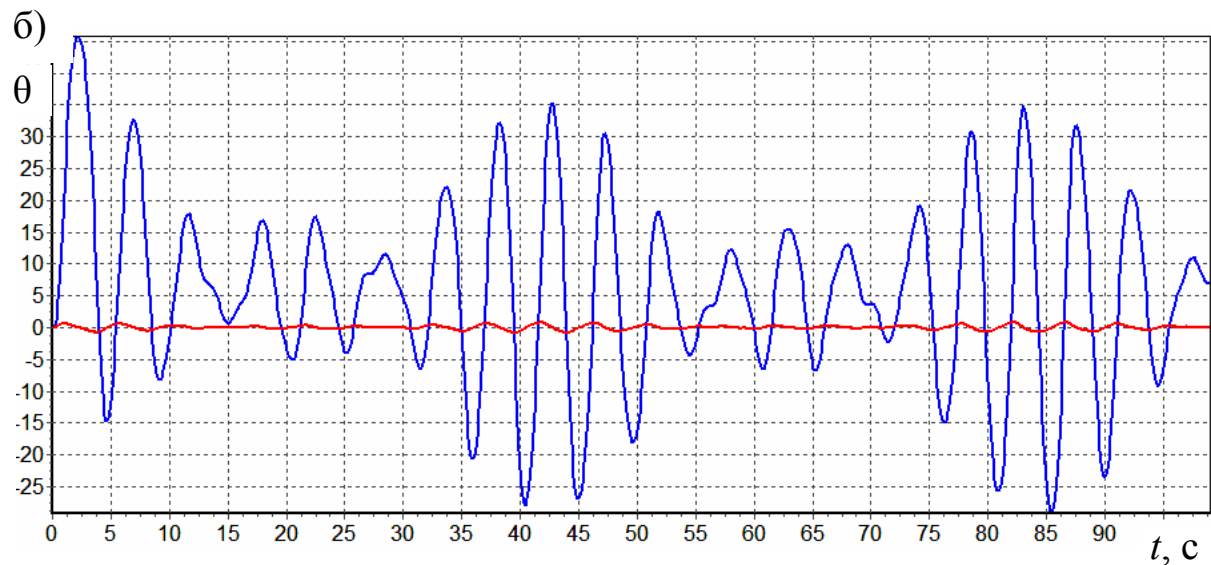


Рис. 4.29. Колебания створки преобразователя на пакетном волнении с более крутым передним склоном: а – исходные данные; б – на синусоидальных волнах; в – на трохоидальных волнах

а)

1.5	1.48	1.38	3.0	четыре частоты волнения, 1/с	omega
0.15	0.1	0.1	0.01	четыре амплитуды волн, м	ampl_w
500	число резинок (с обоих углов с одной стороны)				
n_rez					
5.0 / 5000.0	коэф. демпфирования устройства отбора мощности				
Nu0_PTO					
2000.0	коэф. демпфирования волновой			Nu0_w	
1.5	высота пластины, м		R_pl		
1.5	длина стержня, м		L_st		
1.0	длина пластины, м		L_pl		
0.05	толщина пластины, м		s_pl		
0.2	толщина поплавок, м		b_plav		
0.3	высота поплавок, м		h_plav		
1300	плотность материала пластины, кг/м ³			ro_pl	
1000	плотность материала поплавок, кг/м ³			ro_plav	
2.0e6	модуль упругости резины, Па			E_rez	
0.002	диаметр резинки, м			d_rez	

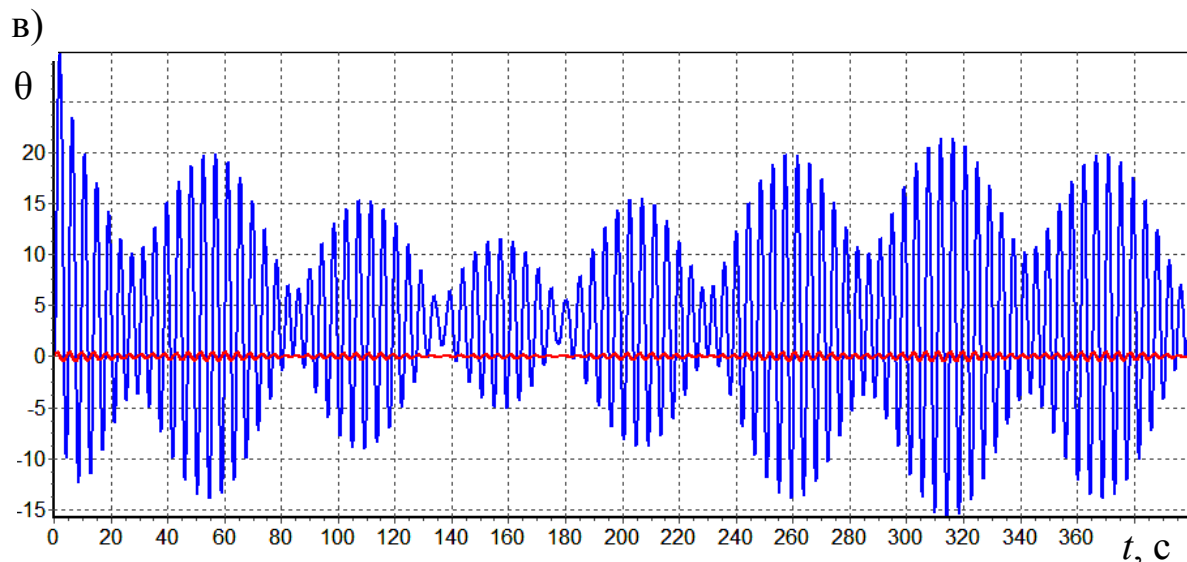
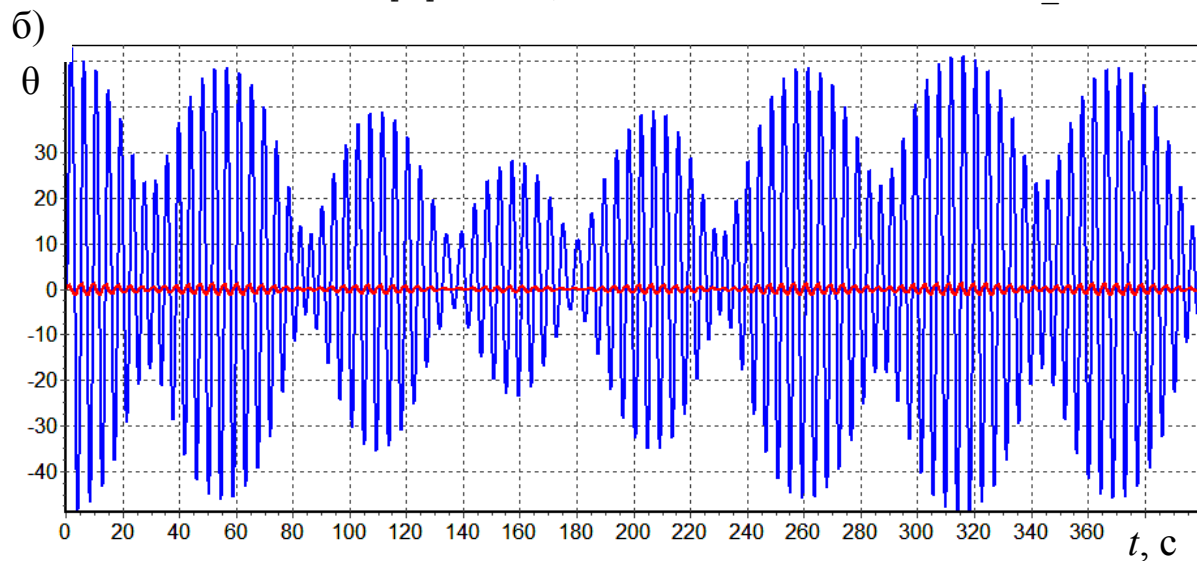


Рис. 4.30. Колебания створки на волнах с крутым передним склоном:
а – исходные данные; б – без полезной нагрузки (на «холостом ходу»);
в – при отборе мощности

Рис. 4.31 иллюстрирует влияние на колебания створки способа формирования восстанавливающих сил. Поплавок позволяет регулировать восстанавливающие силы в меньшем диапазоне, так как его объём ограничен. При этом отклонение среднего положения створки от вертикальной плоскости больше, чем в случае применения упругих связей.

а)

1.5	1.48	1.38	3.0	четыре частоты волнения, 1/с	omega
0.15	0.1	0.1	0.01	четыре амплитуды волн, м	ampl_w
0 / 500	число резинок (с обоих углов с одной стороны)				
n_rez					
5000.0	коэф. демпфирования устройства отбора мощности		Nu0_PTO		
2000.0	коэф. демпфирования волновой		Nu0_w		
1.5	высота пластины, м		R_pl		
1.5	длина стержня, м		L_st		
1.0	длина пластины, м		L_pl		
0.05	толщина пластины, м		s_pl		
0.2	толщина поплавок, м		b_plav		
0.3	высота поплавок, м		h_plav		
1300	плотность материала пластины, кг/м3			ro_pl	
100 / 1000	плотность материала поплавок, кг/м3			ro_plav	
2.0e6	модуль упругости резины, Па			E_rez	
0.002	диаметр резинки, м			d_rez	

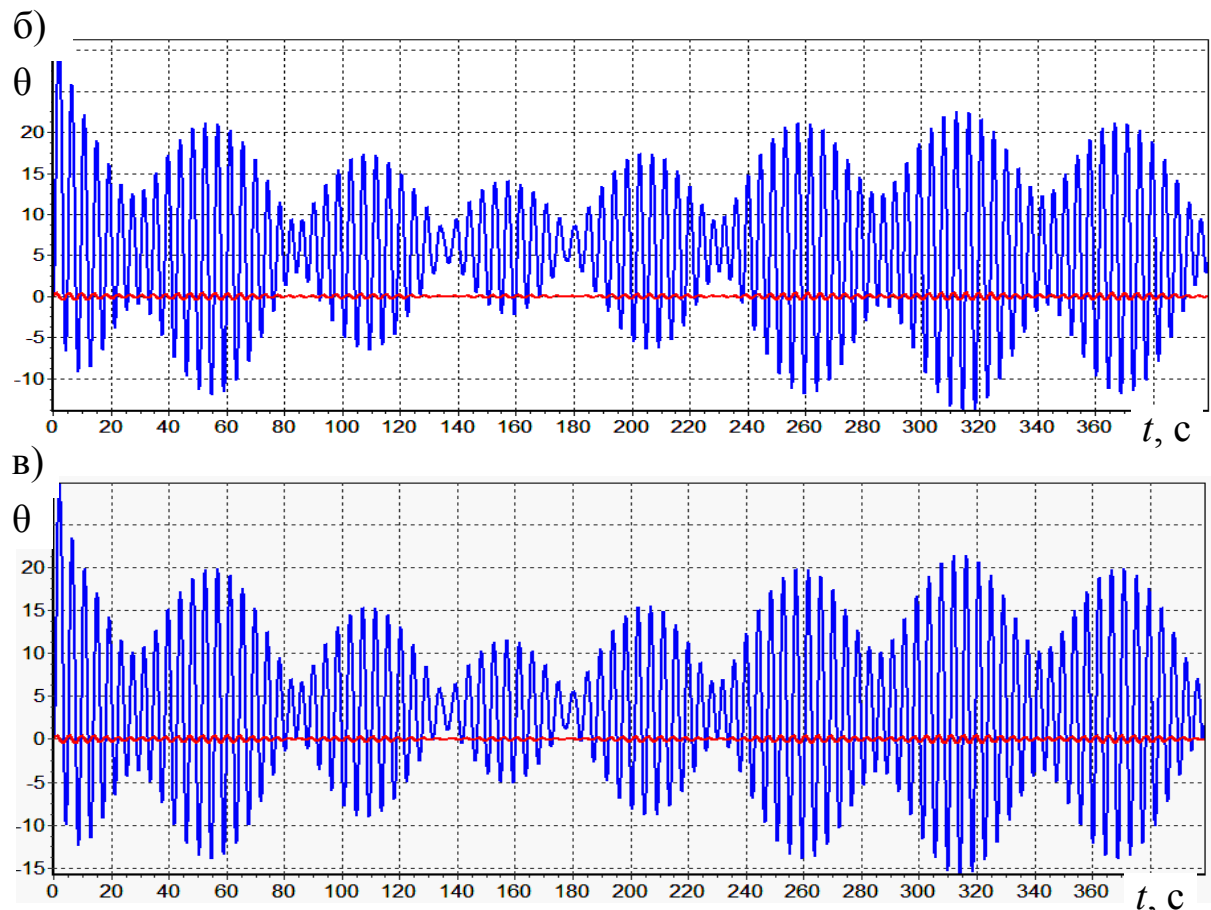


Рис. 4.31. Колебания створки на волнах с крутым передним склоном:
 а – исходные данные; б – система с поплавком;
 в – система с упругими элементами

4.3. Экспериментальные исследования

Математическое моделирование работы волнового преобразователя даже в нелинейной постановке, на основе уравнения (4.3), неизбежно связано с рядом существенных допущений, что не позволяет дать полные ответы на все вопросы практического применения подобных устройств.

Наиболее достоверных результатов следует ожидать от натуральных исследований, однако их проведение требует существенных затрат. Уменьшить трудоемкость и существенно ускорить экспериментальные исследования можно с помощью моделей. Кроме того, по результатам опытов можно получить оценку достоверности математической модели.

На рис. 4.32 приведены варианты модели волнового преобразователя, которые использовались при проведении экспериментальных исследований в опытном бассейне КНАГТУ и в естественной акватории (на озере).

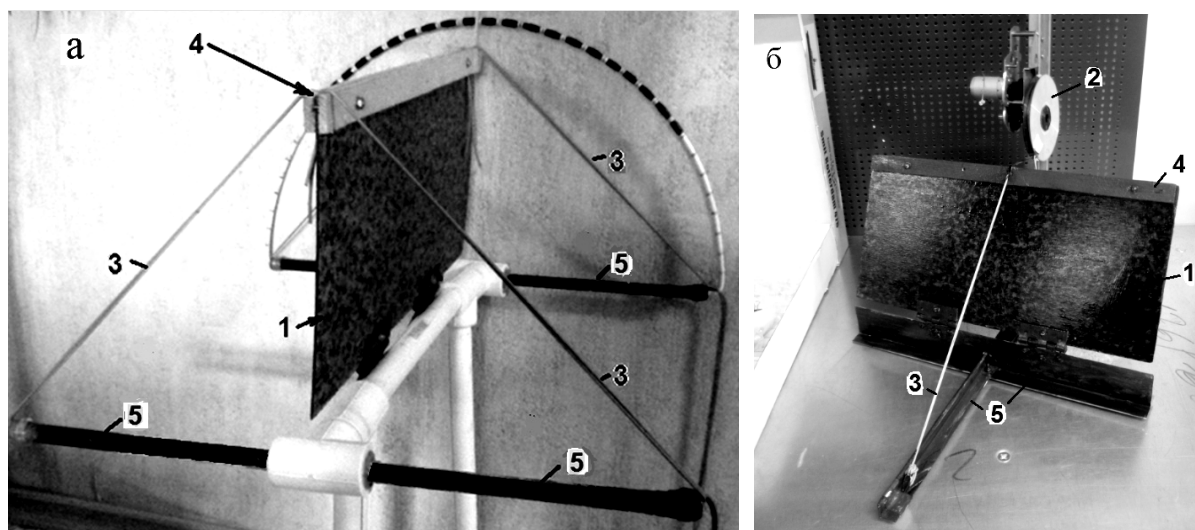


Рис. 4.32. Экспериментальные модели преобразователя энергии волн (обозначения соответствуют рис. 4.1)

Для возможности пересчёта результатов модельных экспериментов на реальные (натурные) условия определим критерии моделирования (подобия). Основные физические параметры, описывающие работу системы: R – характерный размер модели (высота створки), м; g – ускорение свободного падения, м/с²; E – модуль упругости резиновых связей, Па; τ – период волн, с; v – характерная скорость, в качестве которой может быть принята фазовая скорость волны или скорость

движения верхнего края створки (поплавка), м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; ν – вязкость жидкости, м²/с.

В результате анализа параметров на основе π -теоремы и теории размерностей получаем четыре критерия подобия:

- число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gR}}$;
- число Струхаля $Sh = \frac{R}{\nu\tau}$;
- число Рейнольдса $Re = \frac{\nu R}{\nu}$;
- число Эйлера $Eu = \frac{E}{\rho\nu^2}$.

Анализ возможности обеспечения равенства данных критериев для натурной системы и моделей позволил получить параметры моделей. Эти параметры, соответствующие натурной системе с высотой створки 2 м представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Параметры натурной установки и вариантов моделей

Название	Обозначение	Натура	Модели	
			1	2
Длина волны, м	λ	20	2	5
Высота волны, м	h_b	0,5	0,05	0,125
Высота створки, м	R	2	0,2	0,5
Ускорение свободного падения, м/с ²	g	9,81	9,81	9,81
Круговая частота волны, рад/с	ω	1,755	5,55	3,51
Период волны, с	τ	3,58	1,13	1,79
Скорость движения поплавка, м/с	v	3,51	1,11	1,76
Плотность воды, кг/м ³	ρ	1	1	1
Вязкость, м ² /с	ν	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Модуль упругости резины, Па	E	10	10	10
Площадь сечения резины, см ²	S	0,63	0,063	0,157
Число Эйлера	Eu	0,81	8,11	3,25
	$Eu \cdot S$	0,51	0,51	0,51
Число Фруда	Fr	0,79	0,79	0,79
Число Струхаля	Sh	0,16	0,16	0,16
Число Рейнольдса	Re	$6,2 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^6$	$0,8 \cdot 10^6$

Подобие по числу Эйлера достигается в моделях за счёт подбора площади сечения эластичных связей S (т. е. фактически в качестве критерия принимается $Eu \cdot S$).

Из табл. 4.1 видно, что в экспериментах нельзя добиться подобия по числу Рейнольдса. Такая ситуация с частичным подобием характерна для моделирования динамики морских гидротехнических объектов.

Переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при критическом числе Рейнольдса $Re_{кр}$. Этот критерий хорошо действует для напорных потоков. При переходе к безнапорным потокам со свободной поверхностью переходная зона между ламинарным и турбулентным режимами возрастает, и использование числа Рейнольдса как критерия не всегда правомерно. Тем не менее, в ряде работ доказывается, что к задачам с волновым движением жидкости можно подходить с позиций оценки его по критическим числам Рейнольдса [19, с. 59; 25, с. 142]. Однако в нашем случае наблюдается не свободное волновое движение, а взаимодействие волн с движущейся створкой, поэтому вопрос остается открытым.

Развитое турбулентное течение часто наблюдается при Re_1 существенно большем, чем $Re_{кр}$. А в диапазоне от $Re_{кр}$ до Re_1 наблюдается смешанное течение (переходный режим). При моделировании выделяется режим автомодельности: $Re \gg Re_{кр}$. В этом случае несоблюдения подобия по числу Рейнольдса не приводит к существенным погрешностям моделирования.

Значение критического числа Рейнольдса $Re_{кр}$ для случая продольного обтекания плоской пластины изменяется в диапазоне от $3 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^6$ в зависимости от состояния внешнего потока и от некоторых других обстоятельств, например, от степени шероховатости поверхности пластины. Для волновых движений по разным источникам $Re_{кр}$ изменяется в диапазоне от 10^4 до 10^5 [18; 19, с. 59; 25, с. 142].

Таким образом, следует отметить, что из-за нестационарности относительного движения, скорости обтекания пластины в каждый момент времени и в разных точках пластины изменяются в широком диапазоне (от нуля до $Re \gg Re_{кр}$). Поэтому характер влияния Re на точность моделирования необходимо дополнительно экспериментально исследовать. Наиболее надёжным в этом случае будет применение разных по размерам моделей с последующей экстраполяцией и анализом результатов моделирования.

Результаты экспериментов в естественной акватории.

Эксперименты с моделью, изображённой на рис. 4.32, а, выполнялись на нерегулярном ветровом волнении в естественной акватории (рис. 4.33). Фотографии в ходе проведения экспериментов представлены на рис. 4.34. На рис. 4.35 представлен спектр волнения.

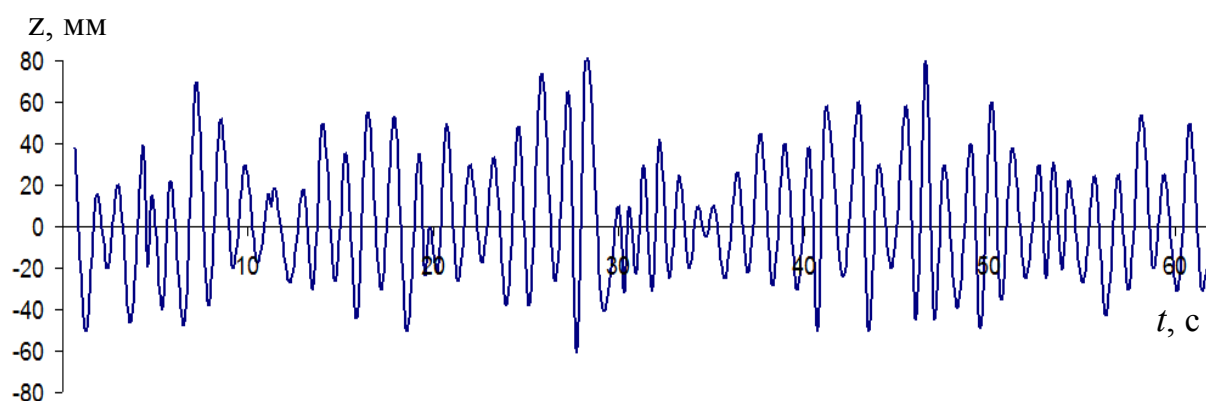


Рис. 4.33. Типичная реализация нерегулярного волнения в экспериментах

Статистические параметры волнения: средняя высота 67,05 мм; стандарт высоты 26,72 мм; средняя амплитуда 33,53 мм; средняя частота 5,87 рад/с; плотность энергии на единицу площади 1751 Дж/м² (0,486 Вт/(ч·м²)).

Особенностью волнения в экспериментах является его нелинейность в виде явного отклонения формы профиля волн от синусоидального. Вершины волн являются более острыми и высокими, а подошвы — более пологими. В результате раскачка пластины преобразователя получается несимметричной. Так, при $n = 2$ средний угол отклонения при накате волн составляет 16°, а при откате волн — 10,75°.

На рис. 4.36 приведен пример записи углов отклонения системы при $n = 2$ (n — количество резиновых нитей с каждой стороны). На рис. 4.37 представлен спектр углов раскачки системы при такой же жёсткости.

Выполненные эксперименты позволили оценить достоверность расчётов по математическим моделям. При $n = 2$ ($\omega_0 = 1,486$ рад/с) и средней частоте волнения 5,87 рад/с: рассчитанная амплитуда раскачки по линейной модели составляет 20°; по нелинейной модели — 13,5°. В опытах средний угол отклонения при накате волн составляет 16,0°.

а при откате волн – $10,75^\circ$ (осреднённое значение: $13,4^\circ$).

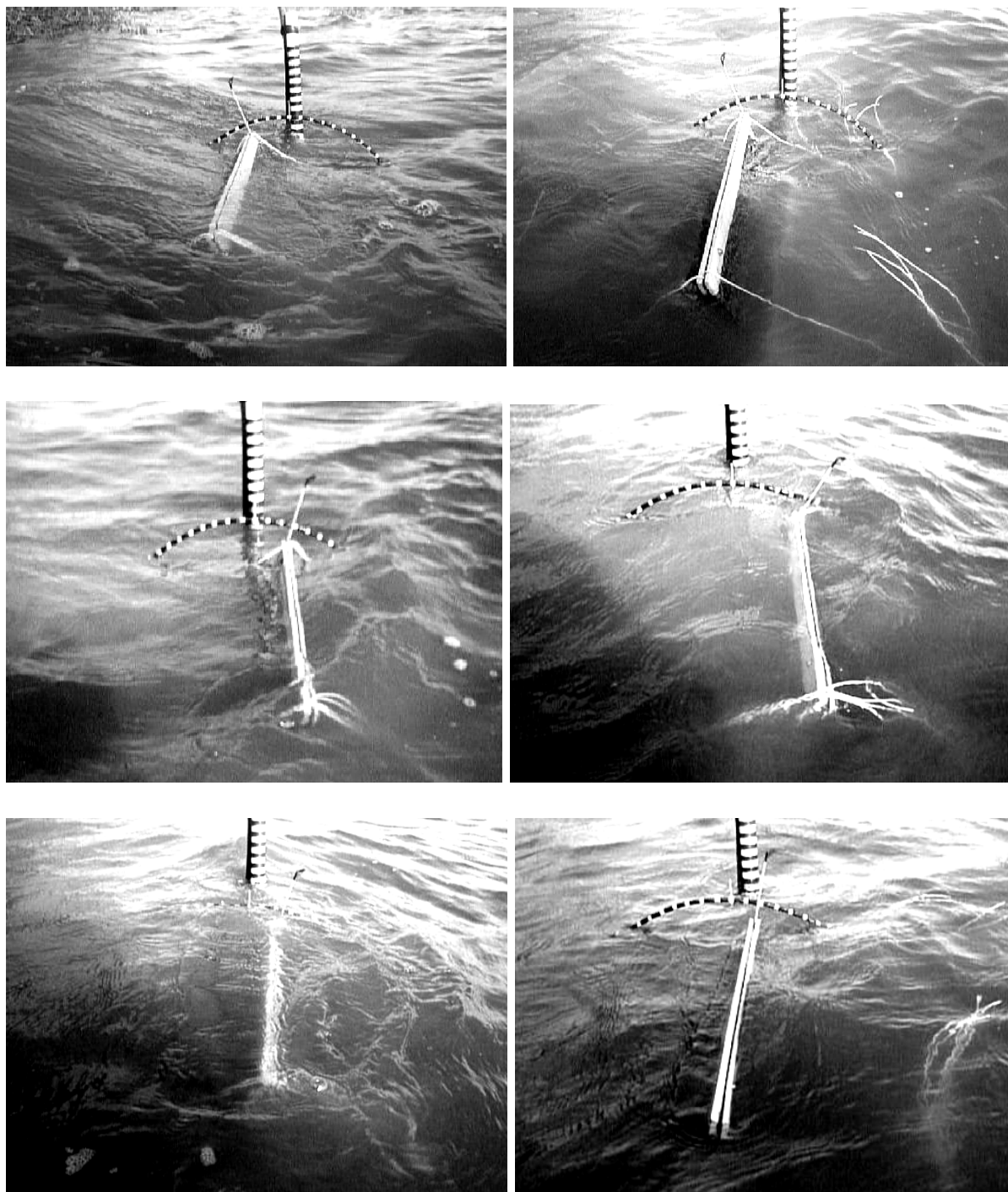


Рис. 4.34. Экспериментальные исследования на нерегулярном волнении

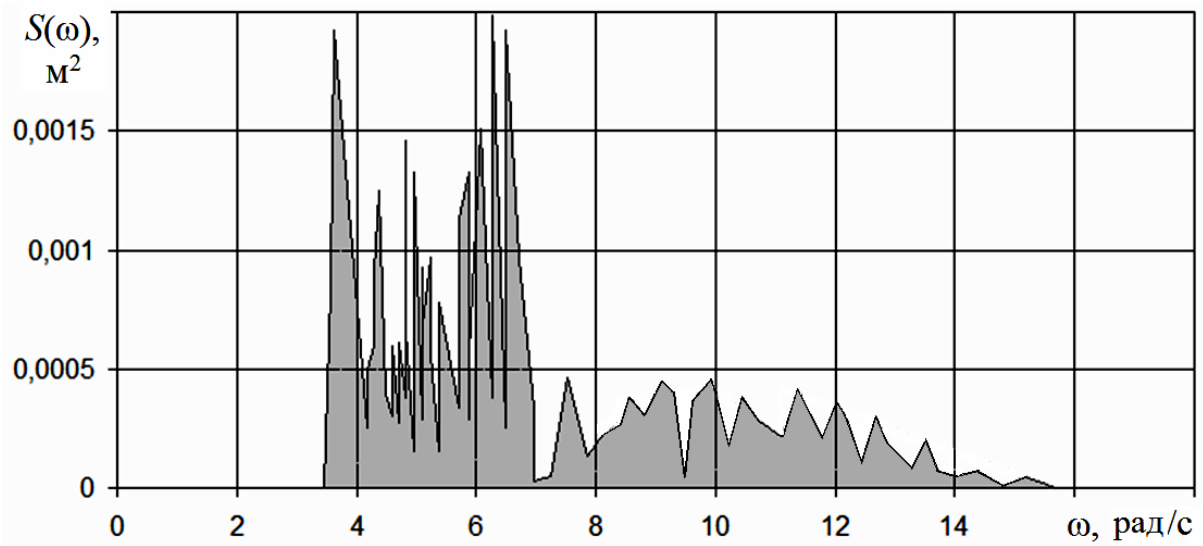


Рис. 4.35. Энергетический спектр волнения

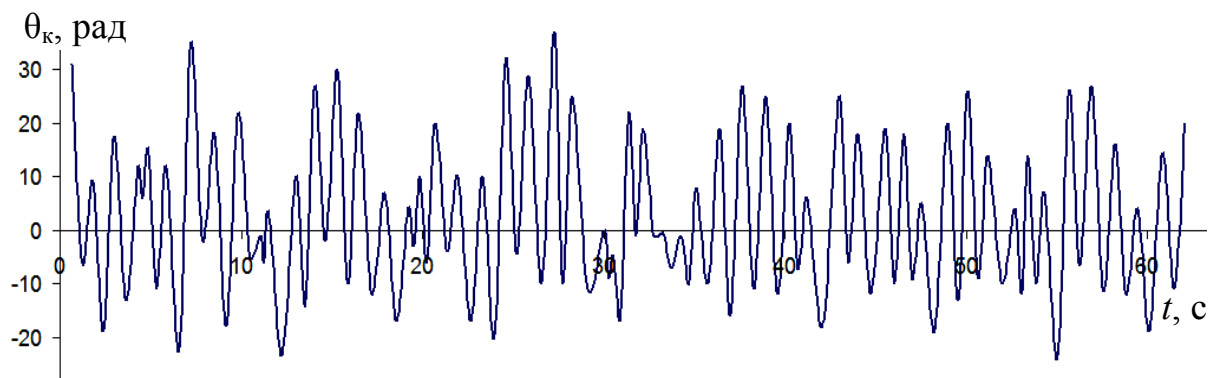


Рис. 4.36. Временная зависимость углов раскачки системы при $n = 2$

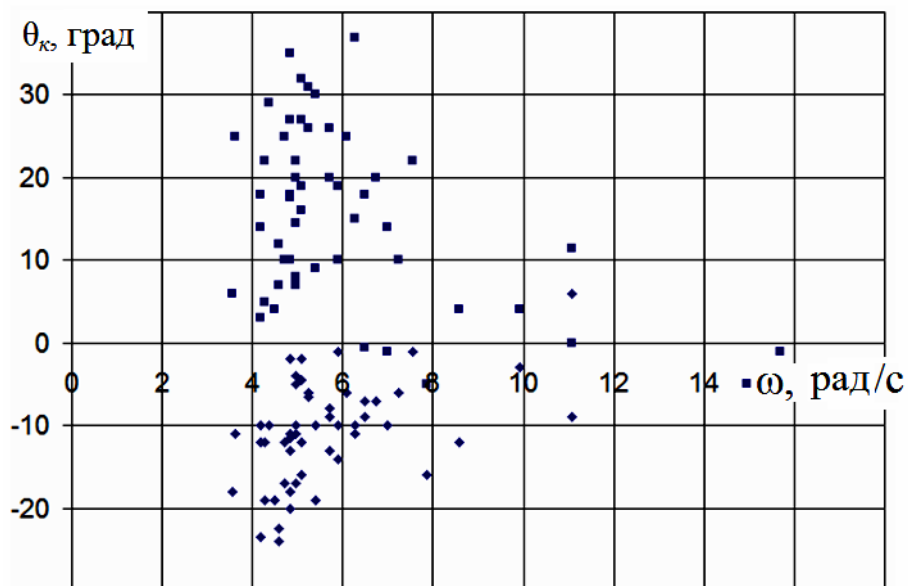


Рис. 4.37. Спектр углов раскачки системы при $n = 2$

Так как ветровое (особенно прибрежное) волнение может характеризоваться существенной несимметричностью профиля волн, нагрузка на пластину преобразователя может значительно различаться с разных сторон (со стороны моря и берега). Это отличие определяется не только разной крутизной переднего и заднего склонов волны, но и несимметричности формы полуволн относительно уровня плоскости тихой воды. В связи с этим представляет интерес изучение возможности применения разных по мощности устройств отбора энергии волн и эластичных элементов различной жесткости с разных сторон пластины. В экспериментальной модели такой эффект моделируется различным числом резиновых нитей по сторонам пластины.

На рис. 4.38 показана временная зависимость углов раскачки системы при числе нитей $n = 5$ со стороны водоёма (накат волн) $n = 2$ со стороны берега (откат волн).

На рис. 4.39 приведен график зависимости средней амплитуды угла отклонения пластины от числа резиновых нитей по результатам опытов.

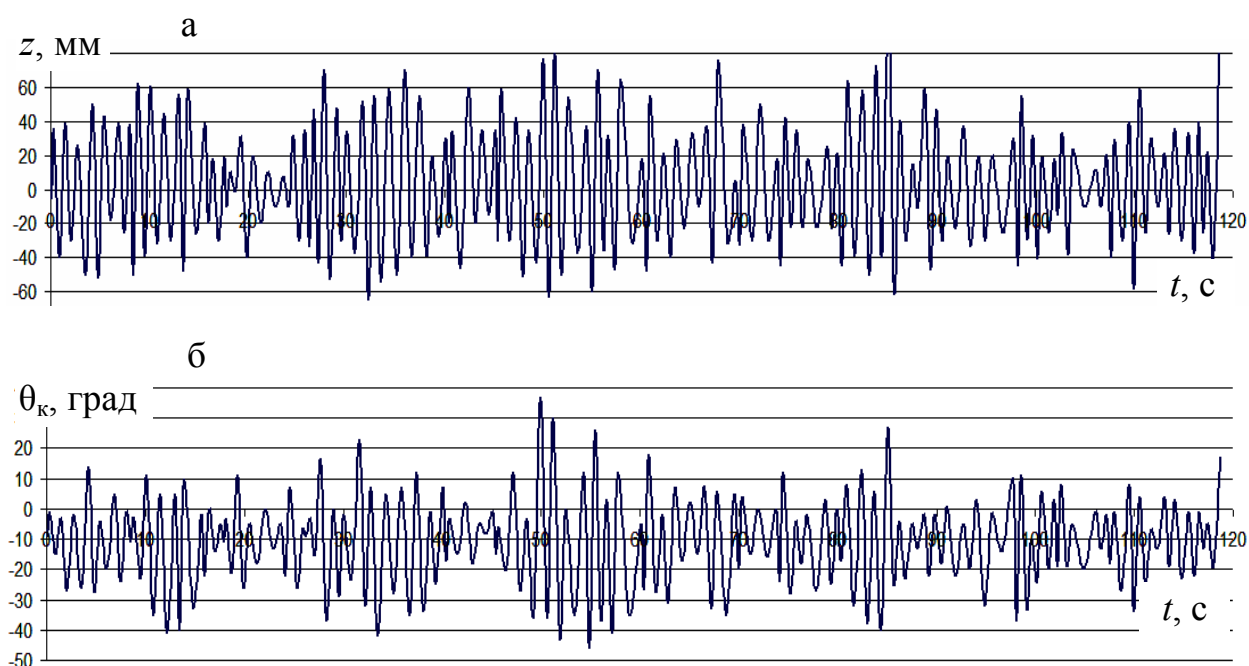


Рис. 4.38. Реализация нерегулярного волнения и углы раскачки системы при переменной жёсткости (по 5 резиновых нитей против наката волн и по 2 нити против отката волн): а – волнение; б – углы отклонения пластины

Результаты экспериментов в опытовом бассейне.

В опытовом бассейне КНАГТУ, имеющем длину 45 м, глубину 3 м и ширину 4,1 м, эксперименты проводились на волнении, генерируемом волнопродуктором. Модель установлена на специальном втором дне, заглубленном на высоту пластины преобразователя (25 см), на среднем по длине участке бассейна (рис. 4.40). Отражение волн по фронту подавляется волногасителями. Диапазон частот работы волнопродуктора составляет 0,5 – 1,7 Гц.

Опыты проводились при стационарных режимах работы волнопродуктора. Следует отметить, что относительно регулярное волнение образуется только на низких частотах (до 1 Гц). На более высоких частотах формируются волновые пакеты.

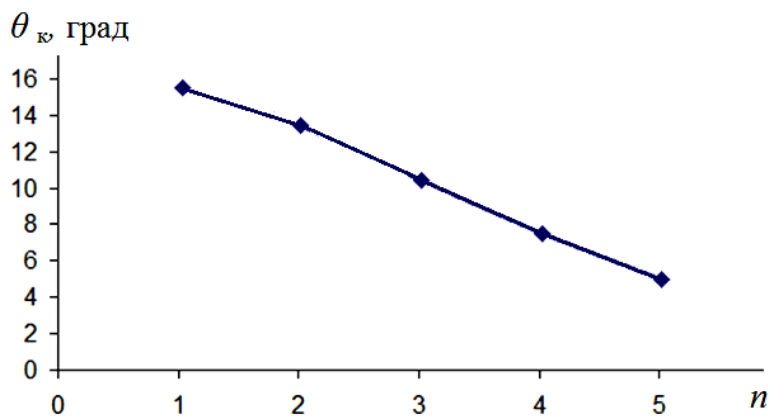


Рис. 4.39. Зависимость средней амплитуды угла отклонения пластины от жёсткости эластичных элементов

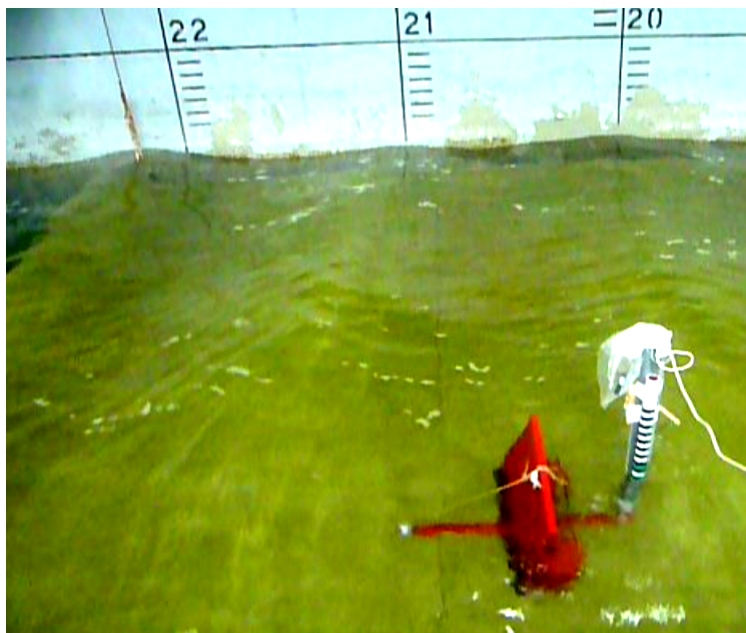


Рис. 4.40. Опыт в бассейне на волнении с частотой 1,2 Гц

На рис. 4.41 – 4.43 представлены характерные примеры амплитудных спектров и колебаний пластины преобразователя.

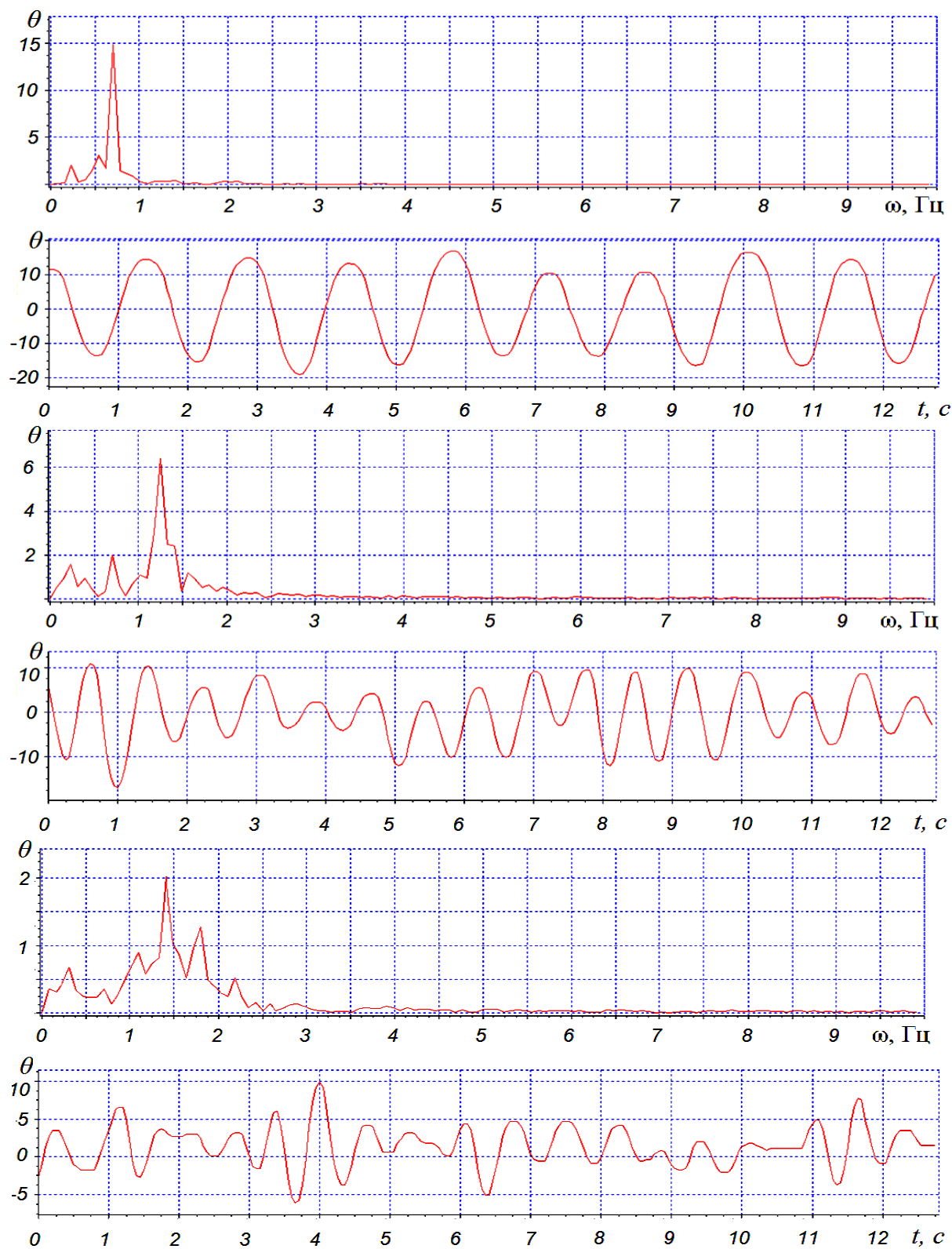


Рис. 4.41. Спектры амплитуд и колебания преобразователя при $n = 2$

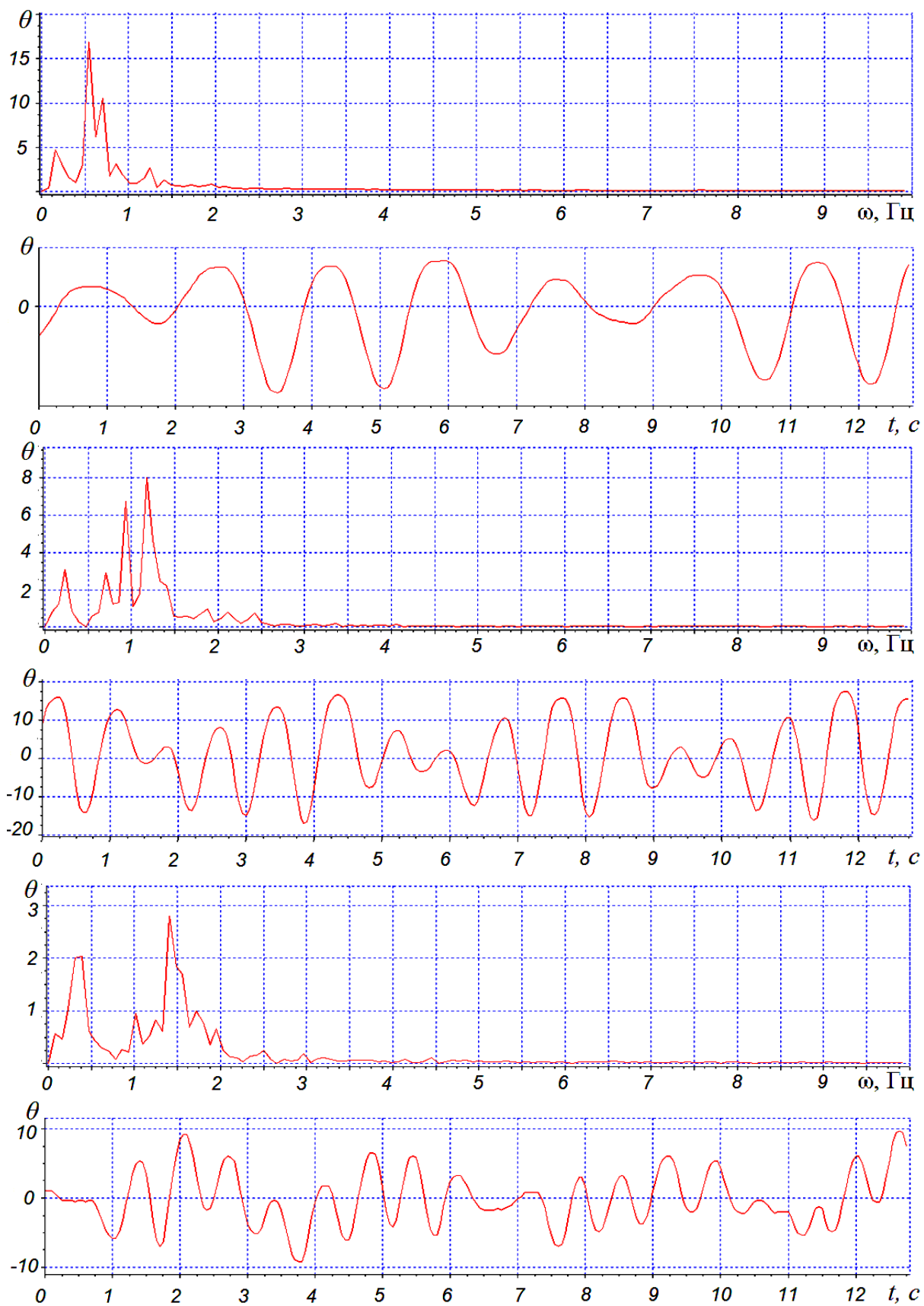


Рис. 4.42. Спектры амплитуд и колебания преобразователя при $n = 4$

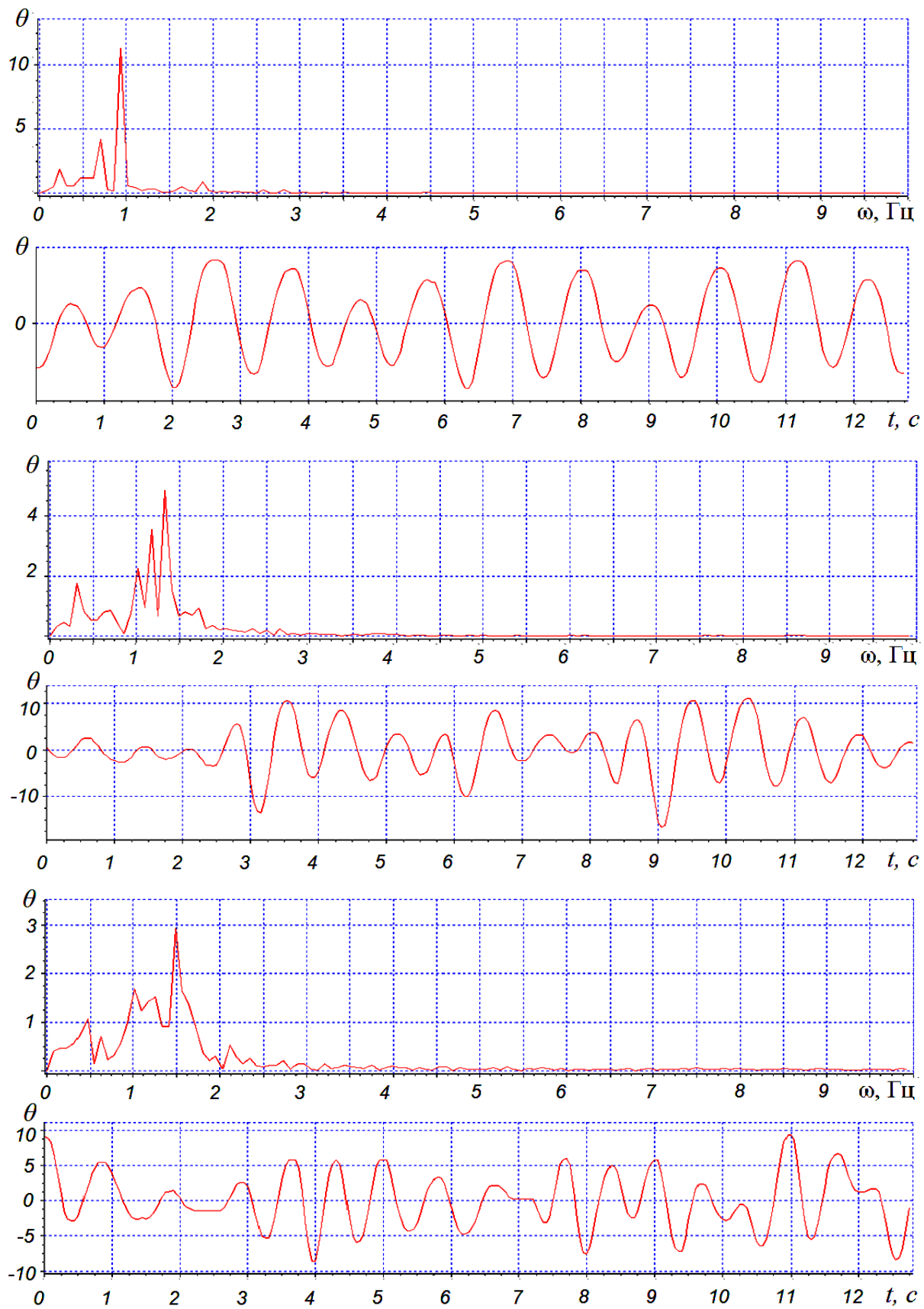


Рис. 4.43. Спектры амплитуд и колебания преобразователя при $n = 6$

4.4. Численное моделирование

Для более полного анализа динамики преобразователя энергии волн полезно использовать численное моделирование. Рассмотрим результаты расчётов методом конечных объемов [73, с. 201; 82] упрощенной плоской модели преобразователя волновой энергии в виде шарнирно закреплённой пластины, качающейся в несжимаемой вязкой жидкости.

Пластина имеет высоту $R = 205$ мм и толщину $b = 40$ мм. Восстанавливающий момент, возвращающий пластину в вертикальное положение, обеспечивается её меньшей плотностью $0,6$ г/см³ по сравнению с плотностью жидкости, равной $1,0$ г/см³. Волнение в численной модели задается продольными колебаниями волнопродуктора в виде вертикальной стенки, расположенного на удалении около четырех длин волн от исследуемого преобразователя.

На рис. 4.44 и 4.45 представлены результаты расчётов для преобразователя, расположенного над горизонтальным и наклонным дном.

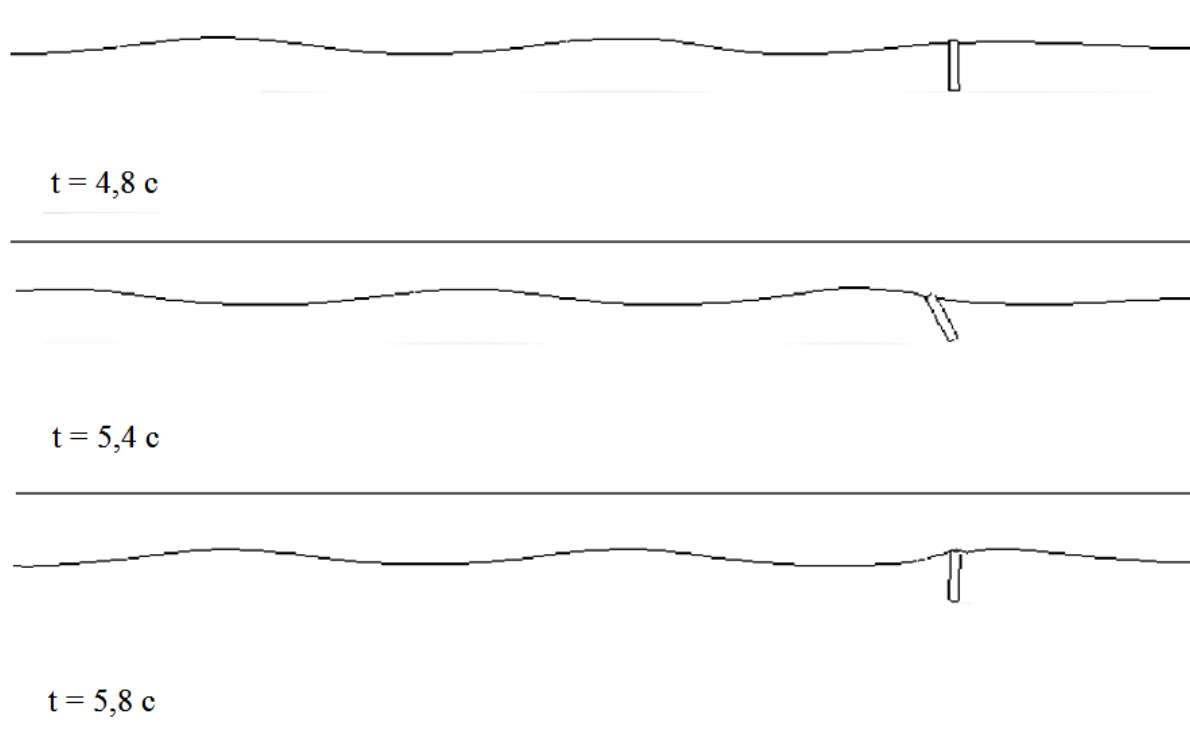


Рис. 4.44. Колебания на волнении высотой 46 мм и частотой 1,0 Гц над горизонтальным дном

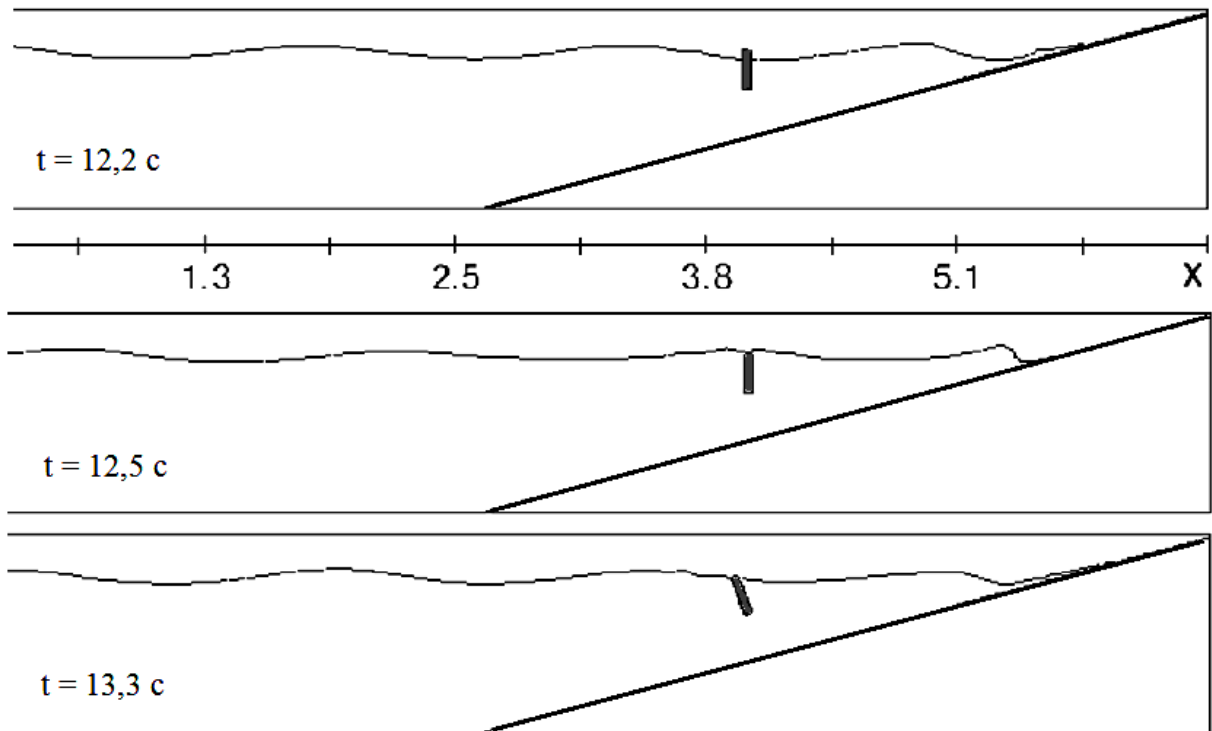


Рис. 4.45. Колебания на волнении высотой 46 мм и частотой 1,0 Гц над склоном дна

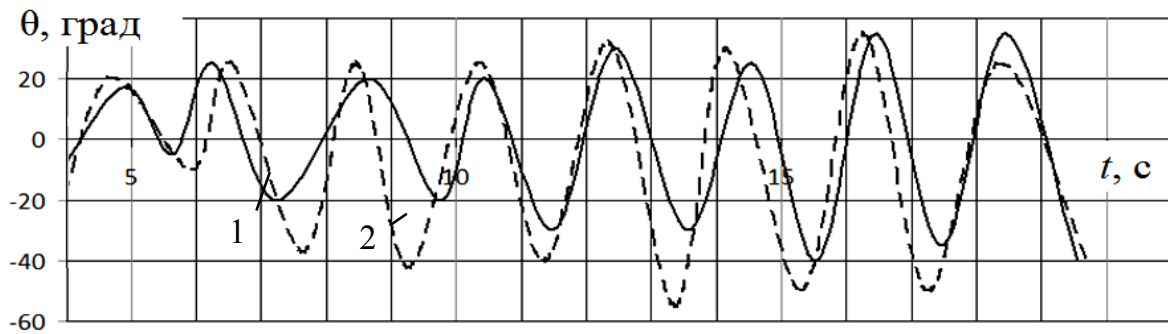


Рис. 4.46. Колебания преобразователя на волнении высотой 50 мм и частотой 0,5 Гц: 1 – над горизонтальным дном; 2 – над дном с уклоном

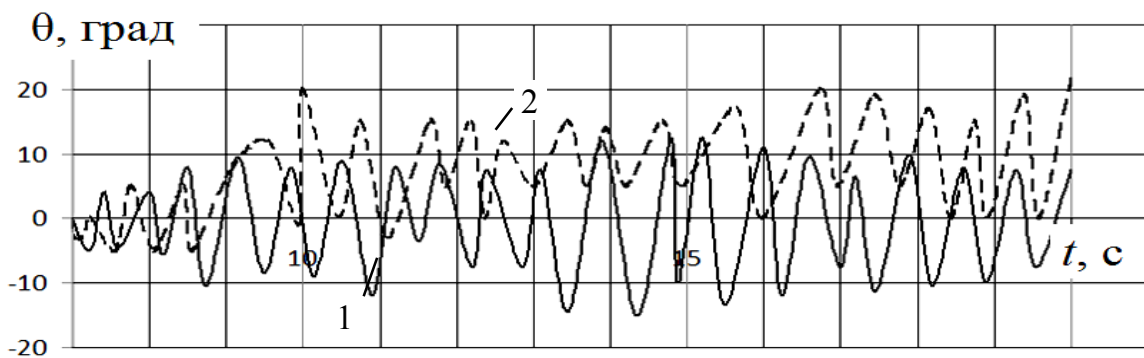


Рис. 4.47. Колебания преобразователя на волнении высотой 46 мм и частотой 1,0 Гц: 1 – над горизонтальным дном; 2 – над дном с уклоном

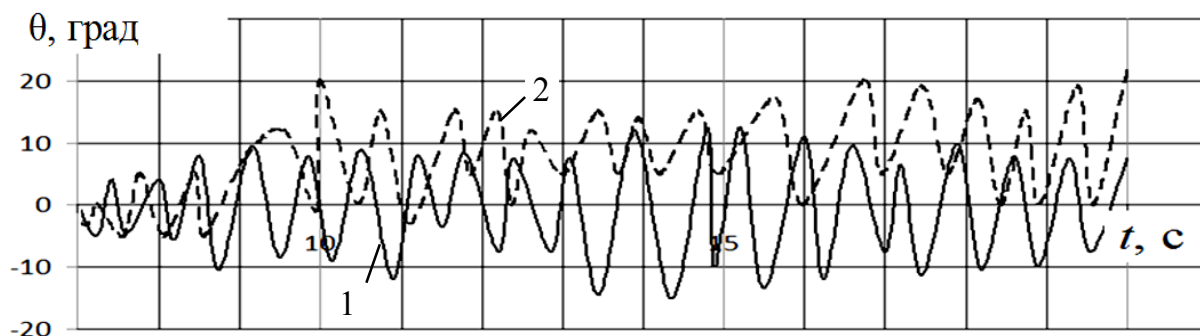


Рис. 4.48. Колебания преобразователя на волнении высотой 35 мм и частотой 1,5 Гц: 1 – над горизонтальным дном; 2 – над дном с уклоном

Анализ результатов позволил сделать выводы.

1. При существенном уклоне дна и крупных пологих волнах большая часть их энергии расходуется на формирование отражённых волн, которые, накладываясь на набегающие волны, образуют более высокие стоячие волны. В результате амплитуды колебаний преобразователя в районе формирования стоячих волн увеличиваются (см. рис. 4.46, 4.49).

2. При активном взаимодействии набегающих волн с наклонным дном и преобразователем характер разрушения волн может существенно изменяться (рис. 4.52).

3. Короткие волны на уклоне отражаются незначительно и при этом имеют большие потери энергии на трение. Поэтому над наклонным дном они в меньшей степени раскачивают пластину преобразователя, чем на большей глубине. При этом пластина над склоном раскачивается относительно наклонного положения в сторону берега (рис. 4.48).

4. Взаимодействие относительно коротких набегающих волн с преобразователем приводит к образованию нерегулярной волновой структуры. Эта нерегулярность становится более существенной под влиянием наклонного дна (рис. 4.47, 4.48, 4.50, 4.51).

5. Малая собственная частота колебаний преобразователя приводит к тому, что на коротких волнах он раскачивается вдали от области резонанса и недостаточно интенсивно (рис. 4.48, 4.51). Для таких условий необходимо существенно повышать собственную частоту системы, однако это технически сложно сделать только за счёт повышения плавучести. Более гибкая настройка преобразователя может быть обеспечена за счёт применения дополнительных упругих элементов.

Кроме преобразователя в виде вертикальной пластины рассматривалось аналогичное устройство с неподвижным шарниром, расположенным горизонтально вблизи уровня воды. На основе сопоставления колебаний горизонтально и вертикально ориентированных преобразователей отметим, что раскачка вертикальной пластины более интенсивно происходит на длинных волнах, в то время как колебания горизонтальной пластины больше на коротких крутых волнах.

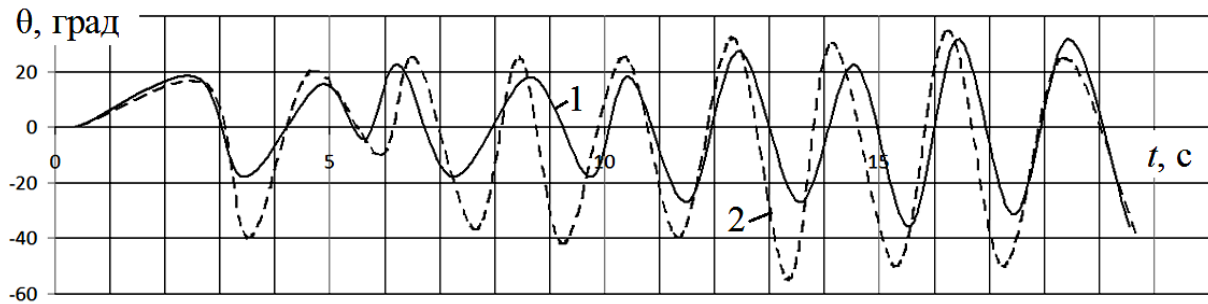


Рис. 4.49. Колебания преобразователя над дном с уклоном и частотой волн 0,5 Гц: 1 – высота волн 23 мм; 2 – высота волн 50 мм

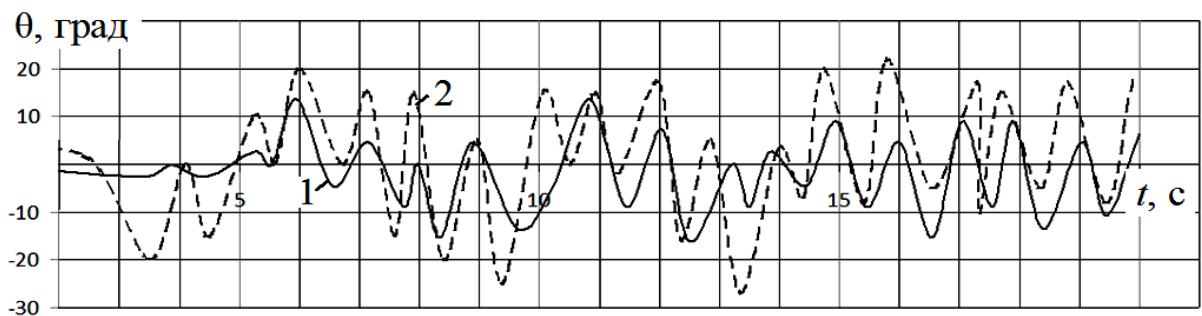


Рис. 4.50. Колебания преобразователя над дном с уклоном и частотой волн 1,0 Гц: 1 – высота волн 23 мм; 2 – высота волн 46 мм

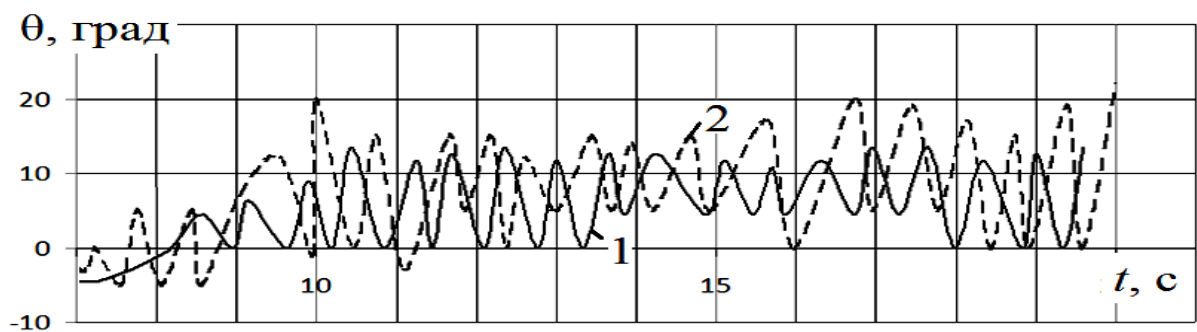


Рис. 4.51. Колебания преобразователя над дном с уклоном и частотой волн 1,5 Гц: 1 – высота волн 23 мм; 2 – высота волн 35 мм

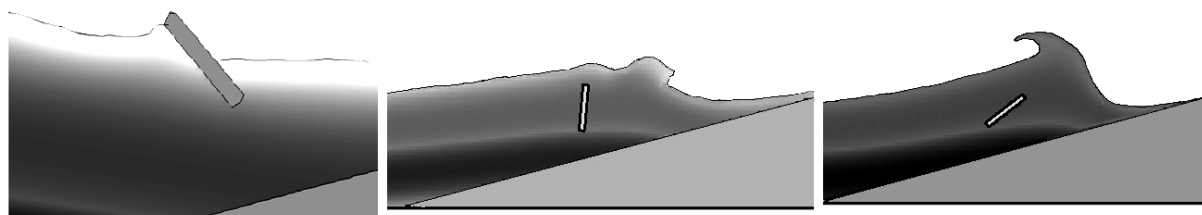


Рис. 4.52. Примеры искажения формы разрушающейся волны

4.5. Вопросы проектирования

В условиях недостаточности опыта и статистики условий эксплуатации реальных волновых электростанций в основе проектирования волновых преобразователей лежит расчётно-экспериментальный исследовательский метод. Суть его состоит в создании и анализе математических, компьютерных и физических моделей установки с последующей корректировкой и оптимизацией моделей. С другой стороны, при проектировании преобразователей энергии волн могут быть применены многие положения нормативных документов, касающихся морских гидротехнических сооружений [10-12]. Приведем далее некоторые обобщённые зависимости, позволяющие упростить проектные расчёты, в частности, конструкций створки и силовых элементов.

4.5.1. Определение основных элементов преобразователя и выбор места установки

Вначале следует определить необходимую среднюю высоту волн h , м, исходя из ориентировочного значения к.п.д. η и заданной мощности установки на один метр длины волнового фронта P , Вт:

$$h = 0,03 \sqrt[5]{\frac{P^2}{\eta^2}}.$$

После этого выбирается место установки преобразователя. Исходя из глубины на месте установки, определяется высота створки R . Место установки преобразователя непосредственно связано с его основными характеристиками. При этом необходимо учитывать следующее.

Средняя высота волн и глубина в месте установки должна быть согласована с высотой створки. Верхний край створки должен возвышаться над свободной поверхностью тихой воды примерно на амплитуду

ду средней волны. Это обеспечит наиболее полное использование энергии большинства волн.

При наличии зоны прибоя преобразователь рекомендуется размещать непосредственно перед ней со стороны моря. Это обеспечит использование волн увеличенной высоты и частоты, а значит и более концентрированной энергии при относительно небольшой высоте створки преобразователя.

Ширина створки (вдоль волнового фронта) L , определяемая условиями гидродинамического качества и прочности, рекомендуется в диапазоне:

– при установке одного устройства отбора мощности (РТО) посередине ширины створки $1 \leq L/R \leq 1,5$;

– при двух РТО по краям створки $1,5 \leq L/R \leq 3$.

Возможна большая ширина створок. При этом количество РТО выбирается из соотношения: $1,5 \leq L_1/R \leq 3$, где L_1 - расстояние между опорами РТО.

4.5.2. Определение расчётных нагрузок

Для определения расчётных нагрузок при проектировании конструкции преобразователя могут быть применены соответствующие требования и формулы строительных норм и правил (СНиП), касающиеся морских гидротехнических сооружений [33–35]. Однако, учитывая отличие условий взаимодействия с волнением элементов преобразователя и конструкций традиционных гидротехнических сооружений, здесь представлены дополнительные зависимости.

Согласно теории Морриса [80], при встрече волн с твёрдой стенкой колебания уровня воды происходят относительно горизонтальной плоскости, приподнятой на величину h_0 над уровнем тихой воды (рис. 4.53). В случае подвижной створки возвышение будет несколько меньшим. Учтём этот факт коэффициентом $0 < k < 1$:

$$h_0 = k \cdot \frac{\pi H^2}{\lambda} \operatorname{cth} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right).$$

Значения коэффициента k в конкретных случаях необходимо уточнять на основе дальнейших исследований, однако в первом приближении можно принять $k = 0,5$.

Гидростатическое и долговременное волновое давление определяется по формуле [83]:

$$p = \rho \left[gH \cdot \frac{\operatorname{ch}(k(z+d))}{\operatorname{ch}(kd)} \cdot \sin(\omega t) + gz \right].$$

На дне ($z=d$), наибольшие давления равны

$$p = \rho g \left[\pm \frac{H}{\operatorname{ch}(kd)} + d \right].$$

Расчётная сила на единицу ширины волнового фронта:

$$F = \frac{1}{2} \rho g (d + h_0 + H) \left[\frac{H}{\operatorname{ch}(kd)} + d \right].$$

Расчётный момент в основании створки:

$$M = \frac{1}{6} \rho g (d + h_0 + H)^2 \left[\frac{H}{\operatorname{ch}(kd)} + d \right].$$

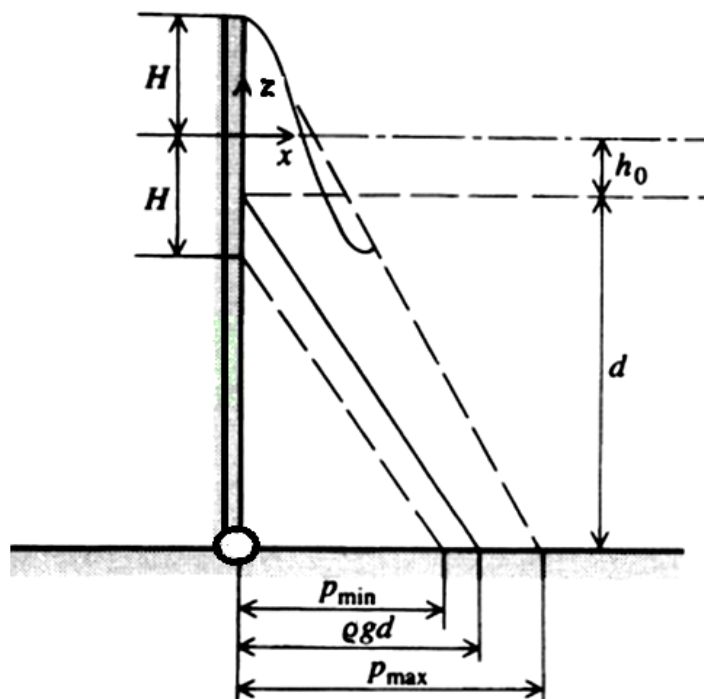


Рис. 4.53. К определению расчётных давлений

Расчётное кратковременное (экстремальное) давление на конструкции створки от ударов обрушивающихся волн можно определить по

методике Р. Р. Миникина [78; 83]. Учитывая, что длина обрушивающихся волн $\lambda \approx 10H$, давление на уровне тихой воды (рис. 4.54):

$$p_m = p_b + \frac{1}{2} \rho g H = 0,2 \cdot k_e \rho g^2 d + \frac{1}{2} \rho g H .$$

Здесь дополнительно введён коэффициент k_e , изменяющийся приблизительно в диапазоне $0,5 < k_e < 1$ и учитывающий, что створка является подвижной стенкой. Он зависит от соотношения динамических параметров волн и восстанавливающего момента. Значения коэффициента k_e в конкретных случаях необходимо уточнять на основе дальнейших исследований, однако в первом приближении можно принять $k_e = 0,8$.

Ударная сила получается интегрированием давлений по высоте створки.

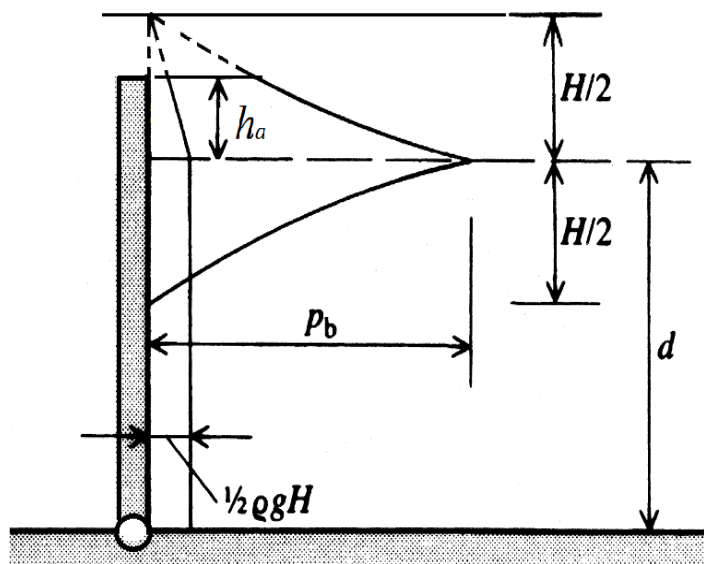


Рис. 4.54. К определению давлений от ударов обрушивающихся волн

4.5.3. Другие условия эксплуатации и расчёта конструкций

Ледовые условия. При образовании устойчивого ледяного покрова работа преобразователя невозможна. В этом случае в зимний период преобразователь демонтируется и хранится на суше. Если нет угрозы повреждения преобразователя крупными подвижными ледяными образованиями, то он может в зимнее время находиться на штатном месте. При этом его створки должны быть зафиксированы в наклонном

положении (прижаты как можно ближе к дну). Для этой цели должны быть предусмотрены устройства крепления и фиксации створок

Расчёт конструкций. Для определения толщин обшивки и сечений элементов набора створок могут быть применены соответствующие формулы и требования Правил Морского Регистра судоходства или СНиП [33–35].

Расчёт массы фундаментной плиты или элементов свайного основания может быть выполнен в соответствии со СНиП в части, касающейся гравитационных или свайных внешних ограждающих сооружений. Для разработки специальной методики требуются дополнительные исследования.

Подвижные соединения. Соединение створки с применением шарниров является ненадёжным. Причинами этого являются коррозия и засорение зазоров грунтом. В результате трение в шарнирах растёт, происходит истирание или концентрация напряжений в соединении вследствие засорения, что может привести к быстрому разрушению узлов шарнирного соединения.

Для обеспечения подвижного соединения створки с основанием более приемлемым представляется применение гибких полимерных материалов. При этом должна быть предусмотрена возможность быстрой замены истёршихся или порванных участков соединения. Расчёт гибких соединений следует выполнять на усилие растяжения от воздействия экстремального ударного давления.

4.5.4. Модель управления колебаниями волнового преобразователя

Морские волны имеют большой разброс волновых периодов и еще больший разброс высот волн. Спектр прибрежных волн более узкий, чем в открытом море. Тем не менее, при отсутствии активного управления колебательным процессом створки волнового преобразователя большая часть энергетического потенциала волн остается неиспользованной.

В связи с этим повышение эффективности рассматриваемой системы возможно путем управления колебаниями. Вариант схемы такого управления представлен на рис. 4.55. Регулируемыми параметрами системы являются коэффициент сопротивления устройства отбора мощности B_{yy} и восстанавливающий момент реакции растяжения эластичных

связей M_e . Сопротивление РТО может регулироваться гидравлической системой клапанов и аккумуляторов давления. Пример такой системы можно найти в работе [60, с. 887]. Момент реакции ЭЭ изменяется путём перемещения их верхних креплений по высоте створки (изменением R_r).

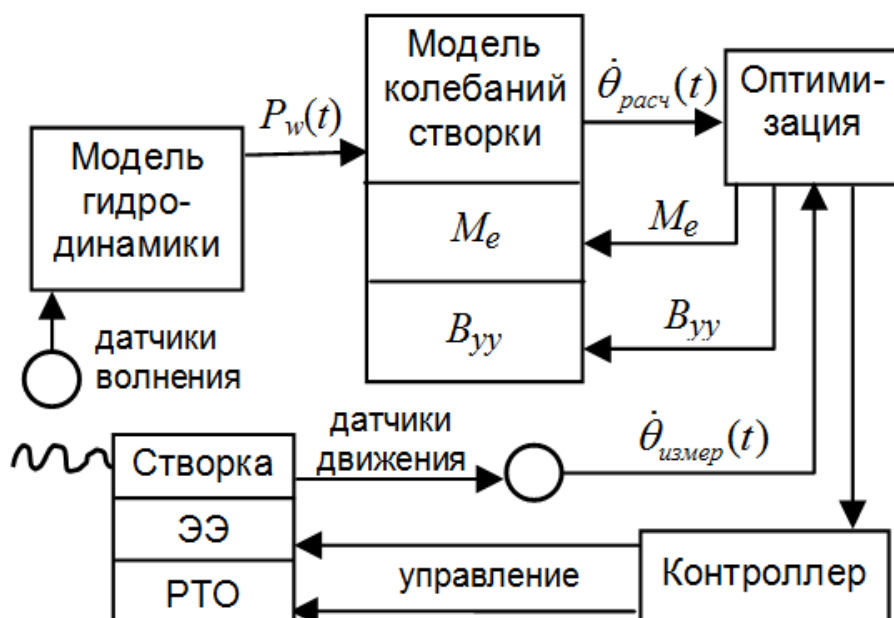


Рис. 4.55. Модель управления

Регулирование поведения данной системы предлагается с применением модельного прогнозирующего управления (МПУ). Эта стратегия управления позволяет учесть существенные нелинейности системы, а также обеспечить возможность оптимизации процесса. В алгоритме МПУ на основе базы знаний о динамических характеристиках системы все взаимодействия между переменными процесса определяются путем непрерывного решения в реальном масштабе времени.

Следует отметить важность ограничений системы на ускорения, связанных с напряженностью и надёжностью конструкций и механизмов.

Известен эффективный способ управления с помощью фиксирующих регуляторов (latching control) [54, с. 245; 56, с. 381]. Его суть в том, что вводятся фиксаторы, способные заблокировать движение рабочего органа в момент, когда его скорость равна нулю. В дальнейшем волновая нагрузка продолжает развиваться. В некоторый момент нарастания нагрузки фиксаторы отпускаются. Такое управление нацелено

на формирование колебаний в режиме параметрического резонанса. В работах G. Babarit и др. [54, с. 245] разработаны алгоритмы такого управления на регулярном и нерегулярном волнении для точечного преобразователя (буя).

В предлагаемой конструкции преобразователя фиксирующие регуляторы заменяются на эластичные связи, жесткость которых можно менять более плавно. Как видно из результатов расчётов, представленных в разделе 4.2, при наибольших отклонениях створки (соответствующих и наибольшим ускорениям при колебаниях) жёсткость упругих связей значительно уменьшается, что позволит исключить резкие изменения напряжений в элементах крепления.

4.6. Предложения модификации преобразователя

Недостатком конструкции преобразователя с постоянной высотой створки R (рис. 4.5) является пониженная эффективность в условиях существенных приливно-отливных колебаний уровня воды. В прилив створка может находиться на заглублении, что снижает волновое воздействие, а при отливе створка либо существенно выступает выше уровня воды, уменьшая площадь волнового давления, либо имеет отклонённое положение равновесия, что приводит к уменьшению динамического давления волн на её поверхность.

Даже при отсутствии существенных приливно-отливных колебаний уровня воды фиксированная в вертикальном направлении створка имеет недостаточную эффективность, так как при прохождении подошвы волны она выступает из воды, а при прохождении вершины волны заглубляется. В обоих случаях гидродинамическое давление на створку меньше, чем на волновой поверхности. Кроме того, на выступающую над водой часть створки в некоторые фазы колебаний могут воздействовать удары обрушивающихся гребней штормовых волн, опасных с точки зрения прочности. В результате снижается надёжность конструкции.

В связи с этим предложены конструкции с изменяемым положением створки по высоте за счёт её плавучести и скользящего соединения с направляющей рамой (рис. 4.56 – 4.57). Волновая энергетическая установка содержит раму, шарнирно закреплённую на фундаменте, с вертикально ориентированными полозьями, вдоль которых свободно перемещается створка с положительной плавучестью. Благодаря такой

конструкции створка всегда занимает наиболее эффективное положение, при котором её верхняя кромка находится на взволнованной поверхности воды.

Эффективность волновой энергетической установки может быть повышена с применением дополнительного устройства отбора энергии погружения – всплытия створки, закреплённого между нижним краем створки и фундаментом (рис. 4.58), а также при использовании дополнительных эластичных связей между качающейся рамой и фундаментом (рис. 4.59).

Подбор жёсткости эластичных связей позволяет регулировать восстанавливающий момент при раскачивании рамы со створкой в более широком диапазоне частоты волнения.

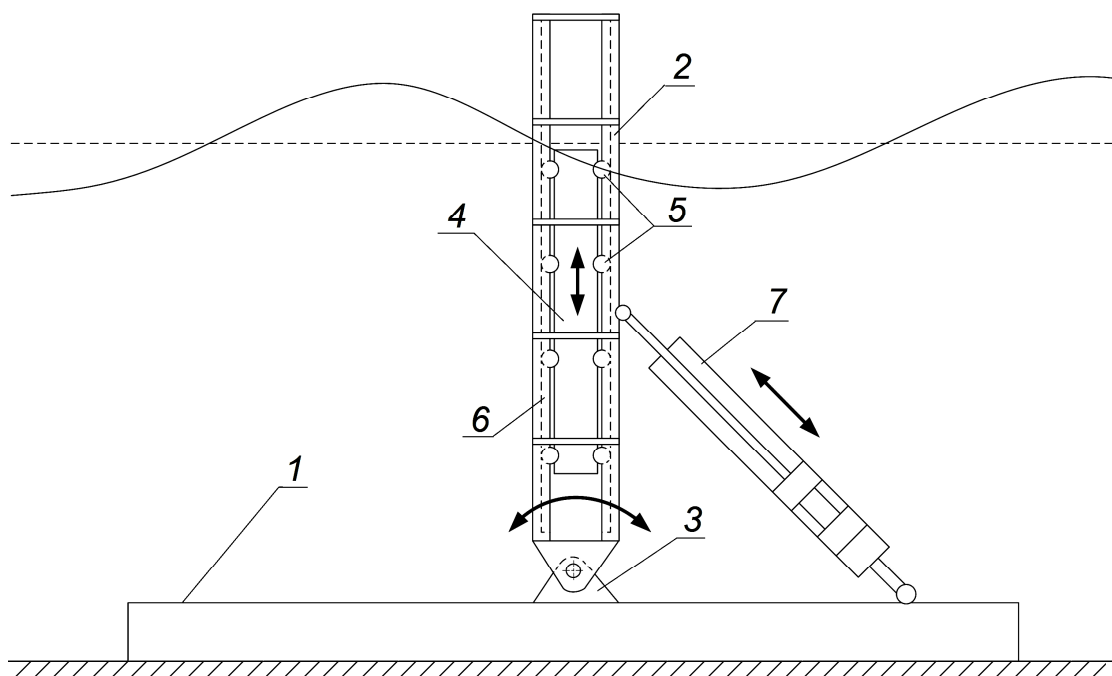


Рис. 4.56. Боковой вид преобразователя энергии волн:

- 1 – фундамент; 2 – рама; 3 – шарниры; 4 – створка; 5 – ролики;
6 – направляющие полозья; 7 – устройство отбора мощности

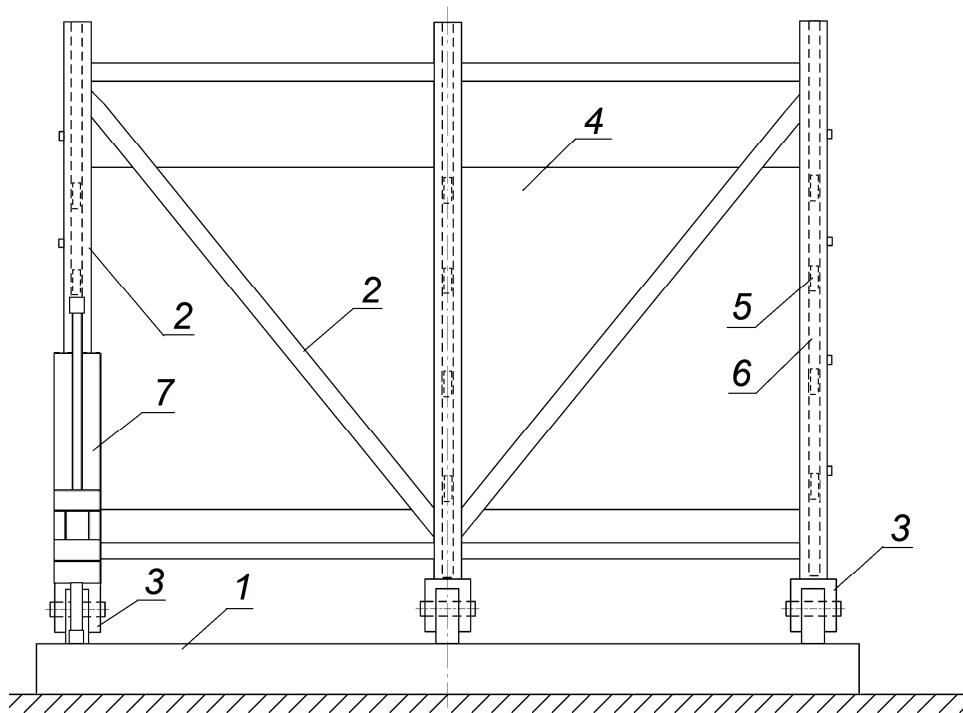


Рис. 4.57. Фронтальный вид преобразователя энергии волн

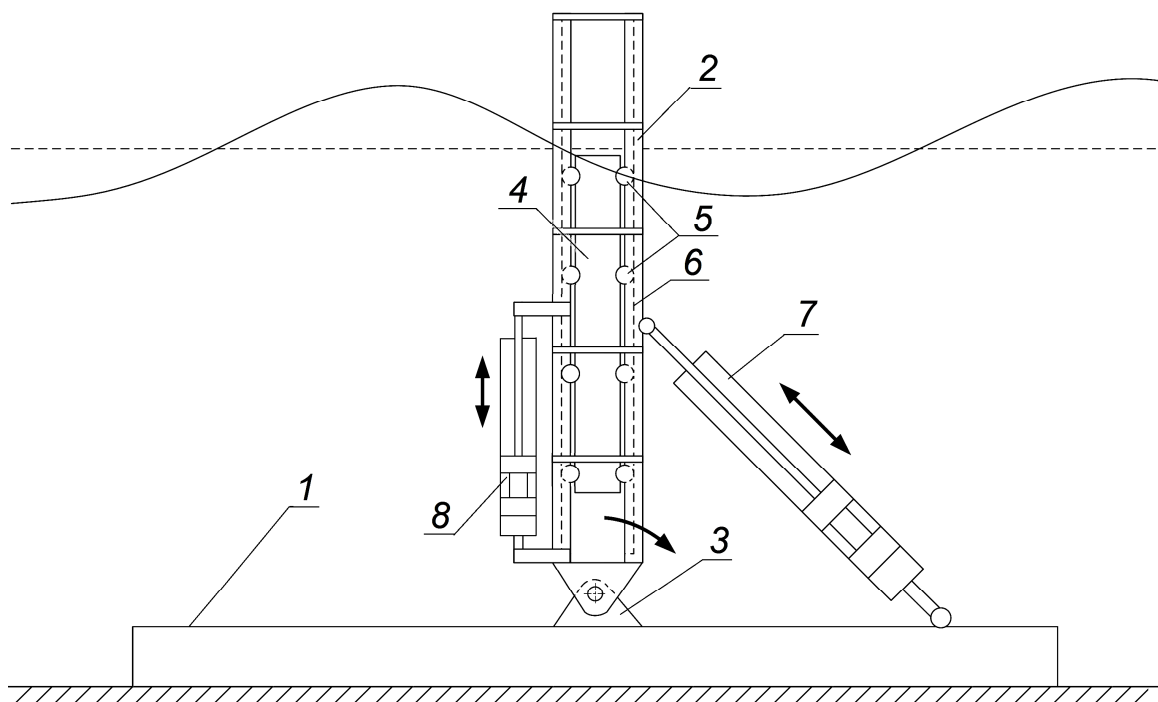


Рис. 4.58. Преобразователь с дополнительным устройством отбора мощности (8)

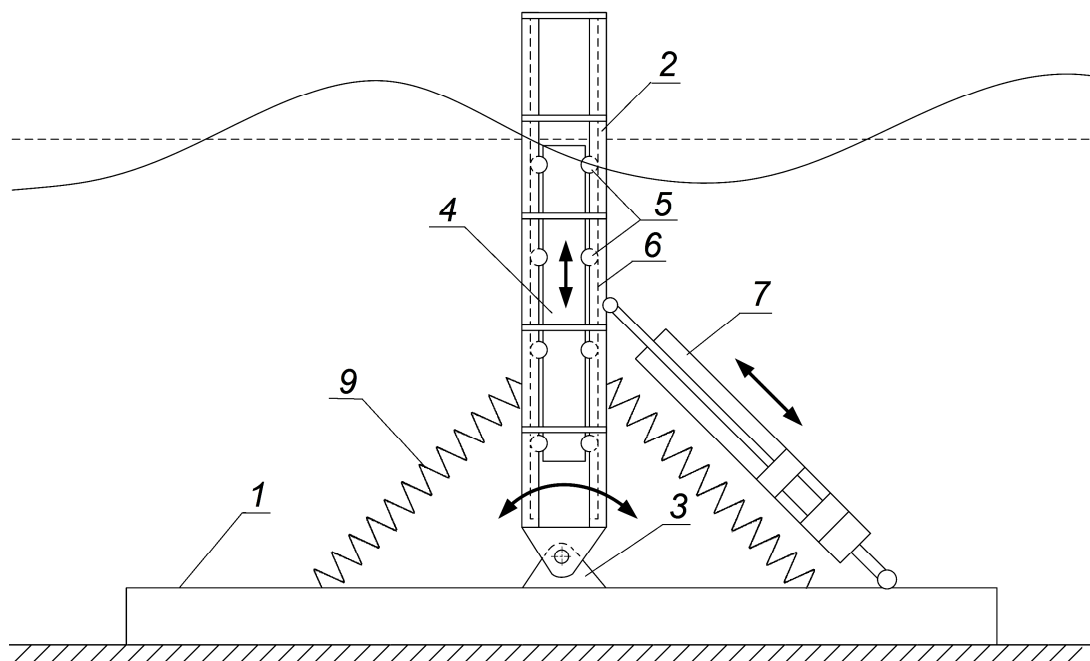


Рис. 4.59. Преобразователь с дополнительными эластичными связями (9)

Таким образом, створка автоматически, за счёт сил плавучести, перемещается в область наибольшей гидродинамической волновой нагрузки, не выходя при этом из воды в область возможных опасных ударных нагрузок от разрушающихся гребней волн. Имеется возможность дополнительного отбора энергии погружения – всплытия створки. Кроме того, при наличии прочной и жёсткой рамы створка имеет более лёгкую конструкцию, может быть быстро заменяемой.

Модели преобразователя с плавающими горизонтальными створками.

Известны преобразователи энергии волн в виде шарнирно сочлененных плотов (плот Коккерелла [30, с. 66], Pelamis [67, с. 199]). Они имеют относительно невысокий к.п.д. и для его повышения требуется не менее 3–4-х сочлененных плавучих секций. Кроме этого имеется проблема закрепления устройств на якорях.

Предлагается совместить преимущества системы с вертикальной створкой и подобных устройств. На рисунке 4.60 представлены эскизы таких комбинированных устройств.

При сопоставлении колебаний горизонтально и вертикально ориентированных створок преобразователей было отмечено, что раскачка

вертикальной пластины более интенсивно происходит на длинных волнах, в то время как колебания горизонтальной пластины больше на коротких крутых волнах. Таким образом, предлагаемые комбинированные преобразователи могут иметь высокую эффективность в широком диапазоне волнового спектра.

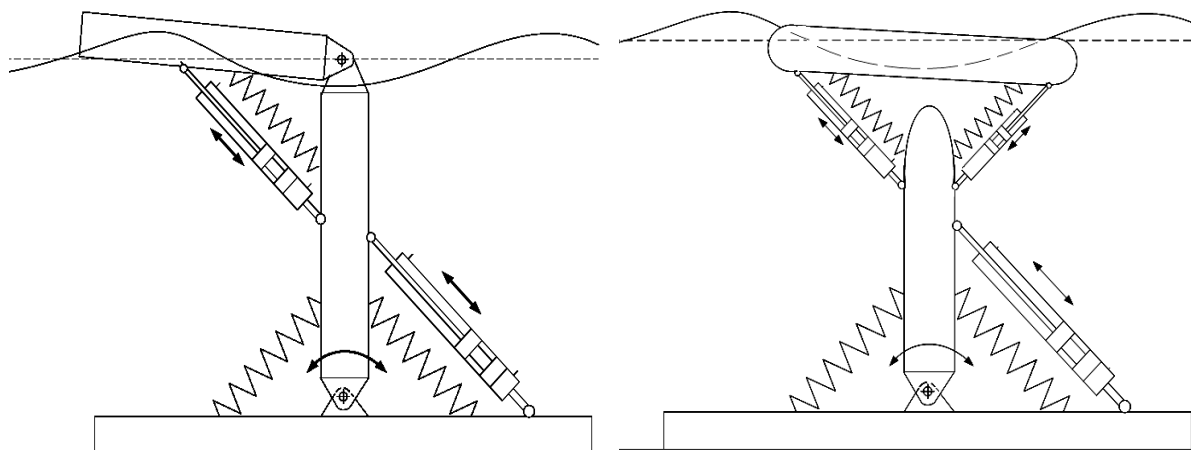


Рис. 4.60. Модели комбинированных преобразователей

4.7. Техничко-экономическое обоснование

В последние годы в мире интенсивно ведутся научные исследования и разрабатываются проекты в области экологически чистой волновой энергетики. Имеются опытные и эксплуатирующиеся волновые электростанции. Но рынок малых волновых электростанций пока отсутствует, поэтому имеется реальная возможность эффективного коммерческого использования результатов проекта на новом рынке.

Основные параметры предлагаемых малых волновых электростанций:

- высота створки: 1,5 – 2,5 м;
- ширина створки: 3 – 4 м;
- к.п.д. преобразователя: 25 – 40 %;
- средняя высота волн: 0,5 – 1 м;
- выходная мощность: 1 – 10 кВт.

В некоторых случаях потребуются необходимость комбинирования волновых преобразователей с установками другого типа, в частности, с ветряными электростанциями. Наличие рынка ветряных электро-

станций и комплектующих частей для них упрощает реализацию проекта, позволяя использовать многие готовые компоненты (генераторы, аккумуляторы, инвертор, блок автоматического управления и др.). Возможно подключение генератора водорода, что позволит аккумулировать большое количество энергии для использования, в частности, в зимнее время, в тех районах, где прибрежная акватория покрывается льдом.

Потребителями малых волновых электростанций могут являться: отдельные жители и администрации прибрежных поселений, дач, баз отдыха, вахтовых посёлков, промысловые предприятия, воинские части, посты различных береговых служб. Возможны варианты преобразователей для использования на судах и плавучих сооружениях, где они могут также использоваться для преобразования энергии волн непосредственно в тягу, то есть работать как волновые движители.

Конкурентные преимущества волновых электростанций данного типа заключаются в следующем.

Традиционными малыми электростанциями являются дизель-генераторы. Проблемы их использования: постоянные расходы на дорожающее топливо; проблемы доставки топлива в удалённые районы; довольно частые поломки. Преимущества волновых систем включают: бесплатный и возобновляемый источник энергии; экологичность; отсутствие шума; ожидаемая высокая надёжность в эксплуатации в связи с отсутствием в основной конструкции высоконагруженных быстро движущихся частей.

Ветряные электростанции остаются относительно дорогими. При этом наиболее дорогие элементы преобразователя (лопасти, мачты большой длины) склонны к усталостным повреждениям и не всегда выдерживают экстремальные нагрузки от тайфунов. По сравнению с ветрогенераторами волновые преобразователи будут иметь меньшую стоимость и большую надёжность. При этом они могут эффективно сочетаться в комплексе, обеспечивая бесперебойное снабжение электроэнергией.

Аналогичный по идее волновой преобразователь системы «Oyster» (компания «Aquamarine Power», Великобритания) не является конкурентом, так как он имеет мощность более 300 кВт и ориентирован на крупные волны высотой порядка двух и более метров. В большинстве прибрежных районов, в частности, на побережье Дальнего Востока России, такие волны встречаются не везде и не постоянно.

Разрабатывая проект ВлЭС, следует учитывать стоимость будущей энергоустановки и возможности промышленного производства. В связи с этим в табл. 4.2 представлена оценка стоимости четырёх вариантов системы: с выходной мощностью 1 кВт и 10 кВт; с изготовлением створки из стали и композитной конструкции.

Таблица 4.2

Стоимость ВлЭС в разных исполнениях

Затраты (включая материалы и работу)	Стоимость, тыс. р.	
	для волн 0,5 м (N=1 кВт)	для волн 1 м (N=10 кВт)
1	2	3
Бетонные работы	8	25
Упругие элементы, поплавки, и пр.	5	10
Сборка преобразователя	10	20
Установки со стальной створкой:		
Изготовление стальной створки	40	80
Итого себестоимость преобразователя	63	135
Себестоимость полной комплектации	113	335
Цена полной комплектации	130	360
Установки с композитной створкой:		
Изготовление композитной створки	10	20
Итого себестоимость преобразователя	33	75
Себестоимость полной комплектации	83	275
Цена полной комплектации	100	300
Цена ветрогенератора	20	190
Цена полной комплектации ветрогенератора	70	410

Из таблицы видно, что цена ВлЭС с выходной мощностью 1 кВт несколько больше цены соответствующего ветрогенератора, однако при

мощности 10 кВт волновая электростанция значительно дешевле ветряной.

Срок окупаемости ВлЭС, исходя из среднемировой цены на энергию (0,1 долл./кВт·ч), составляет: при мощности 1 кВт – 5 лет; при мощности 10 кВт – менее двух лет. Исходя из реальной цены на энергию на Курилах и Камчатке (около 0,5 долл./кВт·ч), этот срок составит соответственно 1 год и 4 месяца.

Экономическая эффективность волнового преобразователя для потребителя выражается в отсутствии затрат на приобретение топлива и уменьшении затрат на обслуживание и ремонт при сопоставимой (или меньшей) стоимости волновых устройств по сравнению с ветряными.

Социальная значимость 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.

5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С РЕЗЕРВУАРАМИ

5.1. Основные параметры преобразователя

Принцип действия преобразователя типа OWEC представлен на рис. 5.1. Основу его представляет резервуар, например в виде железобетонного пустотелого массива-гиганта. Конструкции длиной до нескольких десятков метров могут размещаться вдоль линии берега, образуя волнолом. Фронтальная стенка может быть вертикальной, откосной или иметь переменный угол наклона в зависимости от параметров расчётных волн, глубины, рельефа и характера дна. Волны, переливаясь через эту стенку, заполняют резервуар. В задней стенке имеются отверстия, через которые, при образовании напора Δh , образуется поток, приводящий в действие низконапорную турбину с генератором электрического тока.

Поступление воды в резервуар (расход) при переливе через верхнюю кромку можно оценить с помощью классического уравнения для плотины

$$Q_1 = mL \sqrt{2g} h_1^{1,5},$$

где m – коэффициент расхода [50], L – длина фронта, $h_1 = r - R_c$ – напор, равный возвышению гребня над верхней кромкой (рис. 5.1). Коэффициент расхода в первом приближении можно принять равным $2/3$ [74].

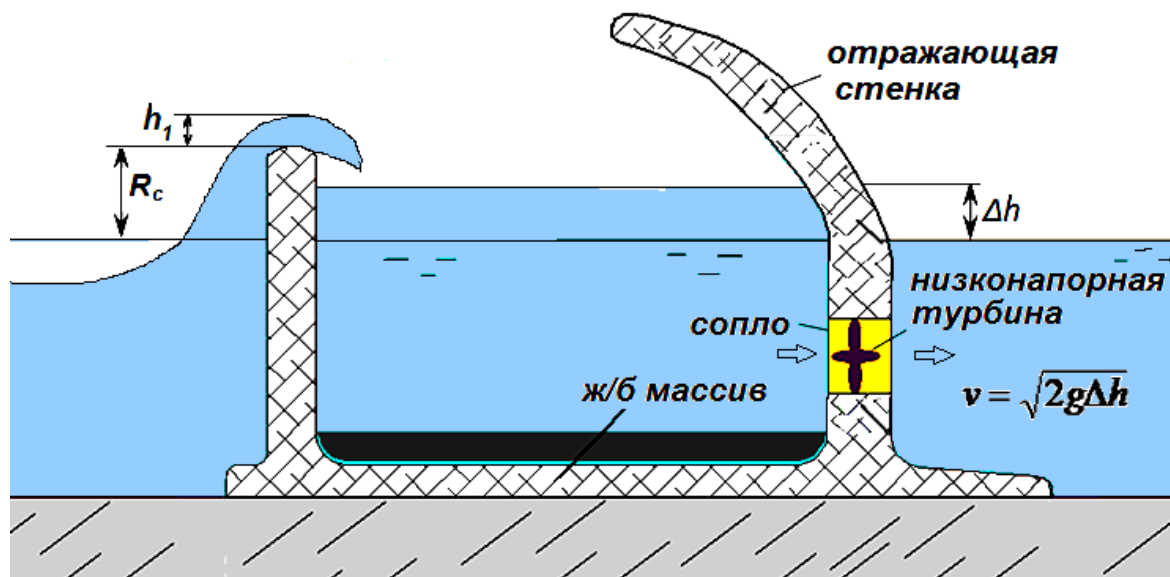


Рис. 5.1. Схема преобразователя типа OWEC

В работах [63, 92] можно найти подробный обзор и анализ зависимостей, связывающих перелив волн с параметрами волнения, а также формой и размерами стенки. Среди них наиболее универсальной представляется формула

$$Q_1 = L \sqrt{gh^3} \exp \left(- \left(A + B \frac{R_c}{h} \right) \right),$$

$$A = 3.4 - 0.734 \operatorname{ctg} \alpha + 0.239 (\operatorname{ctg} \alpha)^2 - 0.0162 (\operatorname{ctg} \alpha)^3,$$

$$B = 2.3 - 0.5 \operatorname{ctg} \alpha + 0.15 (\operatorname{ctg} \alpha)^2 - 0.011 (\operatorname{ctg} \alpha)^3.$$

Эта формула применяется при крутизне откоса стенки от $\operatorname{ctg} \alpha = 0$ (вертикальная стенка) до $\operatorname{ctg} \alpha = 7$ (пологий склон, $\alpha = 8^\circ$) и отношении высоты надводного борта к средней высоте волн в пределах $0 < R_c/h < 5,7$.

В работе [76, с. 36] рассмотрено влияние формы фронтальной стенки на перелив волн в резервуар. Были исследованы три варианта откосов: прямой, выпуклый и вогнутый. Высота стенки находилась в диапазоне от трех до пяти метров. Период волн – 6 с. На рис. 5.2 представлены фрагменты результатов компьютерного моделирования с применением метода конечных объемов.

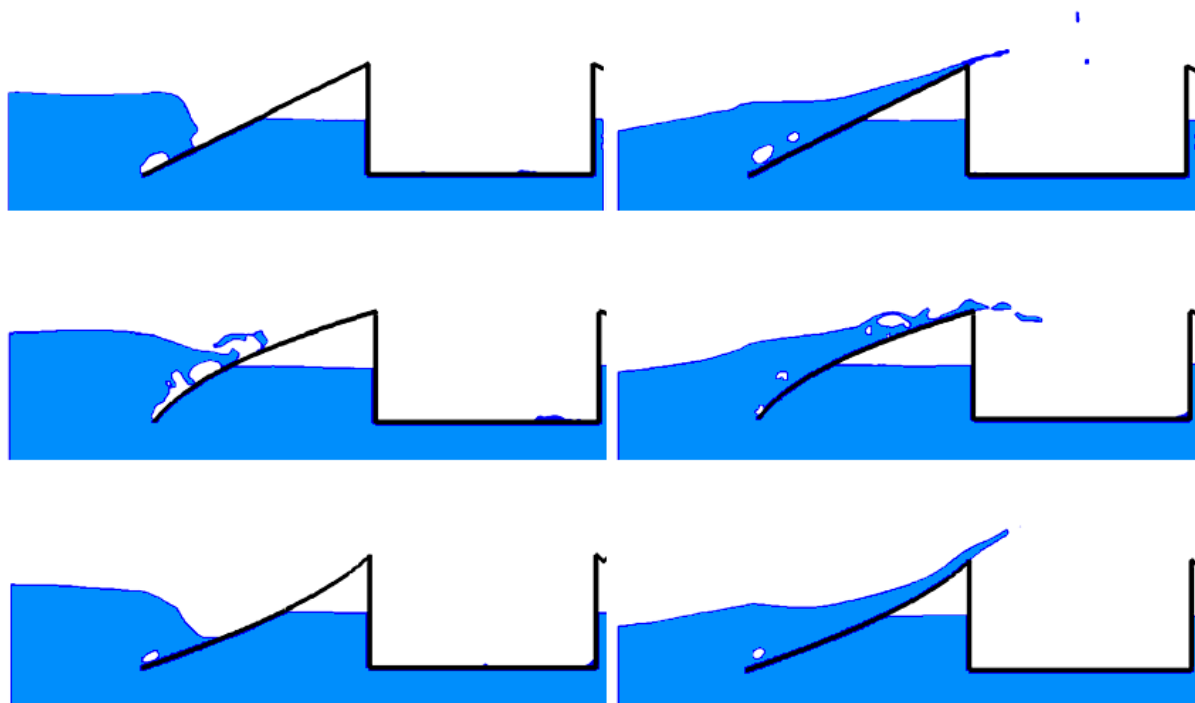


Рис. 5.2. Моделирование наката волн на стенки разной формы [76, с.40]

На рис. 5.3 сопоставляется расход при переливе волн через стенки с различным средним наклоном [76, с. 40]. На основе данных результатов можно сделать вывод о том, что наибольшая эффективность системы OWEC обеспечивается при выпуклой форме фронтальной стенки. Здесь нужно, конечно, учитывать, что для обобщения данного вывода на различные параметры волн, дна и размеров конструкций необходимы дополнительные исследования.

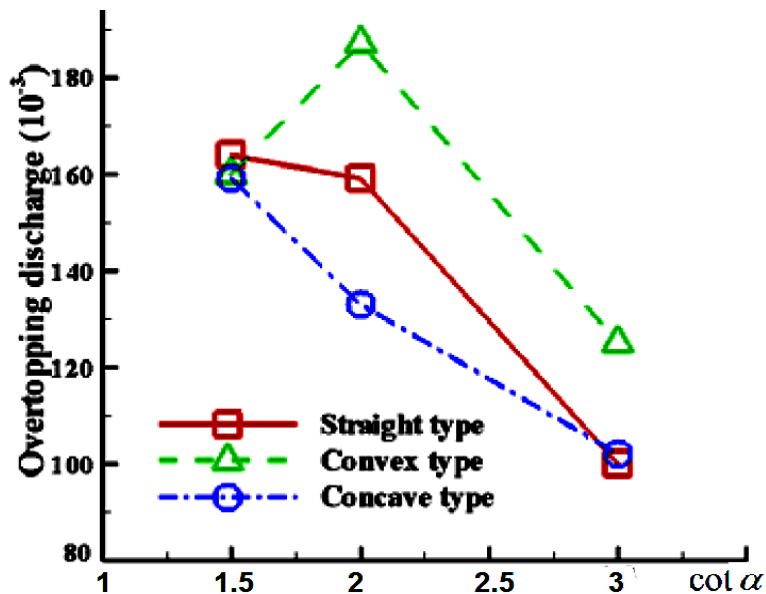


Рис. 5.3. Относительный расход при переливе волн в бассейн в зависимости от среднего наклона откоса для стенок разной формы [76, с.41]

Расход воды через отверстие (сопло) турбины

$$Q_2 = \mu S_0 \sqrt{2 g \Delta h} ,$$

где μ — коэффициент расхода [50], S_0 — площадь отверстия. Коэффициент расхода при числе Рейнольдса $Re_h > 10^5$ можно принять равным 0,6.

Изменение уровня воды в резервуаре можно оценить по формуле

$$\frac{dz}{dt} = \frac{S}{Q_1 - Q_2} ,$$

где S — площадь свободной поверхности воды в резервуаре.

При проектировании волнового преобразователя для достижения его наибольшей эффективности необходимо обеспечить выполнение целого комплекса частных критериев:

- максимальный расход воды через гидротурбину;
- исключение переплёскивания отражённых волн обратно в море через переднюю стенку;
- минимальное отражение волн от передней стенки и минимальная потеря энергии волны на трение при подходе к передней стенке;
- эффективная работа в широком диапазоне длины и высоты волн.

Для определения способов достижения поставленных задач необходимы исследования гидродинамики ВлЭС, на основе как численных, так и модельных экспериментов.

5.2. Численное моделирование гидродинамики преобразователей

Для изучения физической картины процессов гидродинамики ВлЭС рассмотрим результаты расчётов, полученные с применением метода конечных объемов.

При численном моделировании использована двумерная модель. Жидкость невязкая, несжимаемая. На рис. 5.4 представлен пример расчётной сетки (400x25 ячеек).

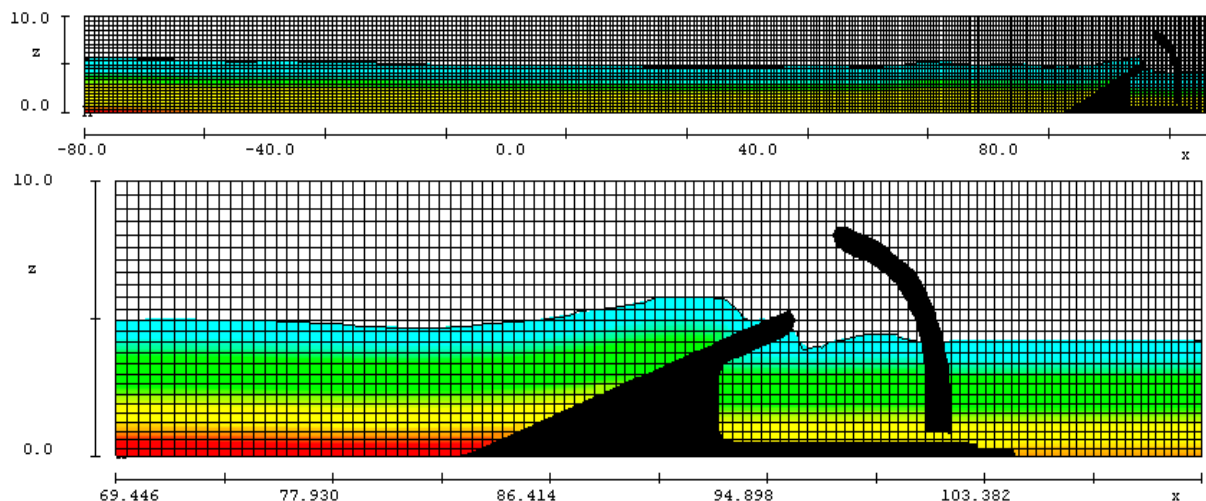


Рис. 5.4. Пример расчётной сетки компьютерной модели

Движение волн моделируется условным волнопродуктором путём задания переменных скоростей движения жидкости на левой границе сетки:

$$v_x = V_x \cdot \sin(\omega t),$$

где V_x – амплитуда скорости движения волнопродуктора, $\omega = 1,744$ рад/с (при периоде волн $\tau = 3,6$ с).

Такое граничное условие не соответствует распределению скоростей в сечении свободной волны, поэтому вблизи левой границы расчётной сетки волны имеют «неправильную» структуру. По мере дальнейшего движения формируется более реальный профиль, характерный для свободных волн. Высота первой волны при подходе к сооружению ВлЭС составляла 1,5 м. Следующие волны имели структуру, близкую к регулярной, а их средняя высота была 0,75 м.

В данной серии расчётов рассматривались модели сооружения с высотой фронтальной стенки 5,5 м и несколькими вариантами формы. На рис. 5.5 – 5.12 представлены некоторые результаты численных расчётов гидродинамики.

По результатам проведённых исследований был сделан ряд предварительных выводов.

1. Фронтальная стенка может быть откосной со стороны, обращённой к морю. Однако результаты расчётов показали, что при крутом откосе 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 скорость. В результате при малой волне лишь небольшая часть гребня волны переливается через край фронтальной стенки.

Эффективный рост гребней волн может быть только в узкой полосе волнового спектра, при пологом откосе и сужающемся канале (как например, в установке ТАРСНАН), однако при этом вследствие трения существенно теряется энергия волны. А самое главное, резко увеличивается ширина, а значит и стоимость сооружения.

2. Так как сооружение с пологой откосной стенкой, очевидно, будет слишком материалоемким, рекомендуется устанавливать сооружение в месте, где существует естественный пологий подъём дна в сторону берега (в месте образования прибойных волн).

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.

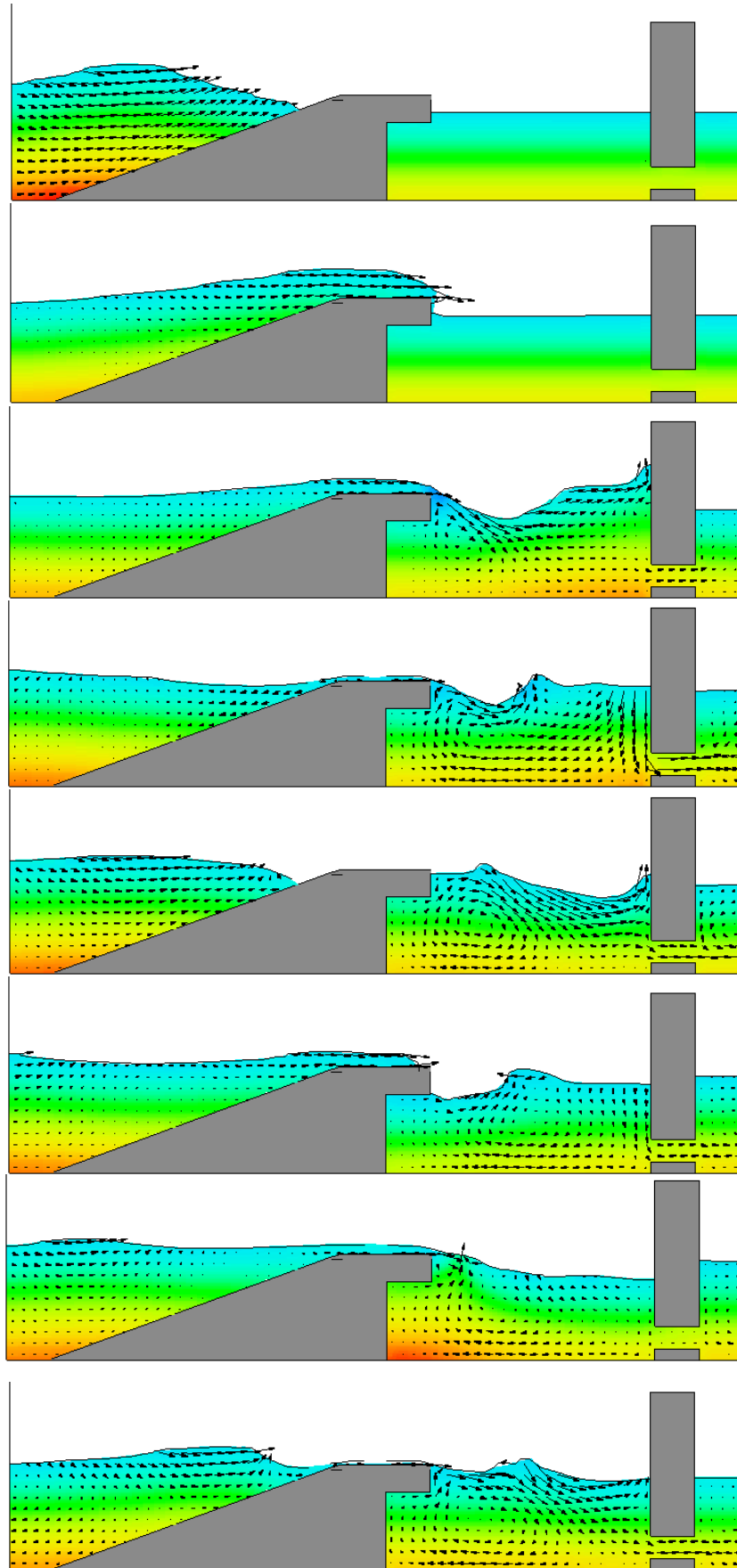


Рис. 5.5. Гидродинамика ВлЭС (вариант 1)

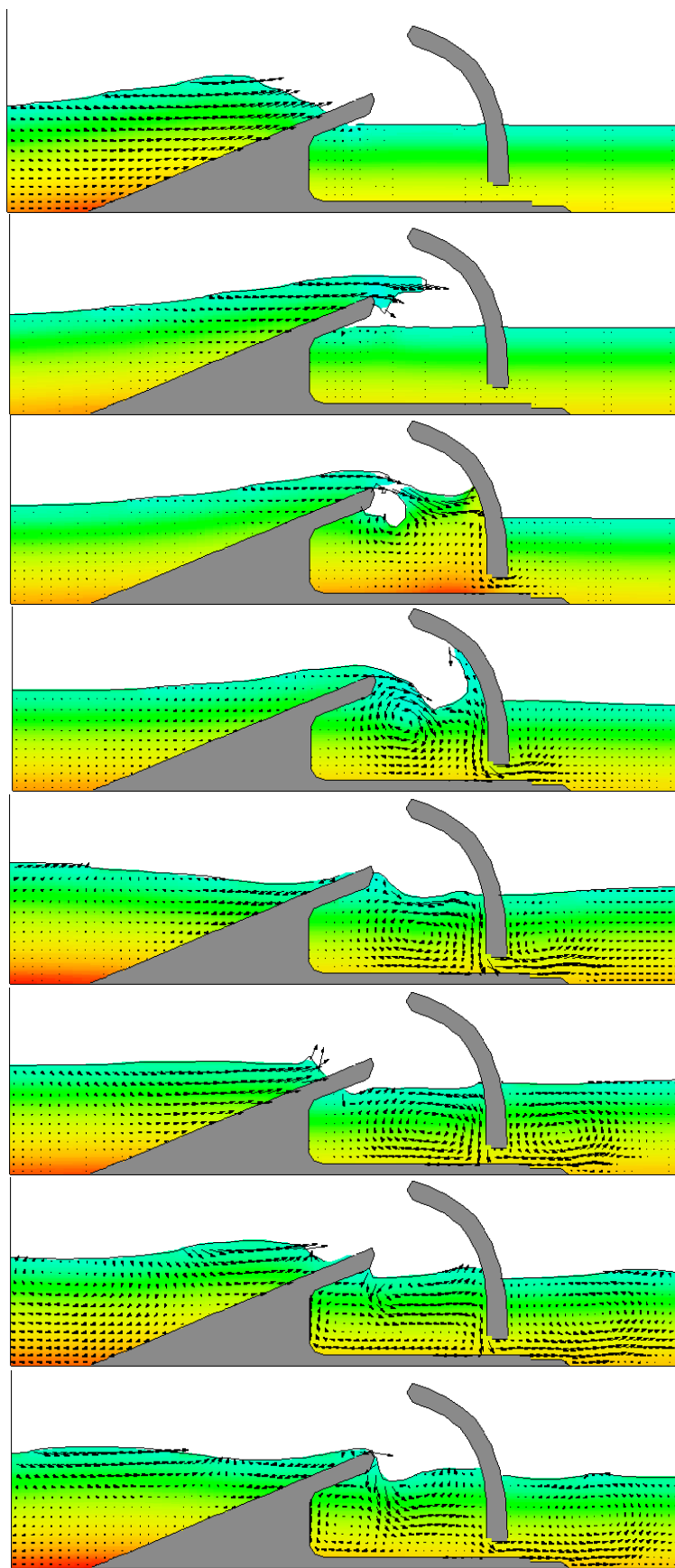


Рис. 5.6. Гидродинамика ВлЭС (вариант 2)

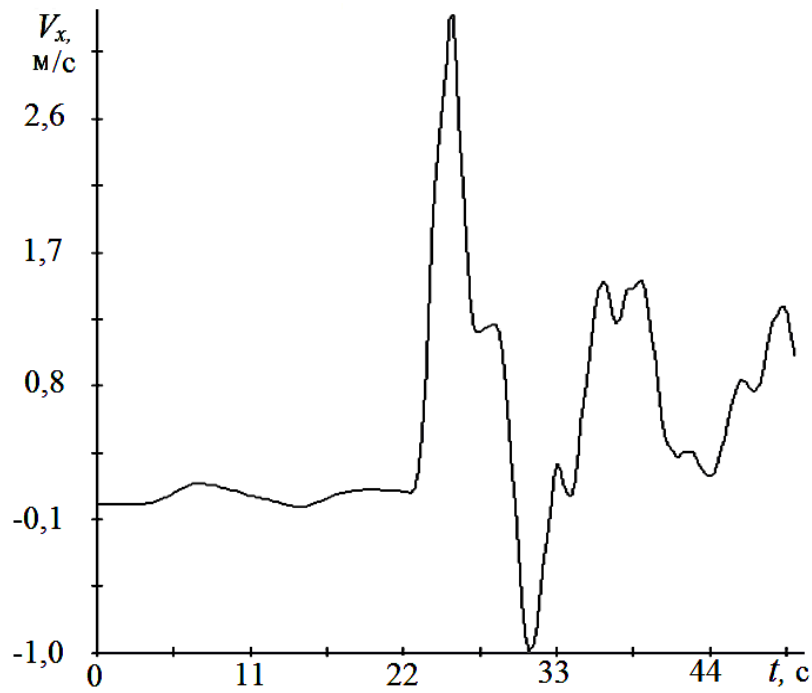


Рис. 5.7. Скорости течения в выходном канале (вариант 1)

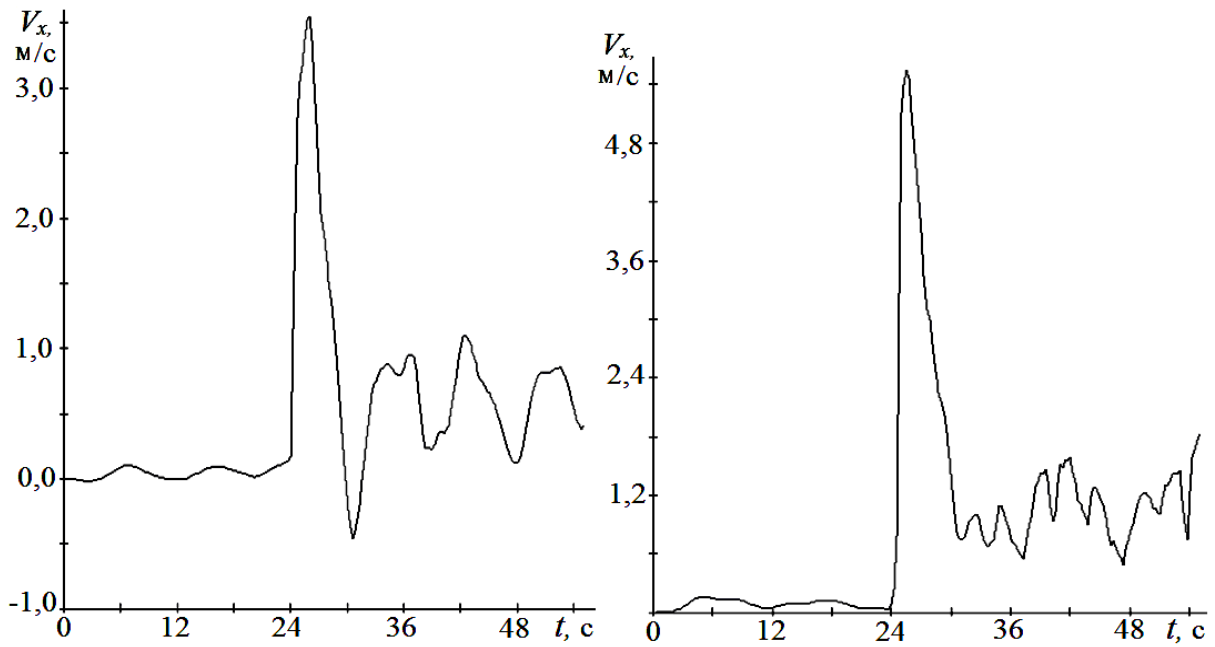


Рис. 5.8. Скорости течения в подводном канале (вариант 2, при возвышении канала над дном 0,7 м и 0,4 м соответственно)

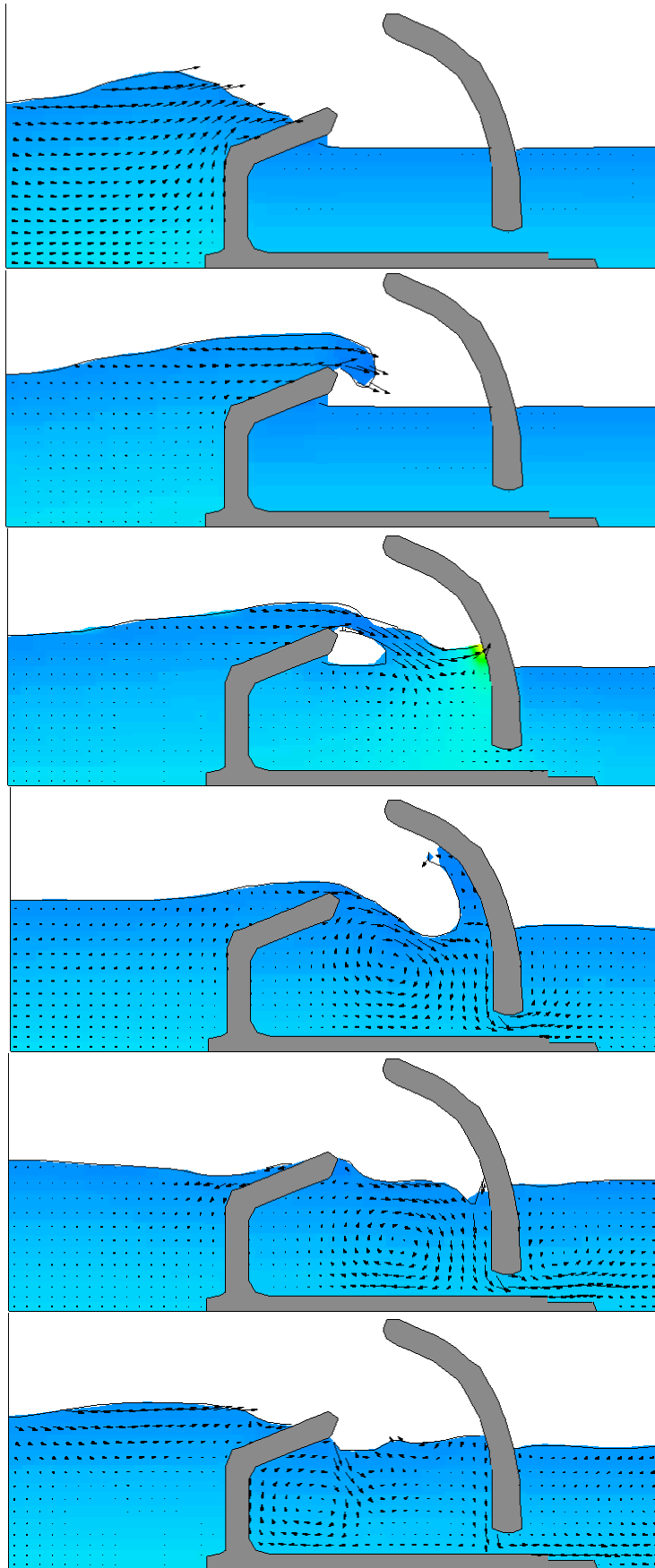


Рис. 5.9. Гидродинамика ВЛЭС (вариант 3)

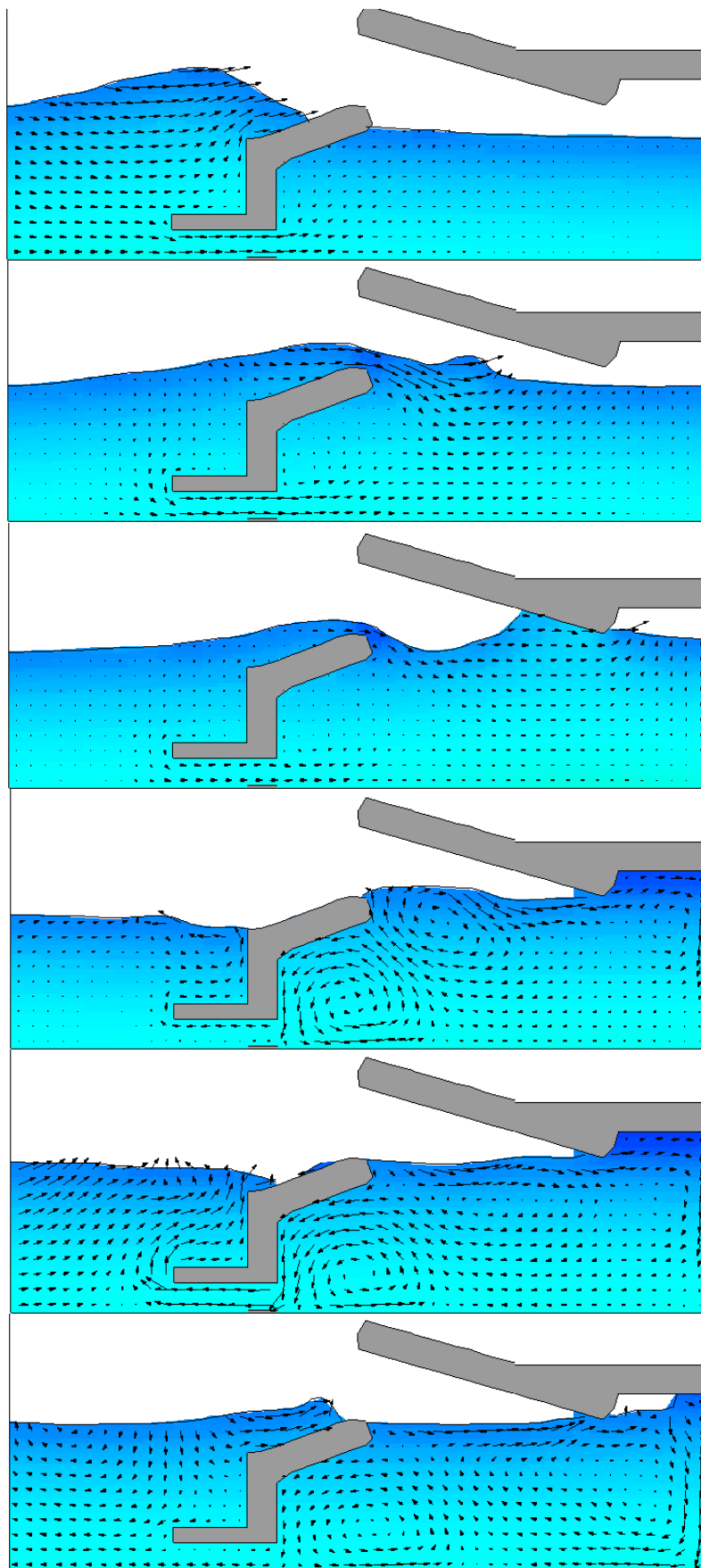


Рис. 5.10. Гидродинамика ВлЭС (вариант 4)

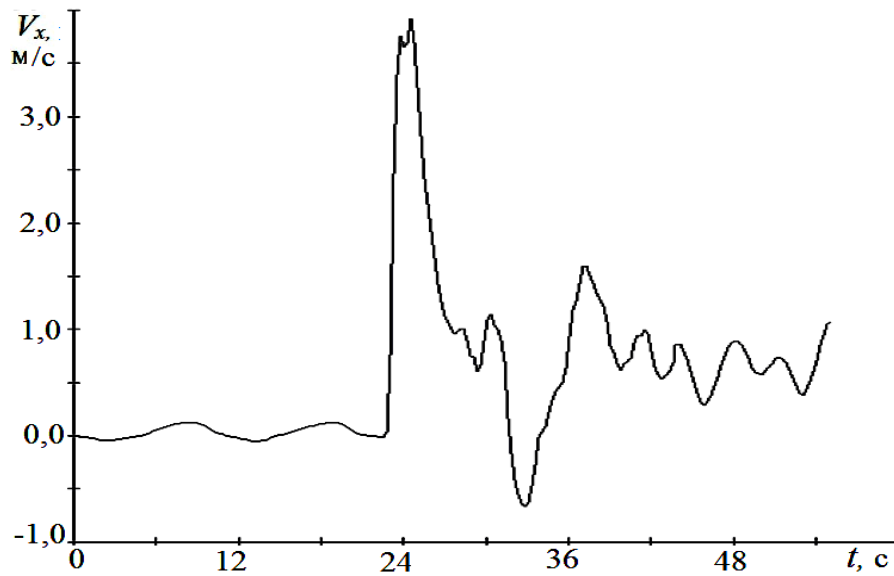


Рис. 5.11. Скорости течения в подводном канале (вариант 3)

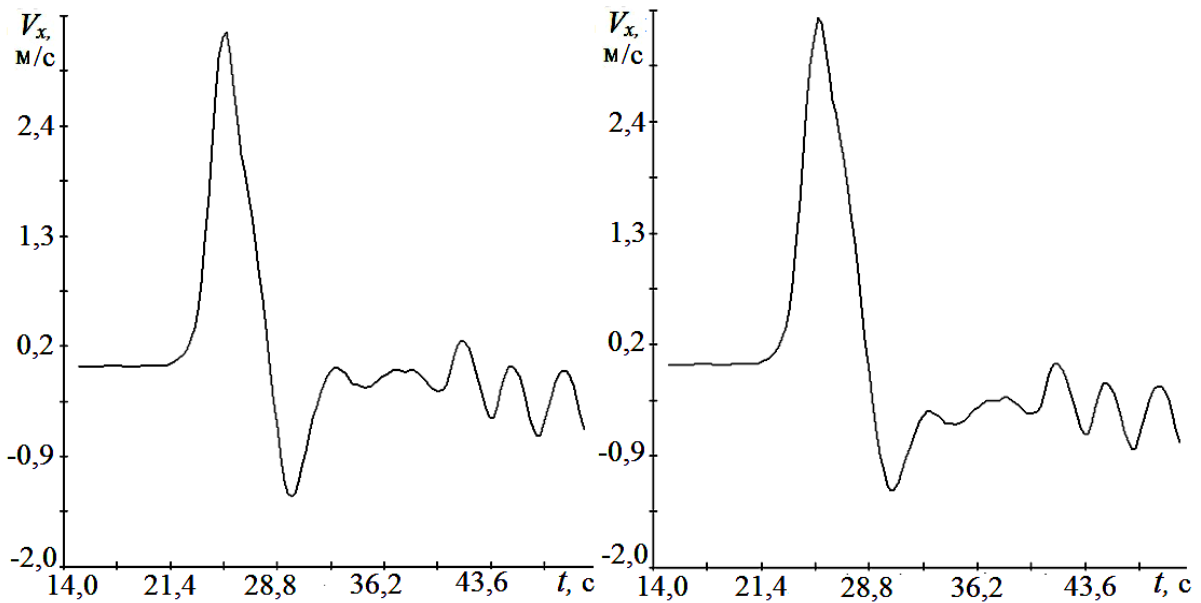


Рис. 5.12. Скорости течения в подводном канале (вариант 4)
(в двух точках по высоте канала)

Эти результаты можно обобщить следующим образом: угол откоса фронтальной стенки должен уменьшаться от дна к поверхности. Этот вывод принципиально согласуется с результатами исследования Liu Z., Hyun B. S. и Hong K. [76] (см. рис. 5.2, 5.3).

4. Скорость потока в подводном канале зависит от площади сечения канала. При большой площади канала недостаточно высокие волны не успевают заполнять бассейн доверху. В результате уменьшается напор и скорость потока. Если канал имеет небольшую площадь сечения, а волны большие, они выплескиваются обратно в море, и расход через канал также уменьшается.

В реальной конструкции подводный канал представляет собой не сплошную щель в задней стенке, а ряд круглых отверстий с расположенными в них генераторами. Их диаметр должен подбираться таким образом, чтобы при наибольшем уровне воды в бассейне она не выплескивалась, а полностью проходила через генераторы.

5. В результате волнения внутри бассейна скорость потока в подводном канале неравномерная. Для сглаживания пульсаций давлений необходимо предусмотреть дополнительные специальные устройства. Или устройства отбора мощности 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. В связи с этим отметим, что 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 использование их энергии в подводной части.

7. Форма задней стенки должна быть оптимизирована с целью исключения образования отражённых волн, переплёскивающихся обратно в море через переднюю стенку.

В результате анализа гидродинамики для нескольких вариантов конструкции волнового преобразователя был принят принципиальный вариант, представленный в поперечном разрезе на рис. 5.13.

Дальнейшей задачей является анализ влияния размеров элементов сооружения на его волновую гидродинамику с последующим определением зависимостей или процедур проектирования размеров с целью обеспечения наибольшей эффективности ВлЭС. Для этого необходимы дальнейшие исследования гидродинамики ВлЭС, на основе как численных, так и модельных экспериментов.

В связи с этим рассмотрим некоторые результаты расчётов конструкций, в которых изменялись размеры: угол наклона и ширина на-

клонной стенки; ширина резервуара; заглубление и площадь подводного канала (рис. 5.14). На рис. 5.15 – 5.22 представлены некоторые результаты таких расчётов⁴.

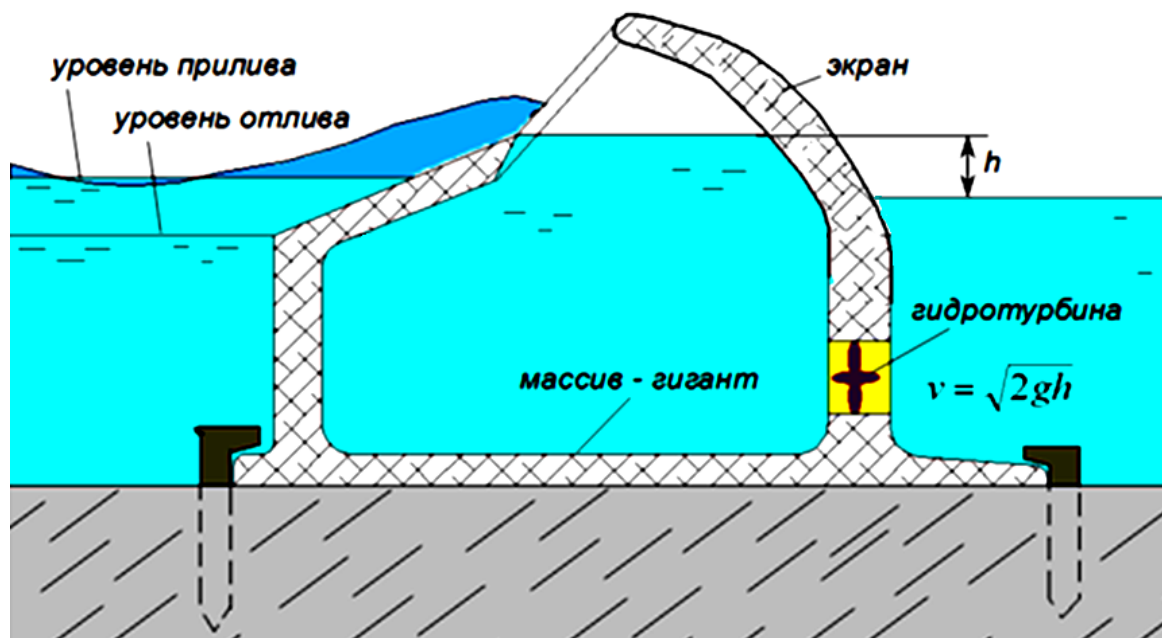


Рис. 5.13. Вариант ВлЭС типа OWEC

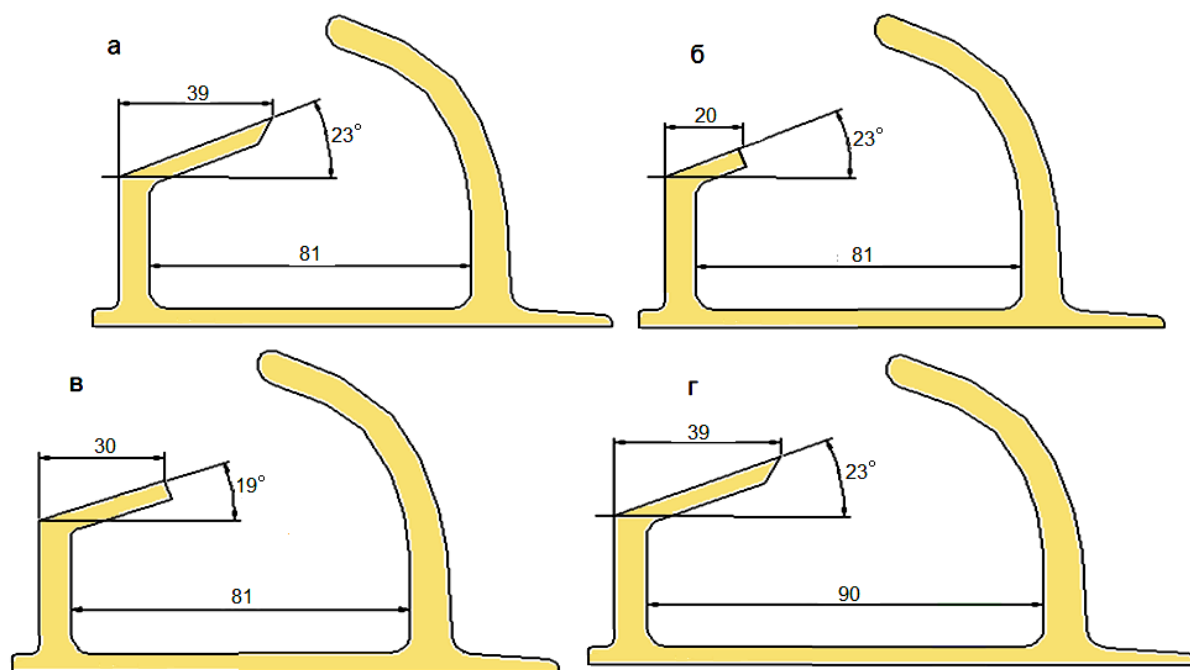


Рис. 5.14. Некоторые варианты моделей

⁴ Расчёты выполнены с участием О.В. Трубецкой.

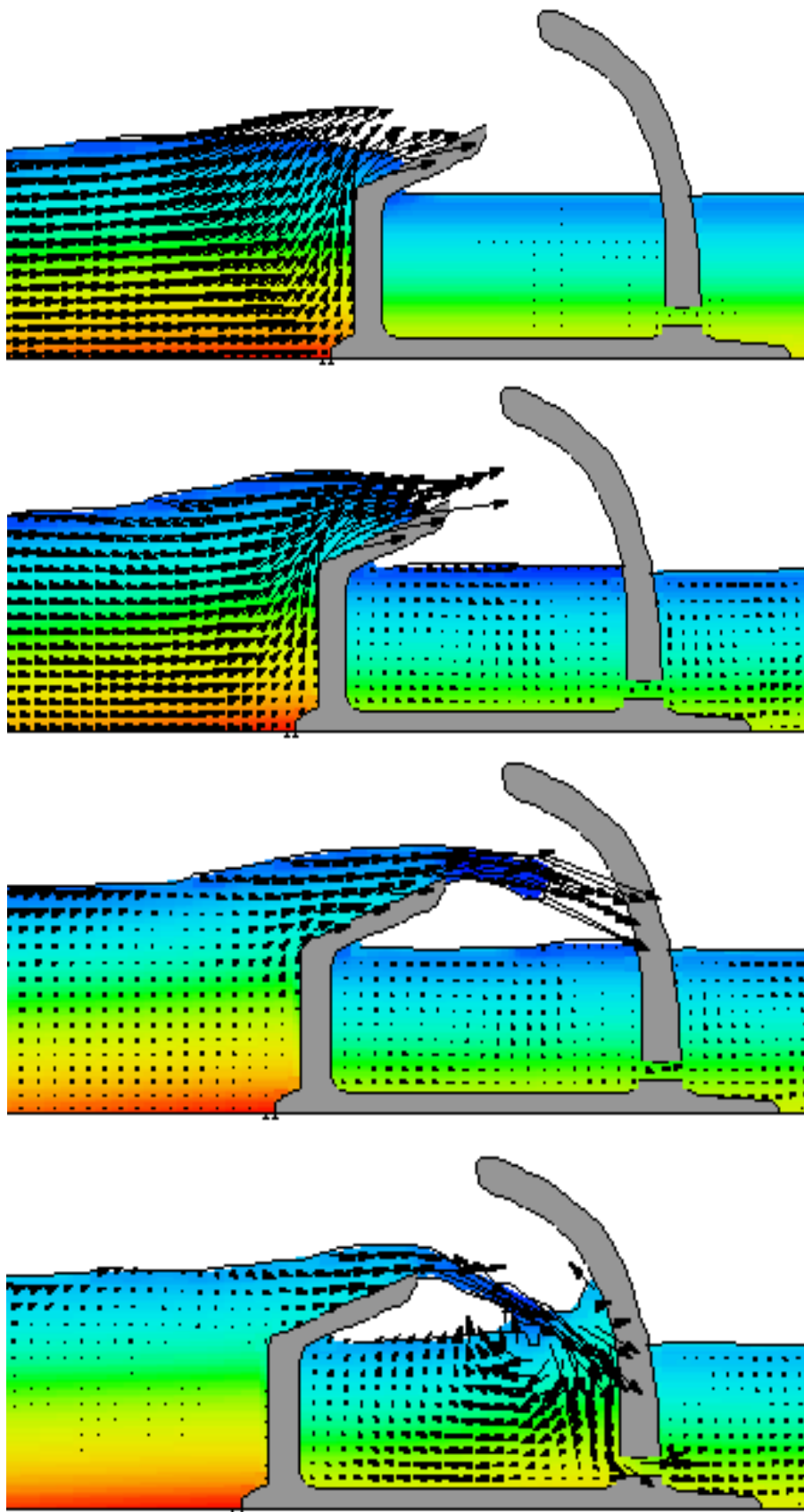


Рис. 5.15. Гидродинамика OWEC (вариант «а»)

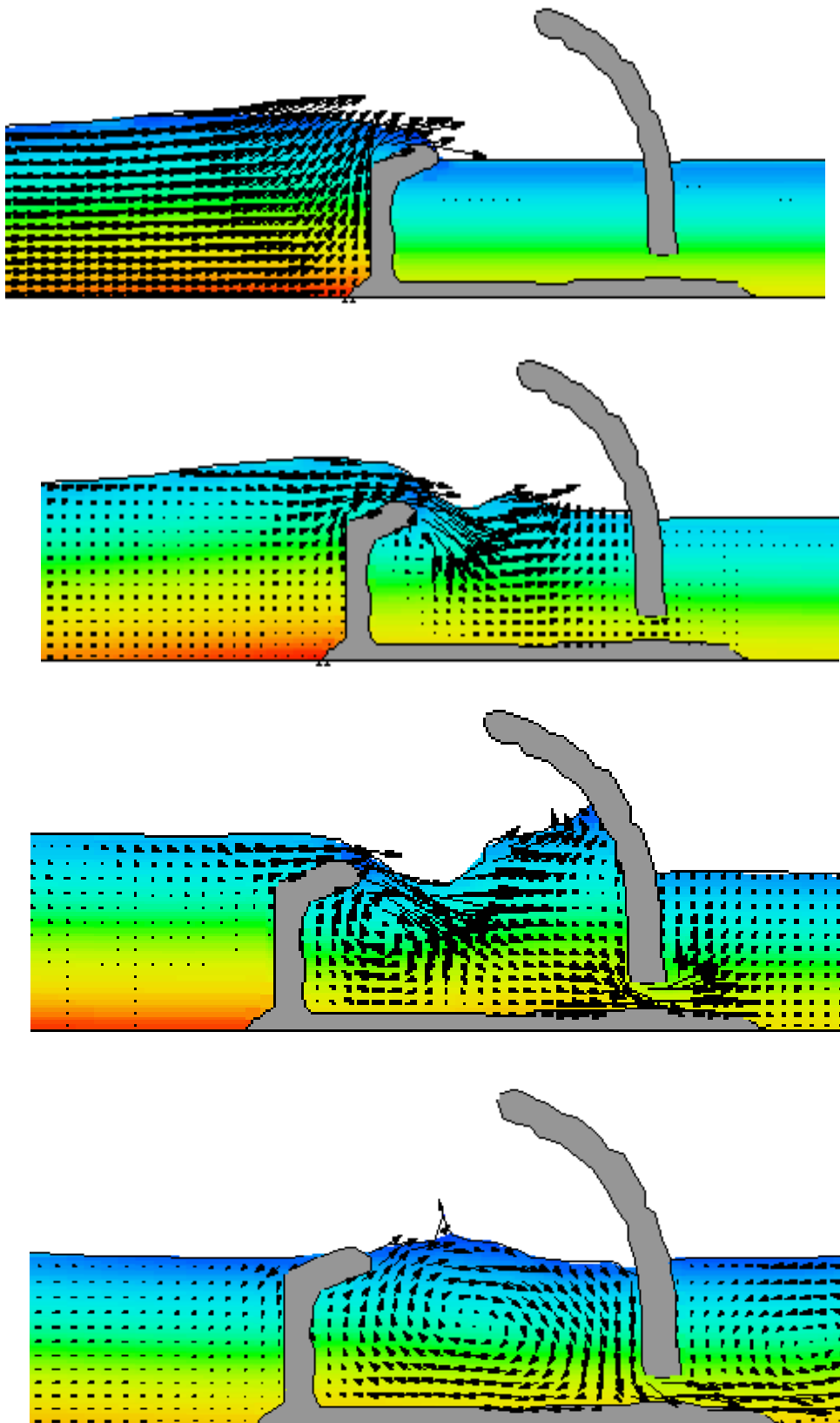


Рис. 5.16. Гидродинамика OWEC (вариант «б»)

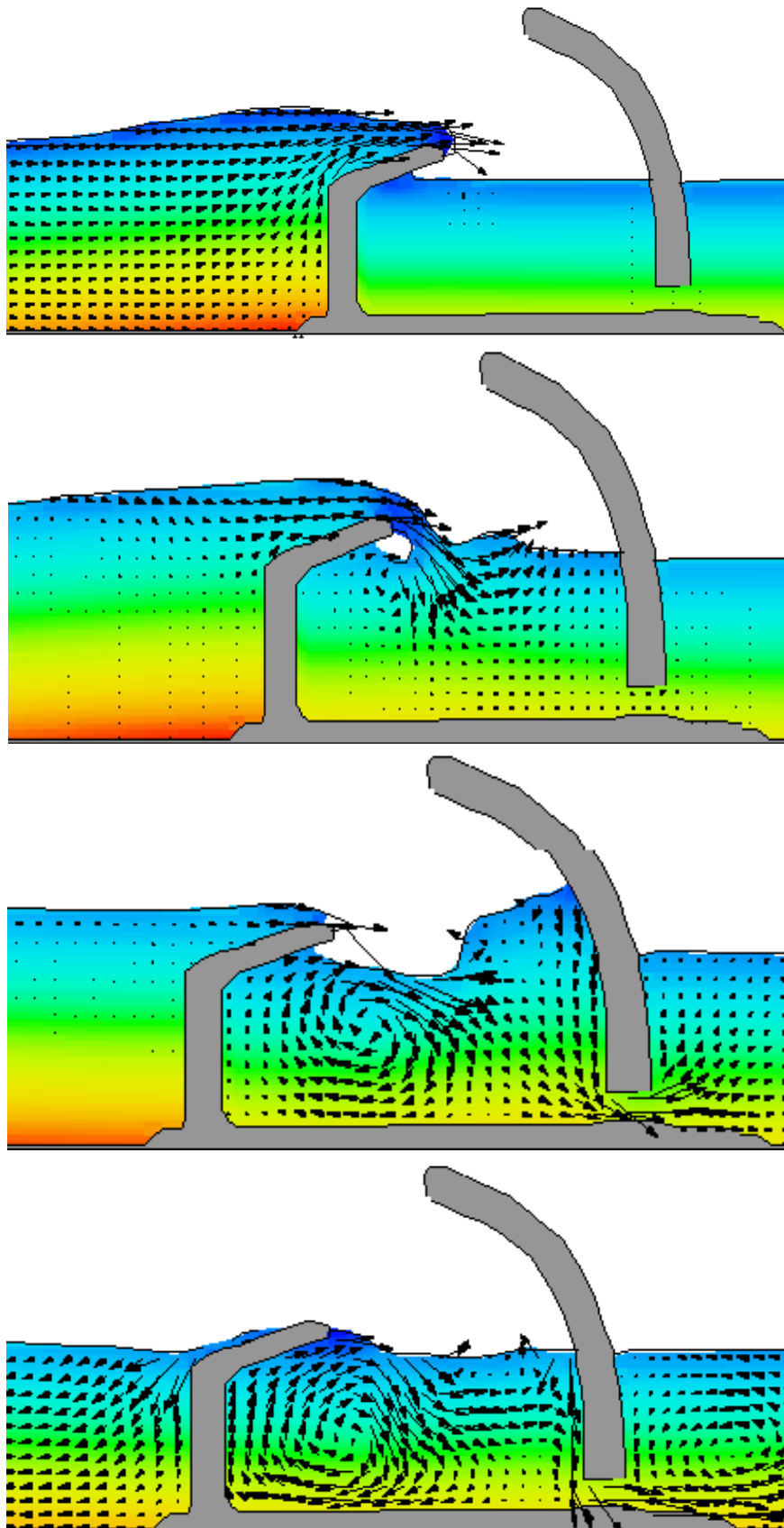


Рис. 5.17. Гидродинамика ВлЭС (вариант «в»)

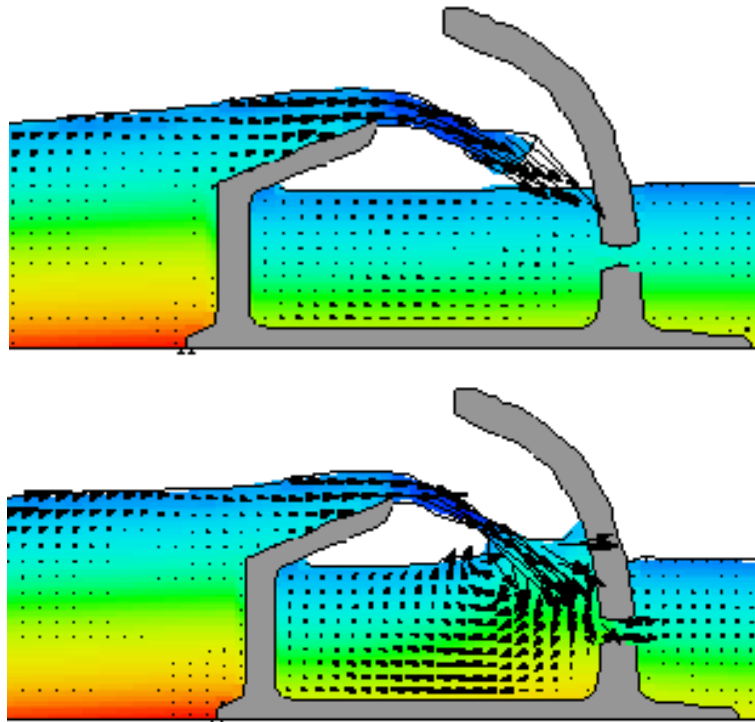


Рис. 5.18. Гидродинамика ВлЭС
(вариант «а», с возвышением оси подводного канала на 2,25 м)

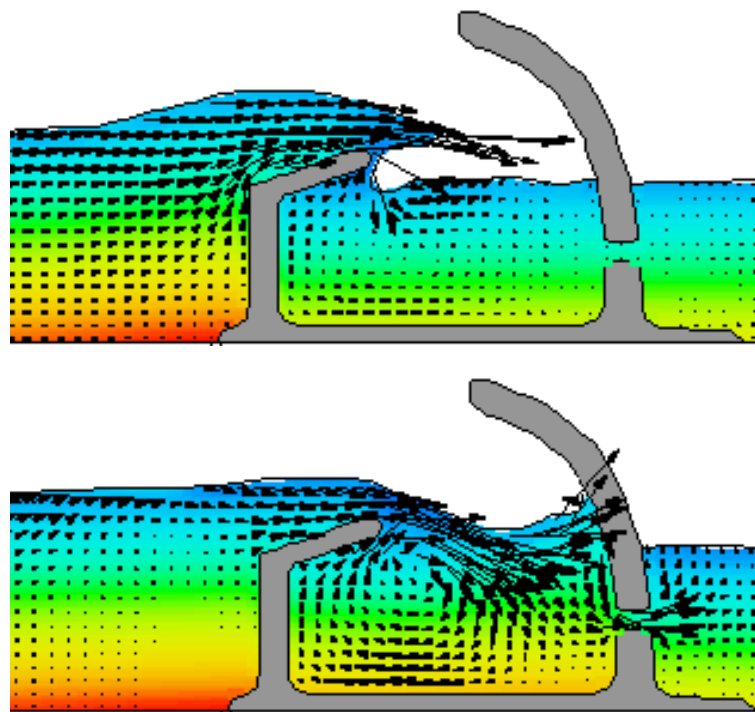


Рис. 5.19. Гидродинамика ВлЭС
(вариант «в», с возвышением оси подводного канала на 2,25 м)

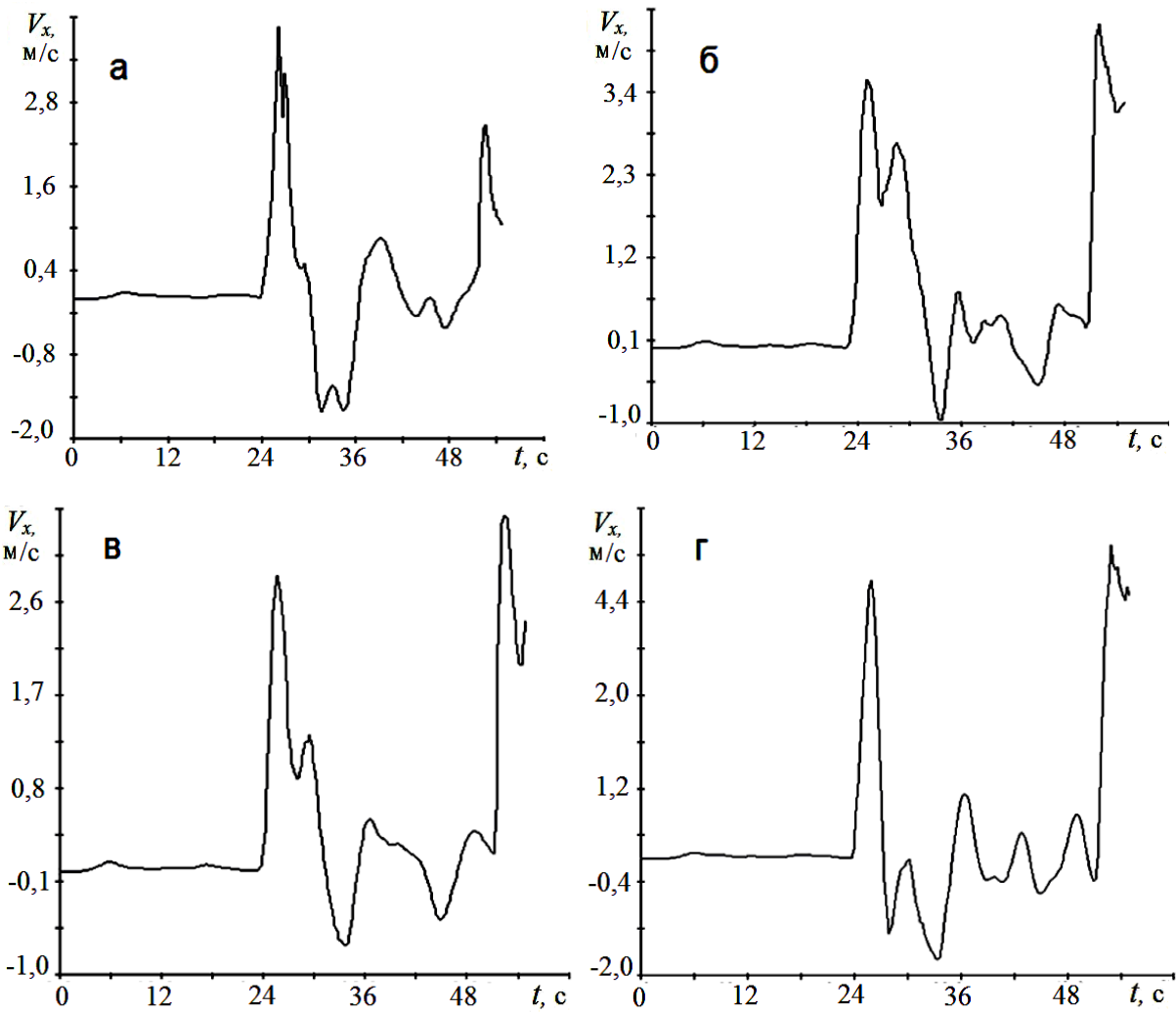


Рис. 5.20. Скорости течения в подводном канале для вариантов модели

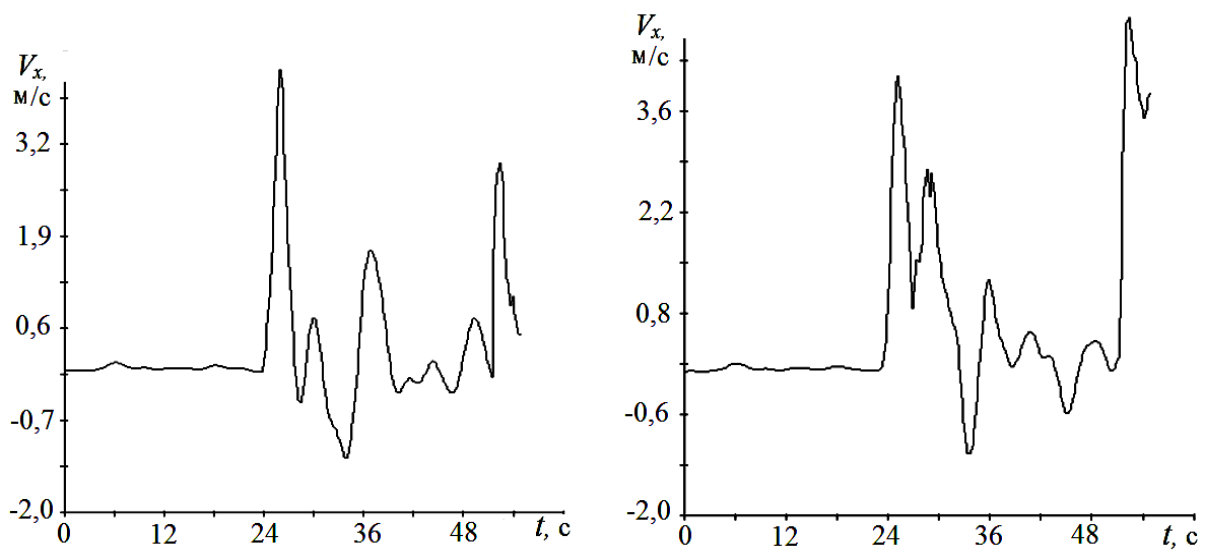


Рис. 5.21. Скорости течения в подводном канале для вариантов модели «а» и «в», с возвышением оси подводного канала на 2,25 м

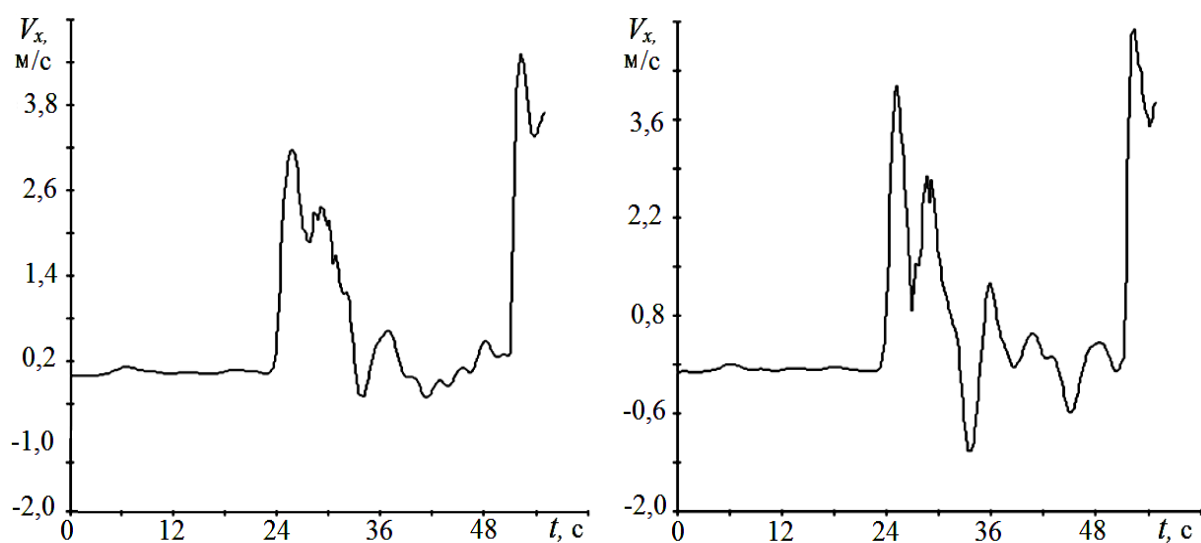


Рис. 5.22. Скорости течения в подводном канале для варианта «в», с возвышением оси подводного канала на 1 м и 2,25 м соответственно

По результатам проведённых исследований получены выводы.

1. Угол наклона верхней части фронтальной стенки влияет на течение в резервуаре. Чем он меньше угол, тем меньше деформируется свободная поверхность внутри камеры. В результате уменьшаются всплески в камере и перепады скорости в выходном канале.

2. Укороченная стенка с меньшим углом наклона меньше деформирует свободную поверхность внутри камеры. В результате уменьшаются всплески в камере и перепады скорости в отверстии.

3. Скорость в выходном отверстии, связанная с гидростатической разностью давлений в резервуаре и на уровне моря, относительно мала. В основном скоростные потоки обусловлены волновыми всплесками. Основная энергия волн имеет нестационарный гидродинамический характер из-за образования в резервуаре внутренних волн.

4. Средняя скорость в подводном канале повышается при его расположении ближе к поверхности воды. При этом для варианта «а» увеличение скорости составило 14 %, а для варианта «в» – 34 %.

5. Данная установка может быть ориентирована на районы с большой повторяемостью относительно крупной зыби, - тогда переднюю наклонную стенку можно сделать повыше.

5.3. Предложения комбинированных преобразователей

Обобщая результаты исследований преобразователей типа OWEC, отметим их принципиальные недостатки:

- высокие потери энергии при отражении волн от фронтальной стенки, при движении по откосной стенке и при плескании в бассейне;
- при малой волне лишь небольшая часть гребня волны переливается через край фронтальной стенки. Большая часть энергии отражается от передней стенки обратно в море;
- большая часть энергии крупных волн теряется при обратном выплескивании из резервуара, а также вследствие вихревых потерь.

Таким образом, преобразователи типа OWEC имеют низкую эффективность (к.п.д. не более 20 %) и узкий диапазон волн, при котором возможна их эффективная работа.

Преобразователи с подвижными элементами, в частности, системы OWSC, также имеют недостатки:

- эффективное использование только на крупных волнах, когда происходит интенсивное раскачивание «створок»;
- возможность сдвига и разрушения сооружений штормовыми волнами.

При этом следует отметить, что с увеличением мощности преобразователей и размеров створок эти проблемы возрастают.

В связи с этим поставим цель: **исключить недостатки и объединить достоинства систем OWEC и OWSC**. Для этого рассмотрим решение проблемы в рамках теории решения изобретательских задач (ТРИЗ).

Вначале за основу примем волновой преобразователь типа OWEC. Его фронтальная стенка обычно откосная со стороны моря. Однако компьютерный анализ гидродинамики преобразователя OWEC показал, что при крутом откосе гребень волны растёт не намного больше, чем при вертикальной стенке. В результате при малой волне лишь небольшая часть гребня волны переливается через край фронтальной стенки.

Эффективный рост гребней волн может быть только при пологом откосе и сужающемся канале (тип TAPCHAN), однако при этом вследствие вязкостного трения существенно теряется энергия волны. А самое главное, резко увеличиваются размеры, а значит и стоимость сооружения.

Отсюда вытекает техническое противоречие: если фронтальную стенку сделать пологой, чтобы концентрировать энергию волн, то большая часть энергии волн расходуется на трение, а малые волны просто не доходят до камеры. Если же применить вертикальную стенку, то большая часть энергии волн расходуется на отражение волн от стенки.

Для разрешения этого противоречия были проанализированы варианты фронтальной стенки разной формы. В результате был выбран вариант, имеющий стенку с вертикальной подводной частью и откосной вершиной у поверхности (см. рис. 5.13). Однако частично волна по-прежнему отражается от фронтальной стенки обратно в море и гасит следующую за ней волну.

При больших волнах в бассейне образуются внутренние волны. В результате часть воды выплескивается обратно (рис. 5.23), а в каналах гидротурбин поток воды неравномерный. Кроме того, при экстремальных волнах происходит сильный удар по экранирующей стенке, что может привести к ее разрушению или к опрокидыванию всей конструкции (рис. 5.24).

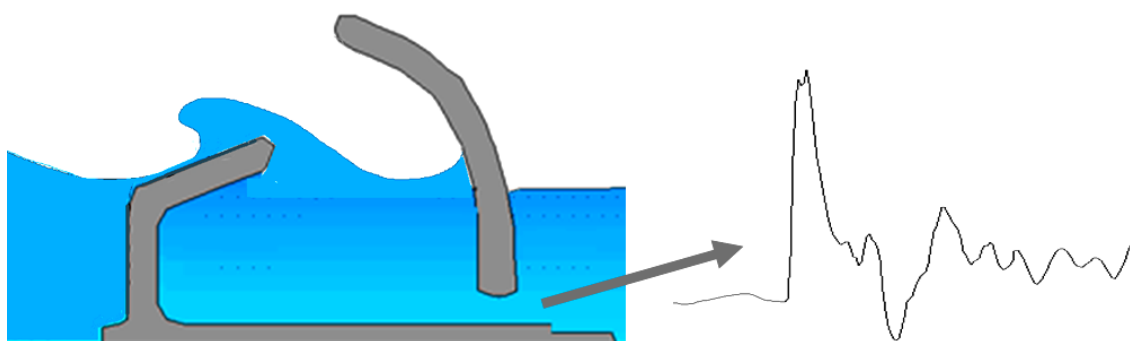


Рис. 5.23. Волновые всплески в резервуаре

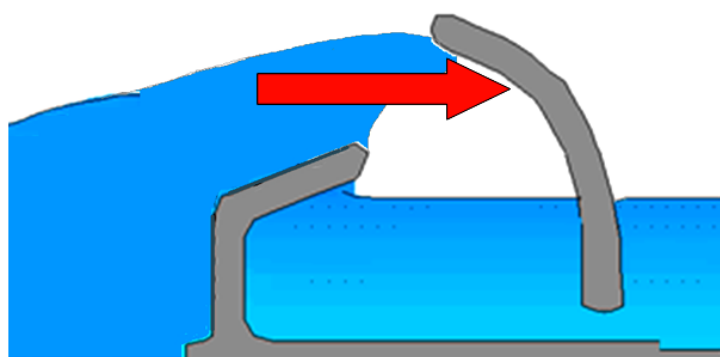


Рис. 5.24. Удар большой волны в экранирующую стенку

Отсюда вытекает *первое физическое противоречие*: экранирующая стенка необходима для захвата волн в камеру, но её нужно убрать, так как она приводит к выплёскиванию крупных волн из камеры, а при накате особо крупных волн может привести к разрушению или опрокидыванию всей конструкции.

Для разрешения противоречия применим типовые приёмы:

- Принцип «наоборот» – сделать неподвижный экран движущимся;
- Принцип динамичности – характеристики объекта должны меняться так, чтобы быть оптимальными на каждом этапе работы (при накате и откате волны); разделить объект на части, способные перемещаться относительно друг друга;
- Использование механических колебаний – привести экран в колебательное движение с целью использования этих колебаний;
- Принцип непрерывности полезного действия – все части объекта должны на каждой фазе прохождения волны работать с полной нагрузкой;
- Принцип «обратить вред в пользу» – использовать вредное воздействие среды (удары штормовых волн в экран) для получения положительного эффекта (использования энергии удара и снижения нагрузки на всё сооружение).

В результате получено решение (рис. 5.25): подвижный экран на шарнирах, приводимый в движение ударами волн.

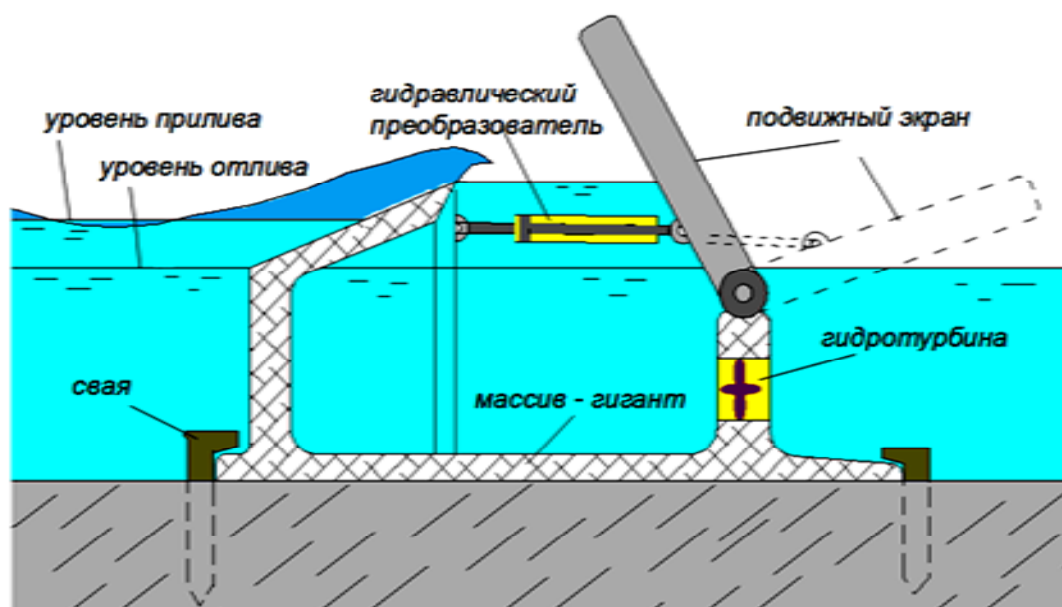


Рис. 5.25. Преобразователь с подвижным экраном

Движение экрана передаётся гидравлическому преобразователю энергии. В результате эффективность повышается. В бассейне не образуются крупные, выплёскивающиеся наружу волны. Кроме того, податливый экран меньше сопротивляется экстремальным волнам, что повышает надёжность сооружения.

Второе физическое противоречие: фронтальная стенка должна быть высокой, чтобы отражённые от экрана крупные волны не выплёскивались обратно, и должна быть низкой, чтобы небольшие волны переливались через неё. Особенно противоречивыми являются требования к её высоте при наличии существенных приливов.

Применим типовые приёмы разрешения противоречия:

– Принцип местного качества – верхняя часть фронтальной стенки должна находиться в условиях, наиболее соответствующих ситуации;

– Принцип «наоборот» – сделать неподвижную верхнюю часть фронтальной стенки движущейся;

– Принцип динамичности – высота стенки должна быть оптимальной на каждом этапе работы (при накате и откате волны); разделить фронтальную стенку на части, способные перемещаться относительно друг друга;

– Использование механических колебаний – привести неподвижные части в колебательное движение с целью использования этих колебаний.

В результате получено решение (рис. 5.26): гидростатический напор увеличивается за счёт шарнирной и плавающей наклонной части передней стенки. В этом случае высота передней стенки автоматически регулируется.

Существует мнение, что волноэнергетические установки рассматриваемого типа неприменимы в районах с приливами. Мы же считаем, наоборот: с учетом автоматического регулирования высоты фронтальной стенки при использовании шарнирной верхней части данная система может использоваться и как приливная. В этом случае сооружение просто должно полностью перегораживать залив, а оптимизация его размеров должна выполняться с учётом приливных колебаний уровня.

Дальнейшее развитие заключается в использовании части энергии волн, которая теряется на отражение от передней стенки. Отражённые волны гасят набегающие волны. В результате их энергия теряется в толще волн перед стенкой (рис. 5.27).

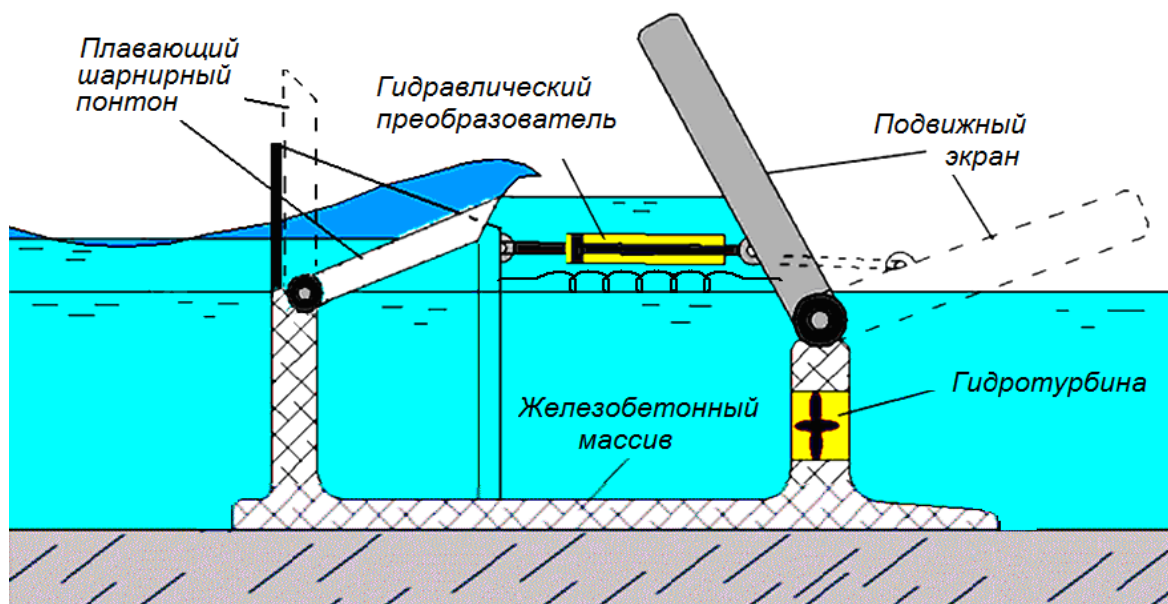


Рис. 5.26. ВлЭС с двумя типами преобразователей энергии и подвижной верхней частью фронтальной стенки

Третье физическое противоречие: фронтальная стенка должна быть, чтобы удерживать воду и создавать напор в камере. Но эту стенку нужно убрать, так как она отбрасывает большую часть энергии волн.

Применим типовые приёмы разрешения противоречия:

- Принцип «наоборот» – сделать стенку не жёсткой, а податливой;
- Принцип динамичности – характеристики стенки должны меняться так, чтобы быть оптимальными на каждом этапе работы (при накате и откате волн); разделить части на части, подвижные относительно друг друга;

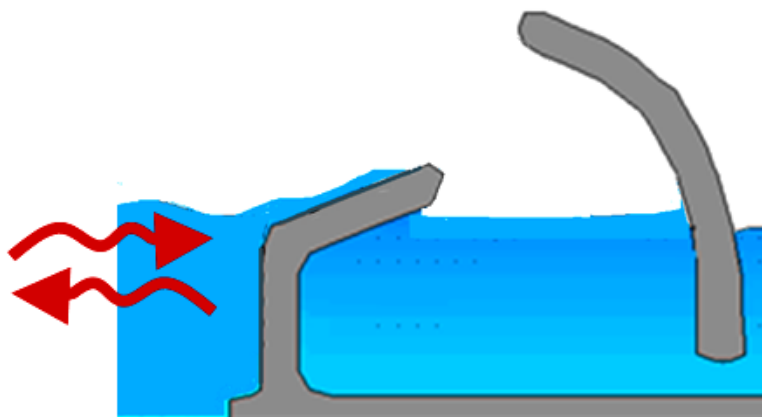


Рис. 5.27. Потери энергии на фронтальной стенке

– Принцип «обратить вред в пользу» – использовать вредное воздействие волн на подводную часть стенки для получения положительного эффекта (непосредственного использования энергии).

В результате получены два решения:

– вариант 1: клапаны в передней стенке, пропускающие волновой поток в бассейн и запирающиеся при обратном течении (рис. 5.28);

– вариант 2: преобразователь с подвижной передней стенкой, работающей аналогично системе «Oyster» (рис. 5.29).

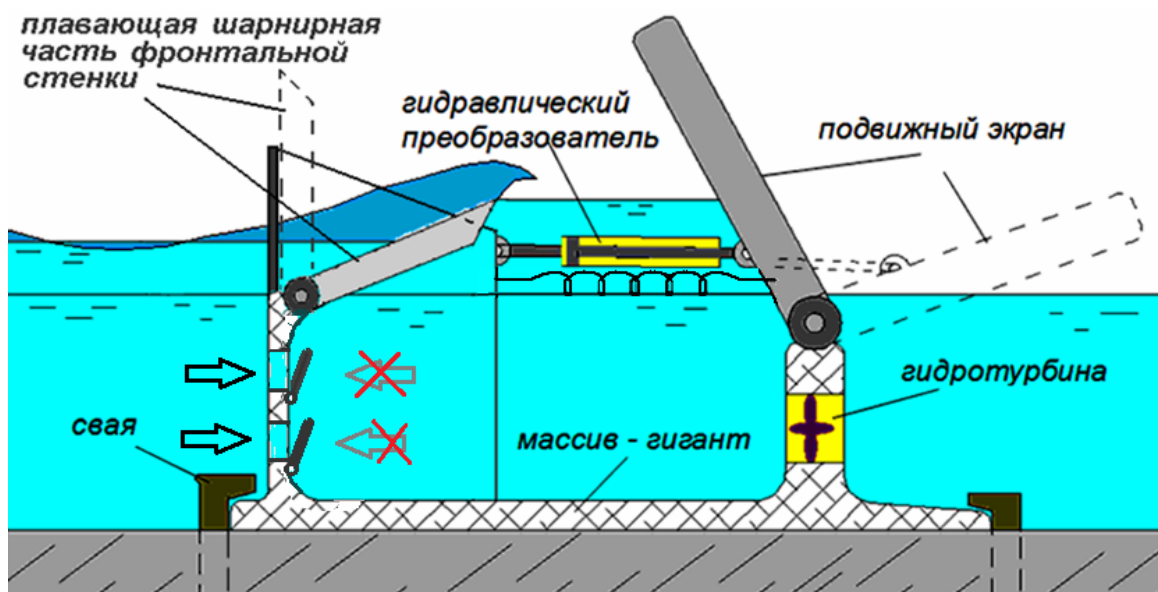


Рис. 5.28. ВлЭС с энергопоглощающей передней стенкой

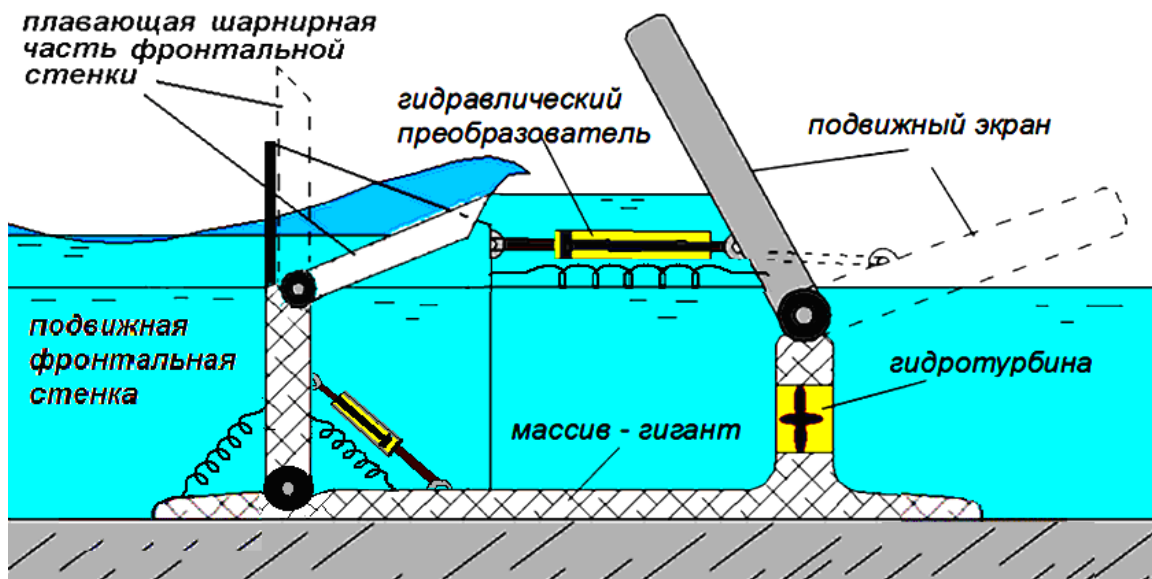


Рис. 5.29. ВлЭС с энергопоглощающей передней стенкой

Таким образом, введением различных подвижных элементов получаем наиболее эффективное использование энергии волн в широком диапазоне волнового спектра при повышении устойчивости конструкции к воздействию экстремального волнения.

5.4. Проблема обледенения

При эксплуатации волновых электростанций в северных районах возникнет проблема их обледенения. В первую очередь покрываются льдом надводные части конструкций при отрицательных температурах воздуха. При обледенении подвижных частей устройство перестает выполнять свою основную задачу. Также при обледенении некоторых частей, они теряют свою прочность, что может привести к их повреждению.

Эта же проблема существует при эксплуатации судов. На рис. 5.30 приведены районы возможного опасного обледенения судов [29] в северной части Тихого океана в январе - марте. Как видно, они совпадают с прибрежными районами, наиболее благоприятными с точки зрения получения наибольшей энергии морских волн.

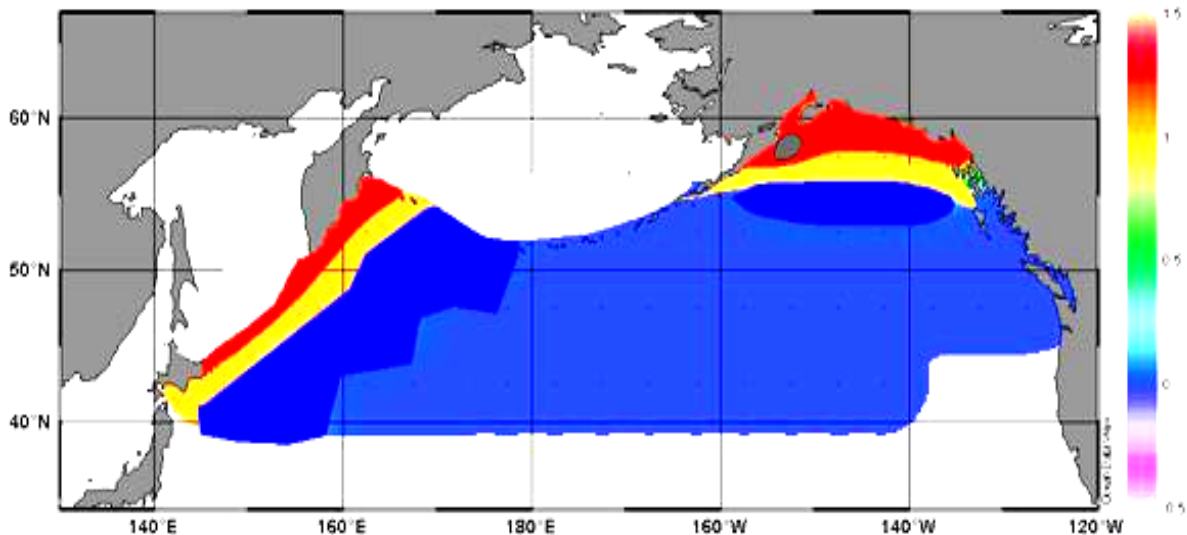


Рис. 5.30. Карта районов возможного опасного обледенения судов [29]

На рис. 5.31 и 5.32 представлены особенности процессов обледенения [26], из которых видно, что основной причиной обледенения являются брызги от разрушающихся волн, прилипающие к надводной поверхности конструкций, имеющих отрицательную температуру. При

этом нарастание льда преимущественно происходит со скоростью менее 0,6 см/ч при температуре воздуха ниже – 30 °С и скорости ветра до 9 м/с.

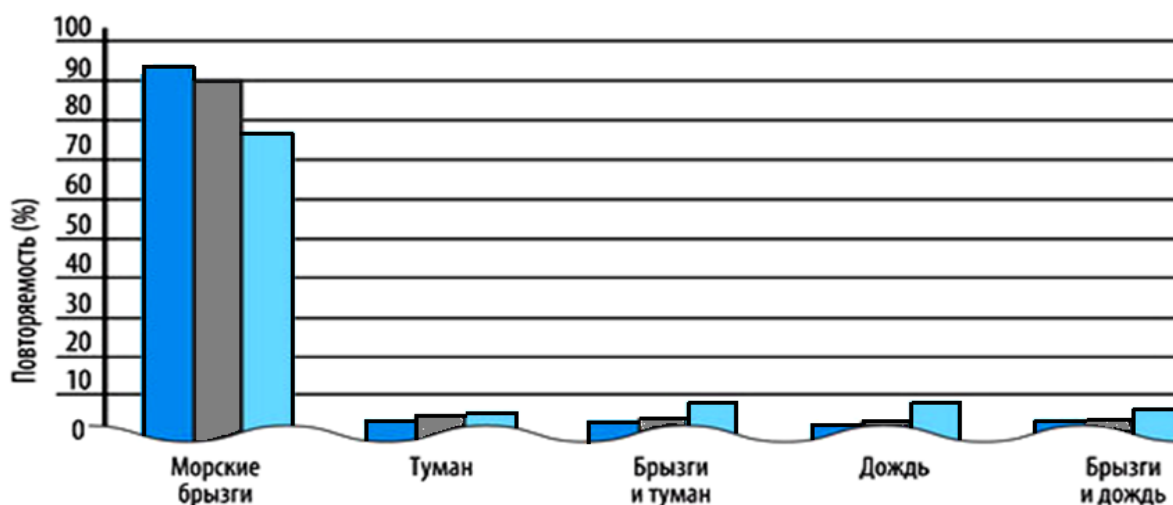


Рис. 5.31. Повторяемость случаев обледенения судов в зависимости от причин обледенения [26]

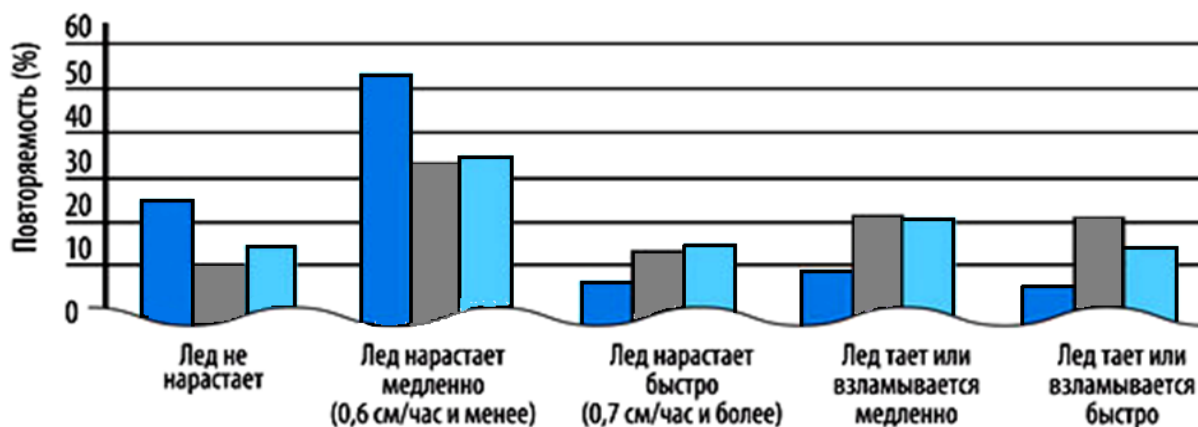


Рис. 5.32. Повторяемость случаев обледенения судов в зависимости от характера обледенения [26]

Следует отметить некоторые очевидные отличия процессов обледенения судов и волновых преобразователей:

а) надводные части волнового преобразователя выступают над поверхностью воды в меньшей степени, чем палуба и надстройки корпуса судна (во всяком случае это касается системы OWSC);

б) способы борьбы с обледенением, используемые на судне (околка льда, применение противообледенительных растворов, уход от шторма в порт – убежище и др.), или не годятся, или сложно применимы для волновых электростанций.

Полностью или частично можно исключить обледенение конструкций путём их погружения под воду. При этом система OWSC может быть приспособлена к работе под водой (при некотором снижении эффективности).

Сложнее обстоит дело с системой OWEC. Можно допустить обледенение при фиксации конструкций и остановке работы преобразователей на период с декабря по апрель. Остановка работы в любом случае неизбежна при образовании сплошного ледяного покрова. Однако на восточном побережье Камчатки и Курильских островов, на открытом побережье припайный лед обычно не образуется.

Для решения проблемы на основе ТРИЗ будем исходить из идеального конечного результата (ИКР), заключающегося в способности устройства полностью противостоять обледенению (ледяная корка не образуется).

При анализе проблемы рассмотрим применение *законов развития технических систем*.

– Закон увеличения степени идеальности систем.

Ледяная корка образуется на поверхности с отрицательной температурой. Чем меньше площадь этой поверхности, тем ближе система к идеалу.

– Закон увеличения степени динамичности систем.

Система должна двигаться, например чтобы: сбрасывать лёд; постоянно погружаться в воду, снижая скорость нарастания ледяной корки; или чтобы лёд растрескивался при вибрации и не нарастал на подвижных соединениях.

– Закон увеличения энергетической проводимости систем.

Развитие систем идет путем повышения проводимости полезных потоков энергии.

Далее сформулируем *технические противоречия*:

– Можно использовать нагрев, но тогда на него будет расходоваться большая часть энергии;

– Можно максимально уменьшить площадь надводных частей сооружения, подверженных обледенению. В частности, в системе OWEC убрать заднюю экранирующую стенку. Но тогда эффективность системы в рабочих условиях эксплуатации, особенно при воздействии крупного волнения, будет недопустимо снижена;

– Можно предусмотреть «складную» конструкцию (например, с дополнительными шарнирами), которую в зимний период опускать (складывать) под воду. Но при этом недопустимо усложняется конструкция, снижается её надёжность и эффективность;

– Можно вообще ничего не делать (осенью фиксировать подвижные части и оставлять устройство до весны), но при этом существенно уменьшается время использования устройства, а значит его эффективность.

Рассмотрим подробнее два первых противоречия. Их анализ позволил выйти на соответствующие *физические противоречия*:

– Температура поверхности надводных частей должна быть положительной (чтобы исключить замерзание частиц воды), но это невозможно, если температура воздуха на поверхности контакта отрицательная.

– Площадь надводной поверхности должна отсутствовать (чтобы не образовывалась ледяная корка) и должна быть большой (чтобы улавливать гребни волн).

Для разрешения этих противоречий с применением инструментов ТРИЗ выполним вепольный анализ системы. В оперативной зоне имеем (рис. 5.33): вещество конструкции V_1 ; брызги V_2 ; поле отрицательных температур воздуха Π_1 ; поле положительных температур морской воды Π_2 .

Исходная вепольная система имеет вредное воздействие отрицательных температур воздуха Π_1 и переохлаждённых брызг V_2 , а также недостаточный нагрев от морской воды на конструкцию V_1 .

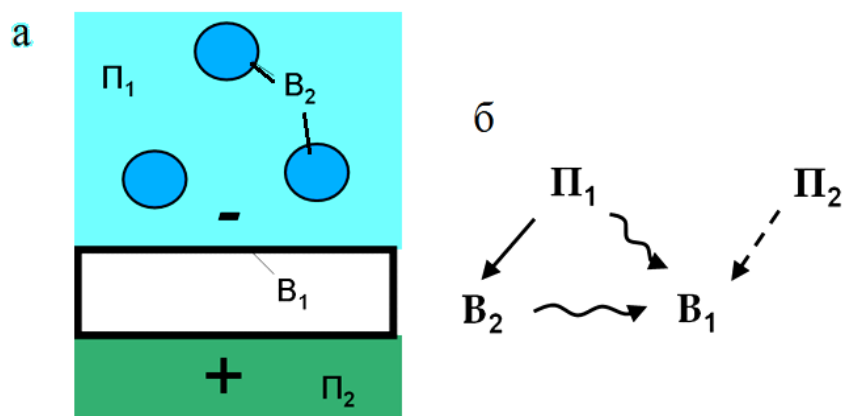


Рис. 5.33. Вепольный анализ системы:

а – вещества и поля температуры в оперативной зоне;

б – исходная вепольная система

Для усиления воздействия (омывания поверхности водой с положительной температурой) следует использовать ресурсы (по возможности, даровые, внутрисистемные ресурсы). Таким ресурсом является только вода Π_2 , имеющая положительную, но слишком низкую температуру.

Для усиления теплового воздействия традиционно применяются радиаторные батареи. Используем этот принцип (рис. 5.34), увеличивая площадь нагрева конструкции под водой. Это можно сделать путём гофрировки подводной части (рис. 5.35).

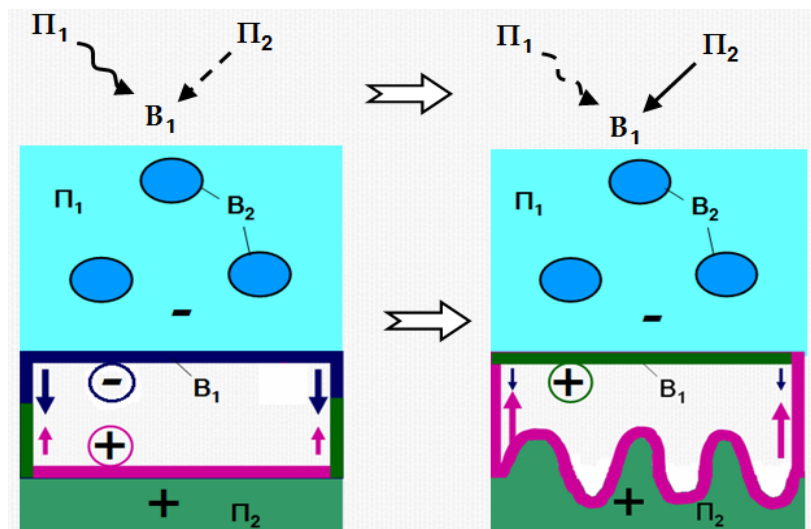


Рис. 5.34. Изменение вепольной системы

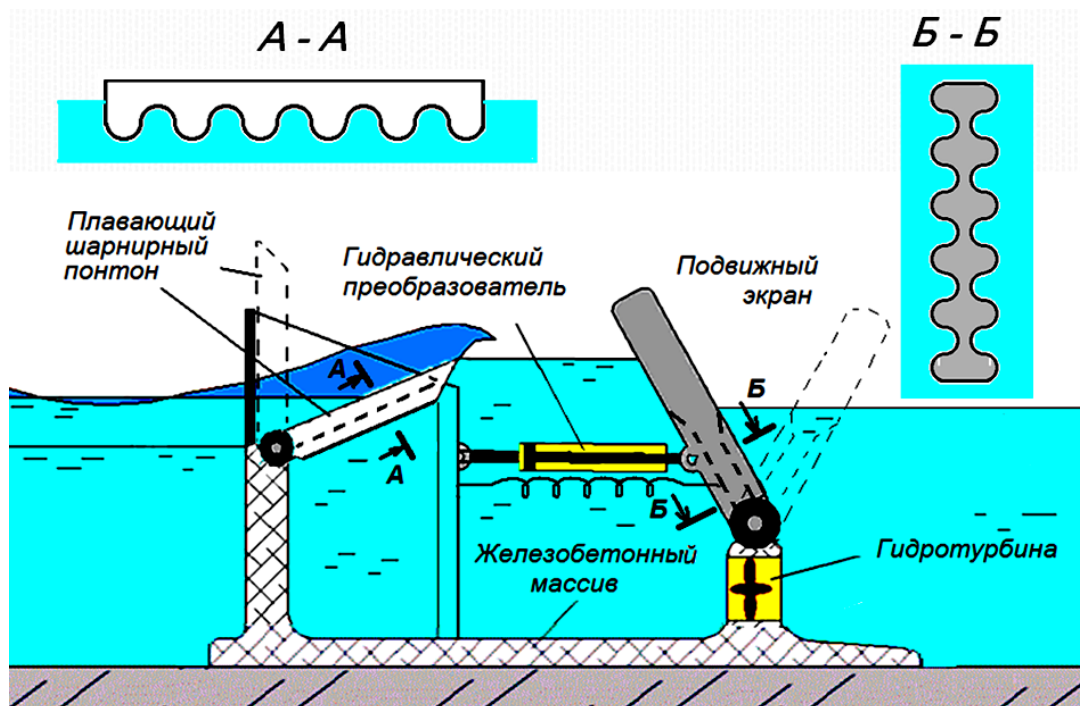


Рис. 5.35. Применение гофрировки подводной части створок

5.5. Численное моделирование комбинированных преобразователей

Рассмотрим сопоставление результатов расчётов нескольких вариантов упрощенной плоской модели преобразователя волновой энергии резервуарного типа в несжимаемой вязкой жидкости с применением метода конечных объемов.

Для сравнения на рис. 5.36 представлено взаимодействие с волнением преобразователя типа OWEC с неподвижными стенками.

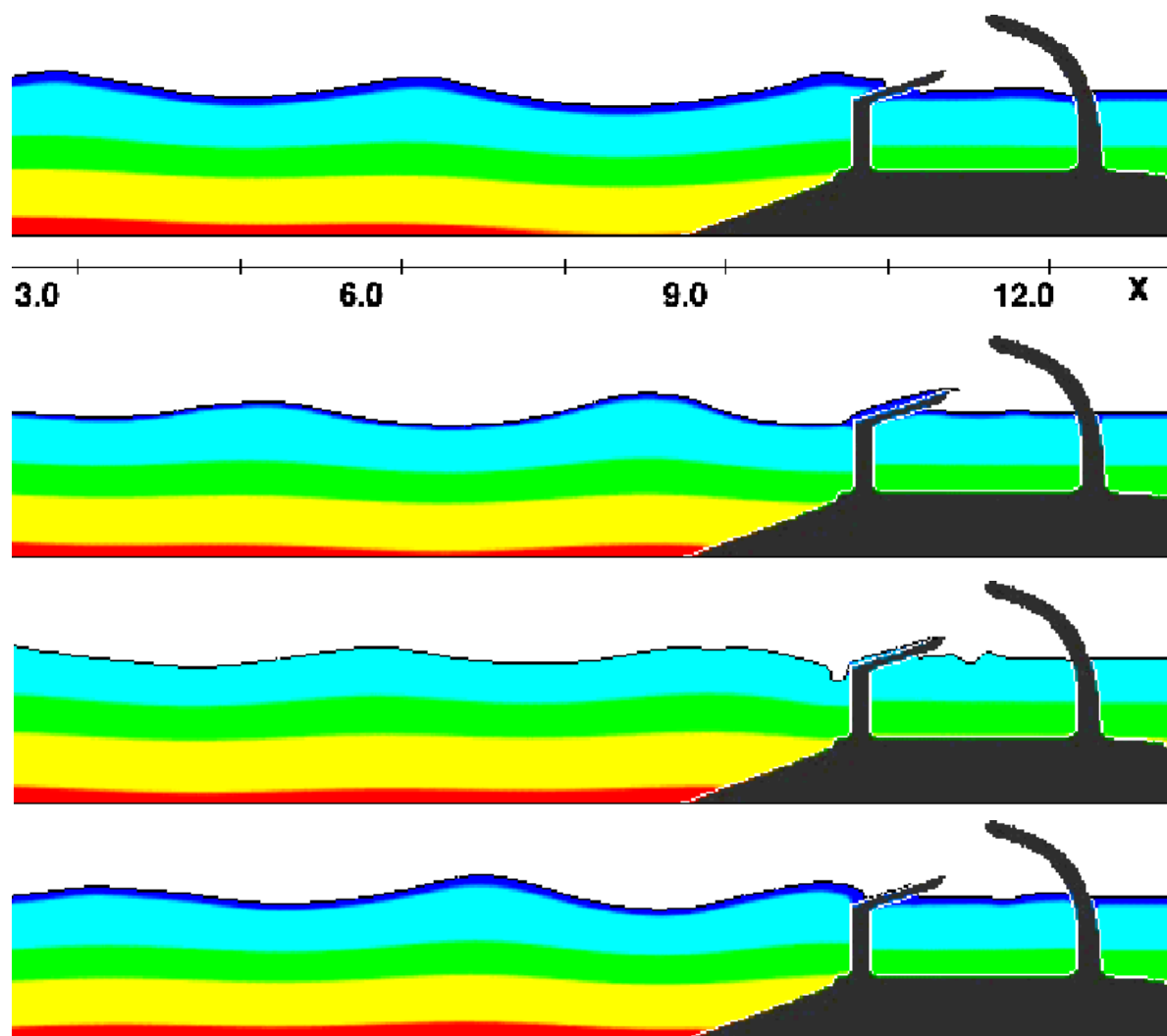


Рис. 5.36. Накат волн на преобразователь с неподвижной стенкой
($h = 23$ см; $T = 1,43$ с)

На этом примере видны наглядно недостатки системы OWEC в условиях неблагоприятных параметров волн. Волны зыби подходят к вертикальной стенке на докритической глубине. Большая часть волны отражается от стенки. В результате перед стенкой формируются стоячие волны. Но, несмотря на то, что высота стоячих волн увеличена, в резервуар попадает лишь незначительная часть воды.

На рис. 5.37 и 5.38 представлены результаты для преобразователя, у которого верхняя часть фронтальной стенки является подвижной, удерживаемой силами плавучести.

В этом случае, несмотря на то, что значительная часть энергии волн расходуется на отражение от вертикальной стенки и образование стоячих волн, их гребни свободно переливаются в резервуар, образуя перепад уровней воды. Шарнирная верхняя часть стенки по мере заполнения резервуара за счёт плавучести поднимается, исключая обратный перелив. Если резервуар не имеет выходных водопроводов, то постепенно уровень в нём поднимается на высоту гребней волн.

На рис. 5.39 преобразователь имеет шарнирно подвижную всю фронтальную стенку. Вследствие качки шарнирной стенки в такт набегавшим волнам, перед ней не формируются взбросы, и не происходит отражение волн. Но практически отсутствует и перелив в бассейн. Отражает волны тыловая неподвижная стенка.

Таким образом, данная конструкция не обеспечивает формирование перепада уровней, достаточного для её работы в качестве системы OWEC. Однако, если предусмотреть полезное сопротивление движению фронтальной стенки (устройство отбора мощности) и ограничить тем самым её раскачку, то формирование перепада уровней можно обеспечить. Эффективность системы OWEC будет несколько ниже, чем при неподвижной фронтальной стенке, зато будет обеспечен отбор кинетической энергии волн. Такой комбинированный способ преобразования энергии волн может обеспечить эффективность даже большую, чем в системе с неподвижной фронтальной стенкой.

В заключение можно отметить, что в общем случае, как передняя, так и задняя стенки резервуара (либо их верхние части) могут быть шарнирно подвижными (рис. 5.40). Таким образом, в основе проектирования преобразователя стоит задача оптимизации размеров неподвижных и подвижных элементов, а также их связей (элементов плавучести, упругих связей, устройств отбора мощности) исходя из параметров волнения.

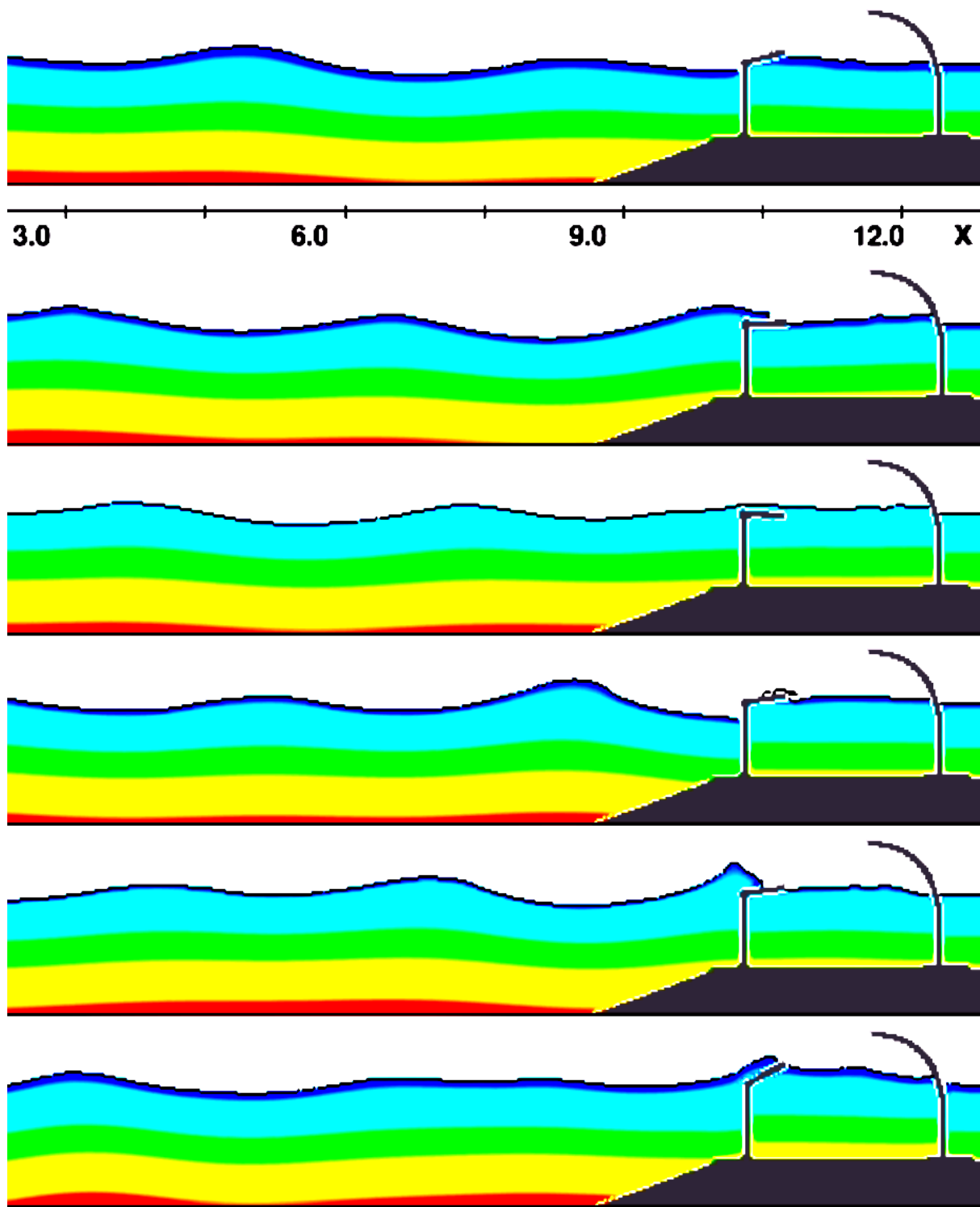


Рис. 5.37. Накат волн на преобразователь с неподвижной вертикальной стенкой и шарнирной верхней частью ($h = 23$ см; $T = 1,43$ с)

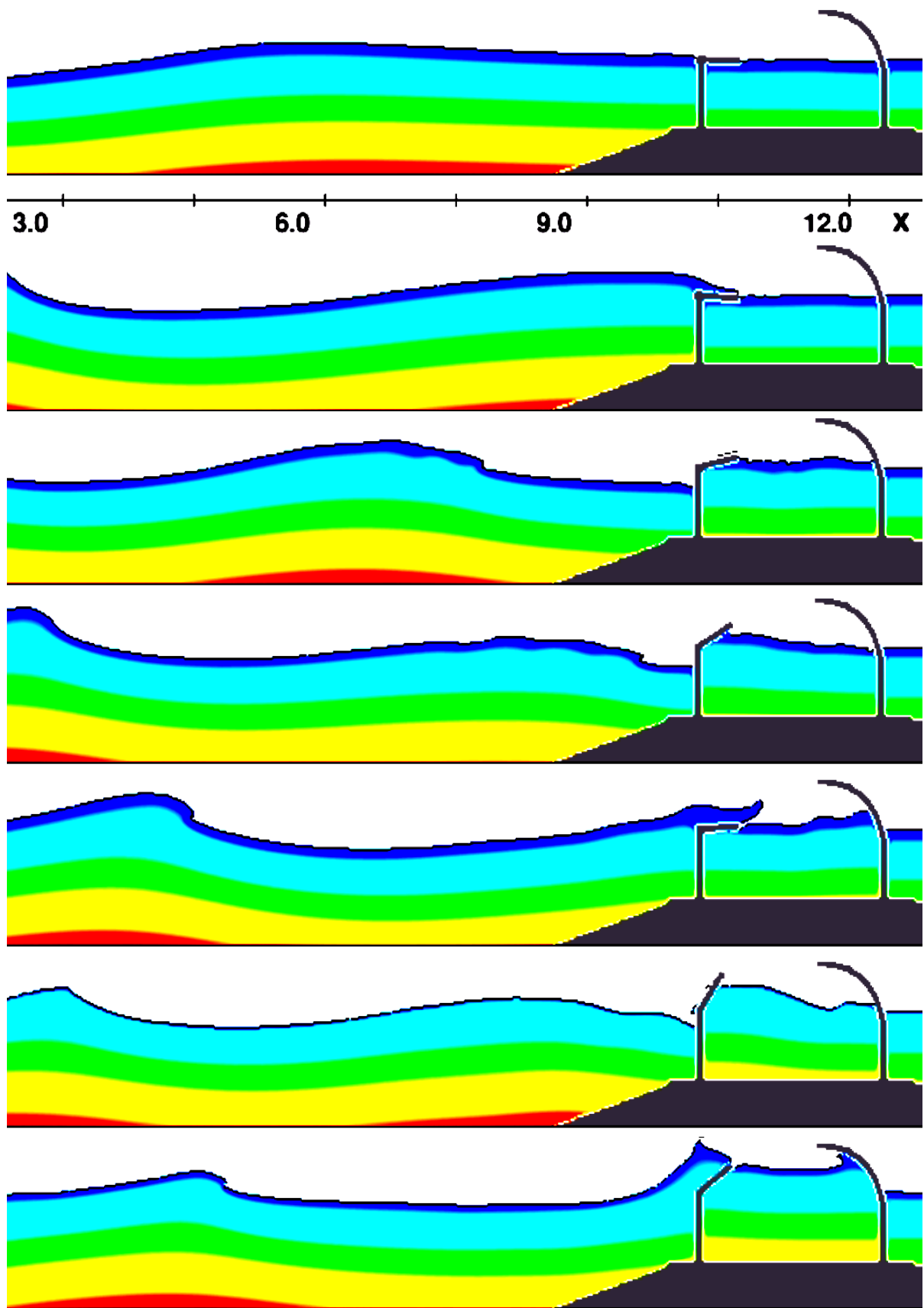


Рис. 5.38. Накат волн на преобразователь с неподвижной вертикальной стенкой и шарнирной верхней частью ($h = 55$ см; $T = 2,0$ с)

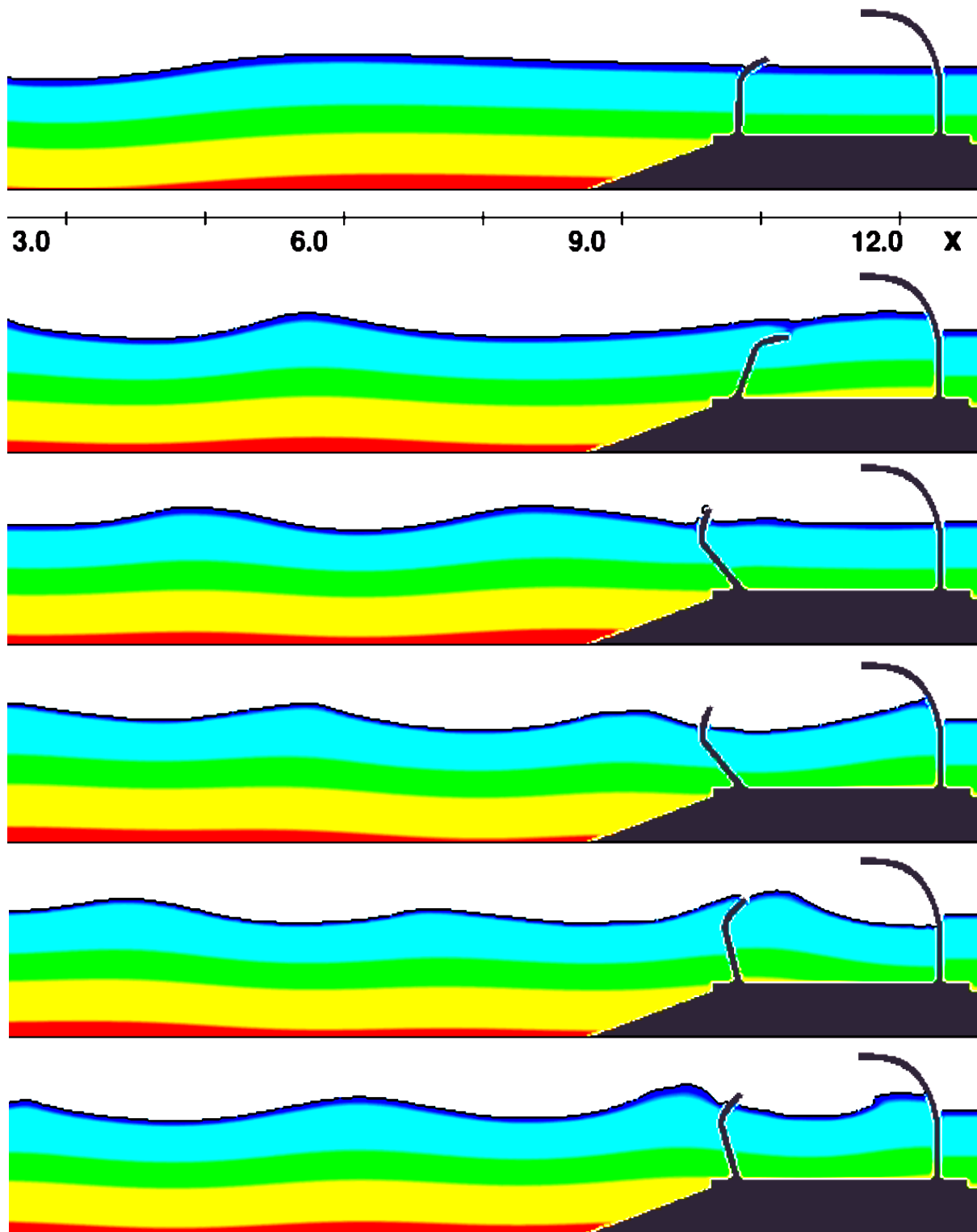


Рис. 5.39. Накат волн на преобразователь с подвижной фронтальной стенкой ($h = 23$ см; $T = 1,43$ с)



Рис. 5.40. Накат волн на преобразователь с двумя вертикальными стенками, имеющими шарнирные верхние части

5.6. Технико-экономическое обоснование

Выполним оценку практической применимости преобразователей типа OWEC и комбинированных систем с резервуаром. Если рассматривать выходную мощность гидроэнергетической установки, работающей только на основе гидротурбины в подводном канале, то можно использовать известное выражение:

$$N = \eta_m \eta_{эз} \rho g Q \Delta h ,$$

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

Выполненные по этой формуле расчёты мощности волновой электростанции типа OWEC представлены в табл. 5.1. Расход воды через гидротурбину здесь определен на основе результатов гидродинамических расчётов, частично представленных в разделе 5.2.

Если использовать дополнительный отбор энергии волн за счёт использования подвижных створок комбинированного преобразователя, а также автоматическое управление параметрами колебательной системы, то, по предварительным оценкам, мощность волнового преобразователя возрастёт более чем в два раза. Кроме того, следует учесть, что размеры установок пока не оптимизированы. После проведения оптимизации параметров сооружения будет достигнута ещё большая расчётная мощность ВлЭС.

Разрабатывая проект ВлЭС, следует исходить в первую очередь из рентабельности будущей энергоустановки, из возможности снижения себестоимости, простоты изготовления деталей, монтажа и эксплуатации, и также, из возможности промышленного производства.

Таблица 5.1

Оценка мощности гидротурбин OWEC на единицу длины фронта

Вариант	$h = 1,5 \text{ м}$		$h = 0,75 \text{ м}$	
	$Q, \text{ м}^2/\text{с}$	$N, \text{ кВт/м}$	$Q, \text{ м}^2/\text{с}$	$N, \text{ кВт/м}$
1	1,0	1,7	0,4	0,6
2	1,75	4,5	0,56	1,4
3а	1,75	4,5	0,5	1,2
3б	1,4	5,9	0,44	1,8
4	2,1	5,1	0,54	1,3

Оценим зависимость выходной энергии предлагаемых систем от высоты волн и от размеров сооружения. Энергия одной волны на 1 м её фронта определяется в виде [4; 37, с. 111]:

$$E = \frac{1}{8} \rho g h^2 \lambda.$$

Исследования исходных преобразователей энергии волн OWEC (без дополнительных элементов), представленных на рис. 5.13, показали [49, с. 77; 58, с. 16], что их к.п.д. составляет от 15 % (для волн высотой 1 м) до 35 % (для волн высотой более 2 м). Расчёты и эксперименты с моделью преобразователя типа OWSC показали [43, с. 89; 46, с. 16], что его к.п.д. составляет от 20 % (для длинных волн) до 30 – 40 % (для более коротких волн на небольших глубинах). С учётом этих обстоятельств получена энергетическая эффективность комбинированных преобразователей. Результаты этой оценки представлены в табл. 5.2.

Стоимость строительства одного погонного метра сооружения (табл. 5.3) получена исходя из следующих ориентировочных данных: стоимость бетона – 3 000 р./м³; стоимость бетонных работ с учётом стоимости бетона и опалубки – 10 000 р./м³; требуемый объём бетонного массива (на один метр длины): 17 м³.

Таблица 5.2

Энергия волн и выходная энергия комбинированного преобразователя
на единицу длины фронта

h , м	λ , м	Энергия волн		Энергия преобразователя на выходе, Вт·ч/м	
		E , кДж/м	E , Вт·ч/м	OWEC	Комбинированного
1	18	22,1	6,2	1	3
2	28	135,5	38	7	20
3	46	500	140	30	84

Таблица 5.3

Ориентировочная стоимость строительства ВлЭС (на один метр длины)

Затраты	Стоимость, тыс. р./м	
	преобразователя OWEC	Комбинированного преобразователя
Изготовление и монтаж бетонных и металлических конструкций	180	300
Механическое и электротехническое оборудование	200	300
Гидротехнические работы	100	120
Технический надзор	40	80
Итого	520	800

В качестве генераторов могут использоваться бесплотинные ГЭС (в частности, патент № 2166664 от 10.05.2001, – автор: Н. И. Ленева) Генератор Н. И. Ленева мощностью 11 кВт имеет размеры 1,6х0,6х0,7 м. Он эффективно работает при скоростях течения порядка 1 м/с. Стоимость установки на 1 кВт мощности – не более 6 000 р./кВт, в том числе: электрогенератор – от 500 до 5 000 р./кВт вместе с регулирующей аппаратурой. В этом случае стоимость оборудования в табл. 5.3 будет существенно ниже (не более 100 000 р./м).

Срок окупаемости ВлЭС, исходя из среднемировой цены на энергию (0,1 долл./кВт·ч), составляет менее двух лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в этой книге результаты позволяют, по нашему мнению, сделать вывод не только о принципиальной возможности создания эффективных систем для извлечения энергии волн, но и целесообразности практической разработки и реализации проектов волновых электростанций.

Введение в конструкции преобразователей энергии волн различные сочетания концентраторов, направляющих элементов и подвижных створок, применение эластичных связей и элементов управления колебаниями позволяет добиться наибольшей эффективности, а также настраивать преобразователи на работу в оптимальном режиме при изменениях волнения.

Предложены и обоснованы технические решения, обеспечивающие повышение эффективности по сравнению с известными проектами и имеющие реальную возможность реализации, в частности, комбинированный преобразователь, обеспечивающий повышенную эффективность утилизации энергии волн и малый преобразователь энергии волн типа OWSC для обеспечения малых поселений и объектов на морском побережье. Расчёты по этим проектам показали: возможность обеспечения эффективности до 40 %; небольшую стоимость (сопоставимую или меньшую, чем у ветрогенераторов); быструю окупаемость при стоимости электроэнергии от 2 до 4 р./кВтч.

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.

Практическая значимость:

1. Предложен проект экологически чистого обеспечения многих прибрежных районов ДВ неограниченным во времени возобновляемым источником энергии морских волн, позволяющий отказаться от привозного топлива.
2. Возможно строительство станций малой и средней мощности с последовательным наращиванием мощности, без больших начальных затрат.
3. Постепенное наращивание мощностей ВлЭС позволит создать основу для развития эффективной экономики отдалённых регионов ДВ, повышения уровня жизни населения.
4. Комбинированное применение ВлЭС в качестве волноломов, рейдовых причалов и др. прибрежных 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.

В таблице 6 представлено сопоставление основных показателей различных энергетических систем, наглядно показывающее преимущества электростанций на энергии волн.

Таблица 6 – Эффективность ВлЭС в сравнении с другими энергосистемами

ЭС	Удельная стоимость, долл./кВт	Срок окупаемости, год	Наименьшие начальные капиталовложения, млн долл.	Экологичность	Дополнительные функции	Ключевые особенности
ТЭС	1000 - 6500	4	1,3	- -		Выбросы на ДВ России: 40 млн. т CO ₂ и др. вредных веществ в год.
ГЭС	1200	2	300	- +	Регулирование стока рек	Длительность строительства, затопление территории
АЭС	1400 - 7200	11	330	-		Опасность техногенных катастроф, ограниченные запасы дорогого топлива, проблемы утилизации отходов
ВЭС	1500	1,5	0,01	+		Ограниченный срок службы. Шумность.
ПЭС	~1000	0,5	250	+		Большие мощности при удаленности энергопотребителей
ВлЭС	600 - 900	1	0,005	+	Защита от волн, причалы	Преимущества по большинству параметров

Из-за низкой плотности заселения и изолированности многих районов на морском побережье России от общей энергосистемы, целесообразно использование волновых или гибридных электростанций (в комплексе с ветряными, солнечными, приливными или дизельными) небольшой мощности с аккумулярованием энергии в аккумуляторах, топливных элементах или путём электролиза с получением водорода и кислорода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Благовещенский, С. Н. Справочник по статике и динамике корабля. Динамика корабля. Том 2. / С. Н. Благовещенский, А. Н. Холодилин. – Л.: Судостроение, 1975.
2. Ван-Дайк, М. Альбом течений жидкости и газа / М. Ван-Дайк. - М.: Мир, 1986. – 184 с.
3. Введение в ТРИЗ. Основные понятия и подходы. Версия 3.0. Электронная книга, 2006. <http://www.altshuller.ru/e-books/>
4. Вершинский, Н. В. Энергия океана – М.: Наука, 1986. – 152 с.
5. Виссарионов, В. И. Использование волновой энергии : учеб. пособие. / В. И. Виссарионов, В. В. Волшаник, Л. А. Золотов и др. – М. : МЭИ, 2002. – 142 с.
6. Возобновляемая энергия в России: от возможности к реальности / Е. Дураева / Международное энергетическое агентство. – Paris: ОЭСР/МЭА, 2004. – 120 с.
7. Волновые энергетические станции в океане / В. И. Сичкарев, В. А. Акуличев. – М. : Наука, 1989. – 131 с.
8. Волновые морские энергоустановки – коммерциализация и разработки [Электронный ресурс] : Проект «Возобновляющаяся энергия». Организатор проекта А. Н. Русецкий. – Режим доступа: http://oceanpower.narod.ru/swes_rev.htm.
9. Волшаник В.В. Использование энергии ветра, океанских волн и течений / В.В. Волшаник, В.В. Зубарев, М.О. Франкфурт // Итоги науки и техники. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М. : ВИНТИ. 1983. – 100 с.
10. Герман Греф сомневается в окупаемости плавучих АЭС. – РИА Новости. – Режим доступа: <http://www.atominfo.ru/news/air1417.htm> (дата обращения 17.05.2007).
11. ДВНИГМИ [Электронный ресурс]: Сайт Дальневосточного регионального научно - исследовательского гидрометеорологического института (ФГБУ "ДВНИГМИ"). – Режим доступа: <http://www.ferhri.org/>
12. Динамические процессы береговой зоны моря / Р. Д. Косьян, И. С. Подымов, Н. В. Пыхов ; под ред. Р. Д. Косьяна [и др.]. – М. : Научный мир, 2003. – 320 с.
13. Доусон, Т. Проектирование сооружений морского шельфа. – Л. : Судостроение, 1986. – 286 с.
14. Каменских, И. В. Экологичные морские источники электроэнергии / И. В. Каменских, С. Д. Чижиумов // Дальневосточная весна 2011: материалы научно-практич. конф. с международным участием (г. Комсо-

мольск на Амуре, 7 июня 2011 г.): Редкол.: И. П. Степанова (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск на Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2011. – С. 250-256.

15. Книжников, А. Ю. Российские реалии. Всемирный фонд дикой природы требует от бизнеса поддержать возобновляемую энергетику. Независимая газета. – Режим доступа: http://www.ng.ru/energy/2010-05-31/14_realii.html (дата обращения: 31.05.2010).

16. Коробков, В. А. Преобразование энергии океана. – Л. : Судостроение, 1986. – 279 с.

17. Короткин, А. И. Присоединённые массы судна : Справочник. – Л. : Судостроение, 1986. – 312 с.

18. Корпачев, В. П. Теоретические основы водного транспорта леса. - Издательство "Академия Естествознания", 2009. <http://www.rae.ru/monographs/52>.

19. Лаппо, Д. Д. Условия автомодельности в исследованиях волнового движения жидкости [Текст] / Д. Д. Лаппо, А. М. Жуковец, С. С. Мищенко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Энергия. – 1979. – № 132. – С. 59-65.

20. Лобов, А. В. Общая классификация преобразователей энергии волн / Письма в Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2005. – № 1, – С. 42- 44.

21. Медведев предлагает заинтересовать бизнес в решении проблем климата. – eco-mir.net. – Режим доступа: <http://www.eco-mir.net/show/4873/> (дата обращения: 02.03.2010).

22. На Дальнем Востоке обсудили вопросы развития энергетики. – ИА REGNUM. – Режим доступа: <http://prim.regnum.ru/news/1383714.html> (дата обращения: 15.03.2011).

23. Общественная поддержка развития ВИЭ в России. – Всемирный фонд дикой природы (WWF). – Режим доступа: http://www.wwf.ru/about/what_we_do/greenenergy/sustainable_sources

24. ВИЭ. – РусГидро. – Режим доступа: <http://www.rushydro.ru/activity/vie>; <http://www.iea.org/media/workshops/2011/oaо/Ponkratiev.pdf>

25. Офицеров, А. С. Масштабные поправки на результаты волновых исследований, основанные на линейном затухании волн [Текст] / А. С. Офицеров // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1960. – № 8. – С. 142-147.

26. Петров, А. Обледенение судов на акваториях морей ДВ // Fish-news – Новости рыболовства, январь 2013. <http://www.fishnews.ru/rubric/krupnyim-planom/6385>.

27. Петров, Ю. П. Обеспечение достоверности и надёжности компьютерных расчётов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 160 с.

28. Пиляев, С. И. Волновые расчёты при проектировании портов : учеб. пособие / С. И. Пиляев, Н. А. Губина. – М. : МГСУ, 2010. – 96 с.
29. Полякова, А. М. Опасное и особо опасное обледенение судов в северной части Тихого океана // Океанография и состояние морской среды Дальневосточного региона России. Интегрированная база инф. Ресурсов. – Ocean Far East on-line. – Режим доступа: <http://pacificinfo.ru/climate/danger/ice>.
30. Росс, Д. Энергия волн /Д. Росс – Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. – 112 с.
31. Русецкий, А. Н. Возобновляющаяся энергия. Морские волновые и ветровые энергоустановки. Режим доступа: <http://ocean-power.narod.ru/index.html>.
32. Русецкий, А. Н. Волновые морские энергоустановки – коммерциализация и разработки. Обзор по состоянию на январь 2002 г. Режим доступа: http://ocean-power.narod.ru/swes_rev.htm.
33. СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003/ Министерство регионального развития РФ. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 39 с.
34. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82 / Министерство регионального развития РФ. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 111 с.
35. СНиП 3.07.02-87. Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения / Минстрой России. – М.: ЦИТП, 1999. – 57 с.
36. СП 32-103-97. Проектирование морских берегозащитных сооружений. – М. : Корпорация «ТрансСтрой», 1998. – 99 с.
37. Справочник по теории корабля. В 3 т. Т. 2. Статика судов. Качка судов / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л. : Судостроение, 1985. – 440 с.
38. Тоффлер, Э. Третья волна. – М. : ООО "Фирма "Издательство АСТ". – 1999. – С. 6-261.
39. Усачев И., Историк Б., Шполянский Ю., Лунаци М. Малая и нетрадиционная энергетика России. Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/22/16.php>.
40. Устюгин, Ю. Е. Волновая турбина. Режим доступа: http://turbulence.ru/project02_3.html.
41. Фролов, А. В. Новые источники энергии. – Тула: ТулГУ, 2011. – 368 с.
42. Циолковский, К. Э. Собр. соч., т. 4, М., 1964. – С. 362–364.
43. Чижиумов, С. Д. Моделирование преобразования энергии морских волн / С. Д. Чижиумов, И. В. Каменских, М. А. Синюкова, А. А. Генто-

ва // Морские интеллектуальные технологии. – Санкт-Петербург, 2014. – № 1 (23). – С. 89-94.

44. Чижиумов, С. Д. Использование энергии морских волн // Дальневосточная весна 2010: материалы международной научно-практич. конф. в области экологии и безопасности жизнедеятельности (г. Комсомольск на Амуре, 20-21 мая 2010 г.): Редкол.: И.П. Степанова (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск на Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. – С. 33-37.

45. Чижиумов, С. Д. Основы динамики судов на волнении : учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. – 110 с.

46. Чижиумов, С. Д. Преобразование энергии морских волн / С. Д. Чижиумов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. – 2010. – №3. – С. 16-24.

47. Чижиумов, С. Д. Есть ли в России перспективы использования возобновляемой энергии? / С. Д. Чижиумов, И. В. Каменских // Дальневосточная весна 2011: материалы научно-практич. конф. с международным участием (г. Комсомольск на Амуре, 7 июня 2011 г.): Редкол.: И.П. Степанова (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск на Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2011. – С. 168-172.

48. Чижиумов, С. Д. Модели преобразователя энергии волн OWSC / С. Д. Чижиумов, И. В. Каменских // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. – 2013. – № II-1(14). – С. 93-104.

49. Чижиумов, С. Д., Возможность использования энергии морских волн на дальневосточном побережье / С. Д. Чижиумов, И. В. Каменских, О. В. Трубецкая // Мореходство и морские науки-2011: избранные доклады Второй Сахалинской региональной морской научно-технической конференции (15-16 февраля 2011 г.). Южно-Сахалинск: СахГУ, 2011. – С. С. 132-141.

50. Чугаев, Р. Р. Гидравлика. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 672 с.

51. Шадрин, И. Ф. Течения береговой зоны бесприливного моря. – М.: Наука, 1972. – 128 с.

52. Ярошинская, А. Плавающие АЭС или «плавающие Чернобыли»? СПб.: ИА «Росбалт». – Режим доступа: <http://www.rosbalt.ru/2007/05/22/296877.html>

53. A Scenario Analysis of Northwest Electrical System toward Determining the Level of Wave Power that Can be Integrated By 2019 In Oregon / Khan J. / OWET UMI Project / Powertech Labs Inc, 2009. – 59 p.

54. Babarit, Duclos G., Clément A. H. Comparison of Latching Control Strategies for a heaving wave energy Device in random sea. Proceedings of the fifth European Wave Energy Conference, Cork, 2003, pp. 245-257.

55. BØLGEKRAFT - Fremtidens energikilde. Режим доступа: <http://www.waveenergy.dk/>
56. Budal K., Falnes J. Interacting point absorbers with controlled motion. Power from Sea Waves (B. Count, ed.), pp. 381-399, Academic Press, London, 1980.
57. Koutitas C. G., Savvidis Y. G. Modelling of a Wave Energy Harnessing Breakwater // Proceedings of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference Vancouver, BC, Canada, July 6-11. 2008. pp. 327-330.
58. Chizhiumov S. D., Kamenskih I. V. The Models of Sea Waves Energy Converters // The Tenth ISOPE Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS 2012), Vladivostok, Russia, October 3-5, 2012. pp. 16-21.
59. Clement, A. Modeling and Standardized Design Methods / WaveNet: Results from the work of the European Thematic Network on Wave Energy. – European Community, 2003, pp. 106-128. http://www.offshorecenter.dk/log/bibliotek/23WaveNet_Full_Report.pdf
60. Drew B., Plummer A. R., Sahinkaya M. N. A review of wave energy converter technology / Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 223 Part A: Journal of Power and Energy, June, 2009, pp. 887 – 902.
61. Energy harvesting : solar, wind, and ocean energy conversion systems / A. Khaligh, O. C. Onar. - CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, 2010. – 368 p.
62. European Marine Energy Centre (EMEC) / Wave Devices / <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices>
63. EurOtop, 2007. 'EurOtop. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual', Environment Agency, UK/ENW Expertise Network Waterkeren, NL/KFKI Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, DE, Pullen T., Allsop N.W.H., Bruce T., Kortenhaus A., Schüttrumpf H. and van der Meer J. W. <http://www.overtopping-manual.com>
64. Falcao A. F. de O. Wave energy utilization: A review of the technologies / Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, № 14, pp. 899–918.
65. Falnes J, Budal K. Wave power conversion by point absorbers. Norwegian Maritime Res 1978; 6(4): pp. 2-11.
66. Falnes J. A review of wave-energy extraction / Marine Structures, № 20, 2007. pp. 185–201.
67. Fanchi J. R. Energy in the 21st century. - World Scientific, Singapore, 2011. – 360 p.
68. Folley M. Near or far - siting wave energy converters / International Water Power & Dam Construction Magazine. – 27 October 2010 . – Режим доступа: <http://www.waterpowermagazine.com/features/featurenear-or-far-siting-wave-energy-converters>

69. French M. J. Conceptual design for engineers. London: Design Council, 1975. – 226 p.
70. Hagerman G. Wave power / Encyclopedia of Energy Technology and the Environment (eds A. Bisio & S.G. Boots). – John Wiley & Sons Inc, pp. 2859-2907.
71. Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy / Edited by F. Kreith and D.Y. Goswami. – CRC Press, Taylor & Francis Group, London, New York, 2007. – 1568 p.
72. Handbook of Renewable Energy Technology / Edited by A. F. Zobaa and R. C. Bansai. - World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 2011. – 851 p.
73. Hirt C. W.; Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries / Journal of Computational Physics 39 (1), 1981, pp. 201–225.
74. Horton R. E. Weir experiments, coefficients, and formulas. – Washington: Government printing office, 1907. – 235 p.
75. Kobayashi N., Wuriyanto A. Wave Overtopping on Coastal Structures // Journal of Waterway, Port, Coastal Ocean Engineering, ASCE, 1989. Vol 115. pp. 235-251.
76. Liu Z., Hyun B. S., Hong K. Practical Calculation of Parabolic Overtopping Wave Energy Converter / Proceedings of the Eighth (2008) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. – Bangkok, 2008. pp. 36-42.
77. McGrath J. Could Salter's Duck have solved the oil crisis? Режим доступа: <http://science.howstuffworks.com/salters-duck1.htm>
78. Minikin R. R. Wind, Waves and Marine Structures. Griffin, London, 1963. – 341 p.
79. Mokrani C., Abadie S., Grilli S., Zibouche K. Numerical Simulation of the Impact of a Plunging Breaker on a Vertical Structure and Subsequent Overtopping Event Using a Navier-Stokes VOF model / Proceedings of the Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference. - Beijing, China, 2010. pp. 729-736.
80. Morris H. M. Applied Hydraulics in Engineering. Ronald Press, New York, 1963. – 412 p.
81. New Developments in Renewable Energy / Edited by Hasan Arman and Ibrahim Yuksel. – InTech, Croatia, 2013. – 407 p.
82. Nichols B.D., Hirt C.W. Methods for Calculating Multi-Dimensional, Transient Free Surface Flows Past Bodies / Proc. First Intern. Conf. Num. Ship Hydrodynamics, Gaithersburg, ML, Oct. 20-23, 1975. pp. 133-145.
83. Novak P., Moffat A. I. B., Nalluri C. and Narayanan R. Hydraulic structures. Spon Press, London and New York, 2001. – 666 p.

84. Price A. A. E. New Perspectives on Wave Energy Converter Control / A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. – The University of Edinburgh, 2009. – 318 p.
85. Renewable Energies / Edited by Jean-Claude Sabonnadière. - ISTE Ltd, London, John Wiley & Sons, Inc. USA, 2009. – 477 p.
86. Renewable Energy / Edited by T. J. Hammons. – In-Tech, Croatia, www.intechweb.org, 2009. – 580 p.
87. Renewable Energy Focus Handbook. Elsevier, USA, 2009. – 519 p.
88. Salter S. H., Taylor J. R. M., Caldwell N. J. Power conversion mechanisms for wave energy / Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2002, vol. 216, pp. 1-27.
89. Stormsurf (Buoys and Buoy Forecasts) [Электронный ресурс] : For delivering the highest quality marine weather data to those who ride waves. – Режим доступа: <http://www.stormsurf.com/locals/npac.shtml>
90. Tjugen K. J. TAPCHAN ocean energy project // Proc. European Wave Energy Symp., Edinburgh, UK, July 1993. 265–276, European Commission EUR 15571.
91. Tushar K. Ghosh, Mark A. Prelas Energy Resources and Systems. Volume 2: Renewable Resources / Springer, Dordrecht Heidelberg London New York, 2011. – 727 p.
92. Victor L., Troch P. Experimental Study on the Overtopping Behaviour of Steep Slopes – Transition Between Mild Slopes and Vertical Walls / Coastal Engineering Proc., 2012 (№ 33). <http://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/download/6967/pdf>
93. Wave energy conversion. John Brooke / Elsevier Ocean Engineering Series, vol. 6, Edited by R. Bhattacharyya and M. E. McCormick. – Elsevier, 2003. – 187 p.
94. Welcome to Wave Plane. Режим доступа: <http://www.waveplane.com/>
95. Whittaker T., Folley M. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster / Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2011. pp 345-364.
96. Whittaker T. J. T., Folley M. Optimisation of wave power devices towards economic wave power systems // World Renewable Energy Congress, Aberdeen, UK, 2005. pp. 927-932.

Научное издание

Чижиумов Сергей Демидович
Козин Виктор Михайлович
Каменских Ираида Витальевна
Синюкова Марина Александровна
Гентова Анна Александровна

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН

Монография

Отпечатано с оригинал-макета, представленного авторами

Подписано в печать 6.11.2014
Формат 60 × 84 1/16. Бумага 65 г/м². Ризограф EZ570E.
Усл. печ. л. 10,81. Уч.-изд. л. 10,23. Тираж 500 экз. Заказ .

Редакционно-издательский отдел
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Полиграфическая лаборатория
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.