

**УДК: 621.311.25**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени**

**В.И. Вернадского»**

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**На правах рукописи**

**МУРТАЗАЕВ ЭННАН РУСТАМОВИЧ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА МОРСКИХ ВОЛН И  
ЭНЕРГОАГРЕГАТА ДЛЯ ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:

Бекиров Эскендер Алимович

доктор технических наук, профессор,

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И РАБОТЫ ЭНЕРГОАГРЕГАТОВ .....</b>	<b>12</b>
1.1 Развитие энергетического потенциала.....	12
1.2 Теоретический анализ использования энергии волн Черного и Азовского морей.....	20
1.3 Теоретический анализ существующих энергоагрегатов и волновых электростанций.....	24
1.3.1 Волновая электростанция конвертерного типа «Pelamis».....	28
1.3.2 «Утки» Солтера .....	29
1.3.3 Устройства поплавкового типа, имеющие поршневую систему .....	30
1.3.4 Сооружения, работающие по принципу колеблющегося водяного столба в зоне прибоя.....	31
1.3.5 Электростанции, водохранилища которых наполняются за счет перекачки морской воды под действием энергии волнения .....	32
1.3.6 ВлЭС, работающие от кинетической энергии волны в зоне прибоя..	33
1.3.7 Устройство поплавкового типа, приводящее в движение линейный генератор .....	34
1.3.8 Осцилляционная водяная колонна .....	34
1.3.9 Волновая электростанция: плот Коккереля.....	36
1.4 Анализ моделей и устройств.....	37
1.5 Оценка ресурсов волновой энергии Черного моря.....	47
1.6 Характеристики морских волн у побережья Крыма .....	57
1.7 Выводы по главе.....	59

1.8 Цель и задачи исследования.....	60
<b>ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКИХ ВОЛН .....</b>	<b>61</b>
2.1 Энергия морских волн .....	61
2.2 Характеристика и основные параметры морских волн.....	61
2.2.1 Модуляция волн .....	70
2.2.2 Расчет кинетической энергии трохоидаальной волны по фазовой скорости.....	78
2.2.3 Характеристика и показатели волн Черного и Азовского морей .....	82
2.3 Выводы по главе.....	92
<b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ ВОЛНЫ.....</b>	<b>94</b>
3.1 Разработка схемы и структуры устройства для измерения параметров морской волны.....	94
3.2 Разработка алгоритма работы .....	106
3.3 Выводы по главе.....	115
<b>Глава 4. РАЗРАБОКА ЭНЕРГОАГРЕГАТА ДЛЯ ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.....</b>	<b>116</b>
4.1 Принцип работы и составные части волновой электростанции .....	116
4.2 Изготовление действующей модели устройства .....	117
4.3 Экспериментальные исследования работы преобразователя энергии волн в электрическую энергию.....	120
4.4 Экспериментальные исследования энергоагрегата .....	123
4.5 Надежность систем электроснабжения энергоагрегатов ВлЭС.....	127
4.6 Выбор контроллера заряда .....	133

4.7 Расчет и выбор аккумуляторных батарей.....	133
4.8 Расчет и выбор инвертора тока.....	135
4.9 Экономическое обоснование .....	137
4.9.1 Исходные данные .....	137
4.9.2 Расчет стоимости инвестиционного проекта .....	137
4.9.3 Расчет издержек на обслуживание и ремонт оборудования .....	138
4.9.4 Расчет дохода от продажи электроэнергии за год .....	139
4.9.5 Составление финансового плана .....	139
4.10 Выводы по главе.....	141
<b>Заключение.....</b>	<b>143</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>145</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>146</b>
<b>Приложения.....</b>	<b>157</b>
Приложение А – Акт внедрения результатов .....	157
Приложение Б – СО ФГБУ "Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова" .....	158

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Электроснабжение предприятий, занимающихся сельским хозяйством, имеет целый ряд особенностей, среди которых можно выделить рассредоточенность небольших по потребляемой мощности потребителей на большой территории, удаленной от системы централизованного электроснабжения. Трудности электроснабжения таких потребителей, расположенных на берегу морей и океанов, связаны, в основном, со значительной удаленностью генерирующих установок и, соответственно, наличием больших потерь в процессе передачи электроэнергии. Экологические аспекты не позволяют строить крупные электростанции в прибрежном районе, зачастую, из-за того, что он является курортным регионом. Следует отметить, что среди приоритетов государственной энергетической политики Российской Федерации значится переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике.

Выходом из данной ситуации может быть использование возобновляемых источников энергии, таких как, преобразователи энергии волн в электрическую энергию.

Разработка и исследование энергоагрегатов, преобразующих энергию морской волны в электрическую энергию, зависит от точных и достоверных знаний о величине и характере нагрузок, от высоты и силы волн в предполагаемом месте их установки, что важно для Республики Крым, берега которой омывают Черное и Азовское моря.

**Объект исследования.** Объектом исследования является генерация электрической энергии преобразователем энергии волн.

**Предмет исследования.** Принципы функционирования преобразователя энергии волн, используемого для питания прибрежных объектов сельскохозяйственного назначения и другой инфраструктуры.

**Степень разработанности темы исследований.** Общей теоретической базой могут служить работы иностранных и отечественных ученых в областях

возобновляемой энергетики, гидравлики и теории проектирования гидроэнергетических агрегатов. Исследовательские работы отечественных и зарубежных ученых по проблемам энергии морских волн освещают и обобщают развитие технологии генерации, применение устройств преобразования энергии волн. Работы, посвящённые математическому моделированию, выполнены такими исследователями, как Гусаров В.А., Доусон Т., Куркин А.А., Шулейкин В.В., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Мак-Корми М., Велькин В.И., Велькин А.Н., Овсяник В.В., Лукутин Б.В., Васильев А.Н., Харченко В.В. Работы, посвященные разработке преобразователей морских волн, выполнены Солтер С., Сичкаревым В.И., Акуличевым В.А., Okamoto Shun, Собалевым В.Ю., Городничевым Р.М. и другими исследователями.

В литературных источниках представлены различные модели для расчетов волновых нагрузок. Описанные модели во многих случаях дают значительно различающиеся результаты при одинаковых исходных данных. Это свидетельствует о недостаточной изученности вопросов, связанных с трансформацией волн и преобразованием энергии морских волн в электрическую энергию, и о целесообразности проведения дальнейших исследований в данной области. При этом вопросы разработки специализированного комплекса измерения параметров волн и преобразователей морских волн проработаны в недостаточной степени.

Таким образом, научные исследования, направленные на дальнейшую разработку современных подходов в изучении параметров волн и возможности моделирования преобразователей энергии морских волн в электрическую энергию для снабжения сельскохозяйственных объектов, удаленных на значительные расстояния от системы центрального энергоснабжения, являются актуальными и отвечающими современным требованиям экономики нашей страны.

**Цель исследования.** Электрообеспечение прибрежных районов удаленных от общей сети энергосистемы.

**Задачи данной работы.**

1. Провести теоретические исследования параметров морских волн у побережья Республики Крым для анализа эффективности преобразования их энергии в электрическую энергию.
2. Разработать устройство для измерения параметров морских волн.
3. Разработать устройство для преобразования энергии морских волн в электрическую энергию с учетом особенностей побережья Республики Крым.
4. Провести экспериментальные испытания разработанного преобразователя энергии волн в электрическую энергию.
5. Определить экономическую эффективность внедрения предлагаемого устройства.

**Связь диссертационной работы с научными программами, планами, темами.** Цель и задачи работы соответствуют программами: «Энергетическая стратегия России в период до 2035 года», «Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года», «Морская доктрина Российской Федерации».

Диссертационная работа включает в себя результаты исследований, полученных при выполнении госбюджетной научно-исследовательской работы (НИР): № АААА-А18-118112990060-6 «Разработка методов и устройств преобразования энергии морских волн в электрическую энергию» где соискатель был исполнителем.

**Научную новизну исследований составляют:**

1. Получено уравнение трохoidalной волны в параметрическом виде для математического описания морских волн и анализа их параметров.
2. Впервые разработано электронное устройство для измерения параметров морских волн, адаптированное к условиям побережья Республики Крым, и описан алгоритм его работы.

3. Впервые разработан преобразователь энергии волн в электрическую энергию поплавкового типа с учетом особенностей побережья Республики Крым и описана методика его экспериментального исследования.

4. Получена регрессионная зависимость, достоверно описывающая работу преобразователя энергии волн в электрическую энергию.

**Теоретическую и практическую значимость работы представляют:**

1. Полученное уравнение трохoidalной волны позволяет рассчитать энергию морской волны по значениям ее фазовой скорости для различных исходных данных: высоты, длины, периода и скорости волны.

2. Разработанное электронное устройство измерения параметров морских волн, которое может быть установлено как в прибрежной зоне, так и на значительном удалении от береговой полосы, позволяет определять, хранить и передавать информацию о скорости, высоте и длине волны, производить непрерывный контроль измерений.

3. Разработанный преобразователь энергии волн может быть использован для электроснабжения потребителей, расположенных вблизи побережья на территории Республики Крым.

4. Полученная регрессионная зависимость функционирования преобразователя энергии волн в электрическую энергию позволяет прогнозировать его работу при конкретных погодных условиях и параметрах самого преобразователя.

5. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.02 и 13.04.02 Электроэнергетики и электротехники в ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского».

**Методология и методы исследования.** В работе, исходя из поставленных задач и с учетом особенностей объекта, при получении основных результатов использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследований. При выполнении диссертационной работы применен

принцип наложения к волнам с различными амплитудами и существенно отличающимися частотами, распространяющимися в одном направлении. При этом профиль результирующей волны с использованием гармонического анализа представлен в виде суммы гармонических составляющих с разными частотами и различными амплитудами. Принцип суперпозиции лежит в основе спектрального метода расчета морского ветрового волнения. Волновая поверхность получается, как результат наложения большого числа ветровых волн с различными длинами и направлениями. Количественные оценки морских волн осуществляются спектральным методом с помощью энергетических соотношений.

Экспериментальные исследования выполнены на опытных образцах в лабораторных условиях. Опытные образцы изготовлены автором с использованием методик планирования и моделирования.

Результаты исследований обрабатывались с помощью программных комплексов и сравнивались с теоретическими данными.

Приведено экономическое обоснование и окупаемость разработанных энергоагрегатов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Уравнение трохoidalной волны в параметрическом виде позволяет оценить мощность, кинетическую и потенциальную энергию морской волны, разрабатывать преобразователи энергии волн в электрическую энергию.

2. Разработанное электронное устройство измерения параметров морской волны, действующее на основе представленного алгоритма, позволяет определить основные параметры волны вблизи побережья и на удалении от него.

3. Разработанный преобразователь энергии волн обеспечивает автономное электроснабжение прибрежных сельскохозяйственных объектов.

4. Полученная регрессионная зависимость позволяет достоверно описать работу преобразователя энергии волн в электрическую энергию.

5. Применение предлагаемого преобразователя энергии волн обеспечивает получение экономического эффекта за счет получения доступной энергии для труднодоступных и удаленных потребителей.

**Степень достоверности полученных результатов.** Достоверность исследований и полученные результаты подтверждены сходимостью теоретических и экспериментальных данных, положительными результатами испытаний, проведенных в лаборатории кафедры электроэнергетики и электротехники Физико-технического института Крымского Федерального Университета им. В.И. Вернадского, а также натурными испытаниями.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты исследований доложены и обсуждены на ежегодных научно-практических конференциях: Третий международный форум: «Возобновляемая энергетика: Пути повышения энергетической и экономической эффективности» - REENFOR2015, г. Ялта; Дни науки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, I научная конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых, г. Симферополь, 2015; Управление качеством электрической энергии: сборник трудов Международной научно-практической конференции. (Москва, 23-25 ноября 2016г.). – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга»», 2017; 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020; Vladivostok; Russian Federation; 6 October 2020 до 9 October 2020; Физико-Технического института Крымского Федерального Университета им. В.И. Вернадского «Электроэнергетика и возобновляемые источники энергии» 2019-2021 г. Симферополь; во Всероссийском институте механизации и электрификации сельского хозяйства (ВИМ) в 2021 г. г. Москва; в Севастопольском государственном университете (СГУ) г. Севастополь.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных результатов и выводов, списка литературы, включающего 101 источника, из них 44 на иностранном языке, и приложений. Основная часть

диссертации содержит 156 страниц машинописного текста, в том числе 55 рисунков и 16 таблиц. На заимствованные материалы и работы, выполненные в соавторстве сделаны соответствующие ссылки.

**Публикации.** Основные положения диссертации представлены в 12 научных работах, в том числе: 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 1 в международных системах цитирования (Scopus); 5 в других изданиях; 2 в патентах на изобретение и полезную модель. Объем публикаций 6,125 п.л., из которых доля авторского вклада – 4,9 п.л.

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И РАБОТЫ ЭНЕРГОАГРЕГАТОВ

## 1.1 Развитие энергетического потенциала

В последнее двадцатилетие энергетика обеспечивала рост благосостояния в мире примерно в равных долях за счет увеличения производства энергоресурсов и улучшения их использования в развитых странах. Меры по использованию возобновляемых источников энергии и по энергосбережению давали 60-65% экономического роста. В результате энергоемкость национального дохода уменьшалась за этот период в мире на 18% и в развитых странах – на 21-27%. Повышение энергетической эффективности экономики (системных мер по энергосбережению) является центральной задачей Энергетической стратегии России. Энергетическая стратегия предусматривает интенсивную реализацию организационных и технологических мер экономии топлива и энергии, то есть проведения целенаправленной энергосберегающей политики. Для этого Россия располагает большим потенциалом организационного и технологического энергосбережения. Реализация освоенных в отечественной и мировой практике организационных и технологических мер по экономии энергоресурсов способна уменьшить их расход в стране на 40-48% или на 360-430 млн. т.у.т в год. Около трети потенциала энергосбережения имеют теплоэнергетические комплексы (ТЭК), другая треть сосредоточена в остальных отраслях промышленности и в строительстве, свыше четверти – в коммунально-бытовом секторе, 6-7% – на транспорте и 3% – в сельском хозяйстве [1].

Энергоресурсосбережение является одной из самых важных задач XXI века. От результатов решения этой проблемы зависит место нашей страны в ряду развитых в экономическом отношении стран и уровень жизни граждан. Россия не только располагает всеми необходимыми природными ресурсами и интеллектуальным потенциалом для успешного решения своих энергетических проблем, но и объективно является ресурсной базой для европейских и

азиатских государств, экспортируя нефтепродукты и природный газ в объемах, стратегически значимых для стран-импортеров. Однако избыточность топливно-энергетических ресурсов в нашей стране совершенно не должна предусматривать энергорасточительность, так как только энергоэффективное хозяйство при открытой рыночной экономике является важнейшим фактором конкурентоспособности. Перед обществом поставлена очень амбициозная задача добиться удвоения валового внутреннего продукта (ВВП) за 10 лет, но решить эту задачу, не изменив радикально отношение к энергоэффективности возобновляемых источников энергии, разработке и использованию новых энергоагрегатов возобновляемой энергетики, энергоресурсосбережению, не снизив энергоемкость производства, невозможно. Перечисленные выше факторы должны быть отнесены к стратегическим задачам государства, являясь одновременно и основным методом обеспечения энергетической безопасности, и единственным реальным способом сохранения высоких доходов от экспорта углеводородного сырья.

Требуемые для внутреннего развития энергоресурсы можно получить не только за счет увеличения добычи сырья в труднодоступных районах и строительства новых за счет энергосбережения непосредственно в центрах сбережения энергоресурсов, но и увеличением энергоэффективности, увеличением мощности энергоагрегатов возобновляемой энергетики, разработки и создания новых установок, использующих энергию солнца, ветра, моря и других источников возобновляемой энергетики.

Решение задач повышения энергоэффективности на сегодняшнем этапе, когда существует большой резерв малозатратных мероприятий, не требующих логистики перемещения углеводородного сырья, обеспечивающих экологическую безопасность, также совпадает с большинством стратегических целей государства. Основная роль в увеличении эффективности использования энергии принадлежит современным энергосберегающим технологиям.

Благодаря реализации мероприятий федеральной целевой программы «Развитие Крыма и Севастополя до 2020 года» проблемы электроснабжения к настоящему времени в целом решены – строительство и запуск энергетического моста, строительство новых и модернизация существующих объектов энергетической инфраструктуры. Однако географическое положение в сочетании с уникальными природными условиями делают Крым идеальным полигоном для того, чтобы успешно развивать генерацию электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), поэтому оценка потенциальных возможностей местных ВИЭ с учетом курортно-рекреационной специфики региона является актуальной задачей.

Энергетические мощности объектов возобновляемой энергетики к настоящему времени обеспечивают примерно 7% потребностей Крыма в электроэнергии, преимущественно за счет солнечных и ветровых станций [2]. Генерация энергии на базе ВИЭ в силу вероятностного характера работы не может быть гарантированной (выполнение диспетчерского графика нагрузки) и требует резервирования. Большая материалоемкость, высокая стоимость конструкционных материалов делают ее заметно дороже традиционной, поэтому строительство объектов ВИЭ в промышленных масштабах маловероятно. Вместе с тем, в долгосрочной перспективе использование объектов ВИЭ в Крыму имеет высокие потенциальные шансы на развитие.

Строительство солнечных электростанций экономически рентабельно только в том случае, если число часов солнечного сияния не ниже 2000 в год, а интенсивность поступления солнечного света составляет 600-800 Вт/м<sup>2</sup> [2]. Природно-климатические характеристики большей части полуострова соответствуют этим требованиям. Среднегодовое количество суммарной солнечной радиации в регионе оценивается в 1400 кВт·год/м<sup>2</sup> [2]. Это позволяет разработать перспективные программы по развитию и широкому внедрению гелиоустановок.

Территория Крыма имеет множество перспективных для ветроэнергетики зон, многие из них сосредоточены в северо- западной части. Сильно развита в Крыму и солнечная энергетика, в частности, солнечные электростанции в Охотниково и Перово имеют установленную мощность 82 и 100 МВт. По мнению специалистов, это не предел, и в скором времени мощность может быть увеличена еще. В Симферопольском районе Крыма в 2010 году появилась первая солнечная электростанция (СЭС) в селе Родниковое, ее мощность равна 7,5 МВт. Таким образом, в течение трех лет было построено четыре СЭС: «Родниковое» (мощность 7,5 МВт) и «Перово» (мощность 105,56 МВт) в Симферопольском районе, «Митяево» (мощность 31,55 МВт) и «Охотниково» (мощность 82,65 МВт). Суммарная установленная электрическая мощность действующих электростанций, работающих от энергии солнца, сейчас составляет 227,3 МВт [2].

Во время перебоев с энергоснабжением в 2014 году работоспособность системы энергоснабжения Крыма поддерживалась во многом благодаря солнечным электростанциям. СЭС вырабатывали до 200 МВт энергии, и в результате удалось полностью обеспечить минимальные потребности в электроэнергии потребителей в дневное время [2].

Себестоимость электроэнергии, производимой на ветроэлектростанциях (ВЭС), напрямую зависит от скорости ветра: 7,16 м/с – 4,8 центов за кВт·ч; 8,08 м/с - 3,6 цента за кВт·ч; 9,32 м/с - 2,6 цента за кВт·ч [2].

Ветроэнергетика на полуострове представлена 7 станциями: Донузлавская ВЭС (10,4 МВт), Судакская ВЭС (6,3 МВт), Сакская ВЭС (19 МВт), Пресноводненская ВЭС (6 МВт), Тарханкутская ВЭС (15,5 МВт), Восточно-Крымская ВЭС (5 МВт) и ВЭС Останинская (25 МВт) [2].

Дополнительным преимуществом крымского региона является то, что география распределения ветроэнергетических ресурсов дает возможность максимально рационально их использовать путем сочетания эксплуатации как

автономных ветроэлектростанций (ВЭУ), так и крупных ВЭС в составе местных энергетических систем [2].

Что касается гидроэнергетического потенциала, то крымские реки имеют малые расходы воды. Это существенно затрудняет эксплуатацию гидроэлектростанций, но есть возможности для установки микро-ГЭС (МГЭС), турбины которых способны работать при расходах воды от 20 м<sup>3</sup>/с. Строительство таких объектов ВИЭ в перспективе даст возможность обеспечивать электроэнергией населенные пункты, находящиеся в труднодоступной местности, отдельно стоящие дома, кордоны в лесхозах и заповедниках, туристические объекты, которые, как правило, лишены инфраструктуры централизованного энергоснабжения или нуждаются в дополнительных резервных мощностях [2].

Наиболее перспективным направлением развития малой гидроэнергетики в Крыму является строительство мини-гидроэлектростанций на существующих гидроузлах. Высоконапорные электростанции, со средней мощностью 20 – 50 кВт, могут быть спроектированы на водотоках, берущих свое начало на гребнях гор на высоте около 1000 м над уровнем моря и спускающихся вниз к южному побережью в районе Алушки, Ялты Алушты, Судака, Феодосии. Станции средней мощности 100 - 1000 кВт могут быть сооружены на площадках 22 существующих водохранилищ равнинной части и северного склона горной гряды. Высоконапорные станции мощностью 50 – 100 кВт могут быть сооружены на напорных трубопроводах систем водоснабжения и канализации. Необходимо отметить, что реализация планов сооружения мини-гидроэлектростанций возможна только после оценки экологических рисков и проведения экспертизы проектов. Основные проблемы ВИЭ в Крыму, дающие повод для сдержанных высказываний в вопросах развития отрасли заключаются в следующем [2].

Стоимость энергии от объектов ВИЭ дороже традиционных, поэтому их массовое строительство маловероятно. Также наблюдается отсутствие

необходимых мощностей линий электропередач и подстанций, принимающих генерируемые мощности объектов ВИЭ. «Зеленая» энергетика нуждается в резервных базовых мощностях: традиционная энергогенерация должна подстраховывать ветростанции, солнечные электростанции и объекты малой гидроэнергетики, которые из-за сезонных природных и погодных ограничений не всегда могут работать на полную мощность. В результате требуются новые подходы к организации и управлению сетями. Если в Европе для этого успешно применяют технологии «smart-grid» (умные сети) и их аналоги, то в России схожие направления - удел исследовательских центров и научных учреждений, эти технологии не имеют практики применения, отсутствуют меры государственной поддержки и регулирования в этой сфере [2].

Россия обладает огромными ресурсами ВИЭ, при этом имея слабо развитую долю в производстве энергии с помощью этих источников. Волновая энергия превосходит по мощности ветровую и солнечную, достигая КПД 85%.

Одним из возможных способов получения электрической энергии является использование преобразователей энергии морских волн. Предварительно необходимо осуществлять анализ энергетического потенциала в зоне расположения электростанции. При этом следует учитывать, что есть дни, когда на море наблюдается практически штиль, а в определенное время года возможны шторма. Оценка энергетических характеристик может осуществляться и по расчетным, и по экспериментальным данным.

Существует множество разработок волновых преобразователей, часть которых реализованы в той или иной мере. Наиболее распространенные: поплавковая гидроэлектроустановка, плот Коккереля, качающаяся «утка» Солтера, осциллирующий водяной столб, энергия воздушного потока.

На настоящий момент существуют различные методы и устройства для преобразования энергии морских волн [3 – 11]. Одним из таких методов является использование поплавков, то есть элементов, совершающих колебательные движения в вертикальном или горизонтальном направлении в

зависимости от конструкции. За счет изменения положения рабочего тела происходит вращение вала генератора. Различают конструкции, когда поплавки применяются в виде «уток» Солтера, волнового плота Коккереля (отдельные сегменты соединяются шарнирно и извиваются под действием морских волн).

Еще одним методом является использование пневматических камер. В этом случае вода под воздействием колебаний волн поступает в камеры с воздухом, где создается избыточное давление. Воздух при вытеснении вращает турбину. Существует разновидность устройств, когда для генерации электроэнергии используется движение воды, перемещающейся внутри камеры. Часто применяются турбины Уэллса, особенностью которых является вращение лопастей в одном направлении вне зависимости от направления набегающего воздушного потока. Такой метод получения электроэнергии характерен для электростанций с осциллирующим водяным столбом [12] и пульсирующим водяным столбом Массуды. В различных исследованиях предлагаются свои варианты размещения [13] и конструкции [14] турбин Уэллса для увеличения эффективности их работы [15].

Еще один метод предполагает установку наклонной поверхности для наката волн и накопительного бассейна, при попадании в который вода раскручивает лопасти турбины.

Перед тем, как размещать те или иные устройства преобразования энергии морских волн, необходимо провести оценку технического потенциала и экономической целесообразности сооружения [16-19]. При оценивании учитывается высота волн, расстояние до энергосистемы, характеристика зоны размещения и т.д. При этом используются как реальные данные, так и аппроксимации численной волновой модели [20]. Волновые электростанции должны обеспечивать генерацию электроэнергии с критериями качества, не выходящими за допустимые пределы [21].

Однако до настоящего времени устройства, создаваемые на базе известных технических решений, не позволяли достаточно адекватно решить

задачу устойчивого преобразования волновой энергии. Эти устройства предназначены для работы в условиях регулярного волнения, так как эффективность их действия не может быть высокой в силу довольно сложного вероятностного характера реального процесса волнообразования.

Если государство будет гарантировать повышенный тариф на электроэнергию инвесторам в инфраструктуру и объекты ВИЭ, то это привлекало бы иностранных инвесторов в Крым, однако для развития ВИЭ в Крыму нужны поправки в закон об электроэнергетике, вводящие «зеленый» тариф.

Вместе с тем, «зеленая» энергетика Крыма должна учитывать значительные возможности для использования возобновляемых источников энергии. Это предполагает стимулирование производства энергии на основе ВИЭ и поддержку производителей необходимого оборудования. Такое направление развития не противоречит, а только укрепляет современные позиции полуострова в энергетике, обеспечивает энергетическую безопасность и перспективы дальнейшего социально-экономического развития.

В долгосрочной перспективе использование объектов ВИЭ в Крыму имеет высокий потенциал, и в этой связи, возобновляемая энергетика может занять достойное место в энергобалансе Крыма. Такие объекты будут особо целесообразны в курортной зоне полуострова, ввиду их экологической безопасности. Дальнейшее наращивание использования потенциала возобновляемых источников энергии представляется уместным и с учетом курортно-рекреационной специфики Крыма [2].

Развитию потенциальных возможностей широкого использования возобновляемых источников энергии в Крымском регионе могут способствовать следующие факторы:

1. По объему генерации электроэнергии, вырабатываемой ВИЭ, полуостров уверенно занимает первое место среди всех регионов России. Две

солнечные электростанции (в Охотниково и Перово) входят в десятку крупнейших солнечных электростанций мира [2].

2. Энергию возобновляемых источников можно использовать для удовлетворения энергетических нужд объектов сельского хозяйства, туристической, рекреационной, коммунальной, санаторно-курортной сферы [2].

3. На территории полуострова благоприятные природно-климатические условия для функционирования объектов ВИЭ, использующих энергию ветра, солнца, морских волн. Благодаря этому появляется возможность создания научно-производственного территориального кластера в сфере изучения новых технологий возобновляемой (альтернативной) энергетики [2].

Полуостров имеет все предпосылки к тому, чтобы полностью перейти на самообеспечение чистой энергией.

Республику Крым омывают Черное и Азовское моря. Поэтому потенциала волновой энергетики достаточно для обеспечения прибрежных и сельскохозяйственных объектов электроэнергией.

По потребности волновые электростанции (ВлЭС) можно разделить на одномодульные и многомодульные. Одномодульные ВлЭС используются для обеспечения электроэнергией морских судов, сигнальных маяков, устройств мониторинга окружающей среды, метеостанций, станций связи, средств личного жизнеобеспечения и др. Многомодульные устройства ВлЭС могут использоваться для обеспечения электроэнергией прибрежных и островных поселений и отдельных зданий; для энергоснабжения объектов сельскохозяйственного назначения морского и прибрежного расположения.

## 1.2 Теоретический анализ использования энергии волн Черного и Азовского морей

Черное море – внутреннее, приливы и отливы настолько малы, что почти незаметны. Величина приливо-отливных колебаний уровня на Черном море –

от 3 до 10 см. В открытом море зимние волны достигают высоты 6 – 7 м. Черноморские ударные волны достигают метровой высоты.

Колебания уровня для Черного моря больше всего встречаются сгонно-нагонные, их образование зависит от определенных атмосферных процессов в пределах естественного синоптического периода, их продолжительность составляет от 4 до 8 суток. Большое влияние оказывает скорость ветра и длина разгона в море, преобладают обычно волны высотой до 3 м. В более открытых акваториях максимальные высоты волн могут превышать 10 м, а, во время сильных штормов, это значение не является пределом. Усредненное значение колебания волн для Черного моря составляет 0,8 м. Теория возникновения волнового течения была разработана академиком В.В. Шулейкиным [22]. Сила удара черноморской волны может достигать 5 – 6 тонн на 1 м<sup>2</sup>. На уровень моря большое влияние оказывают сезонные колебания. В мае-июле наблюдается высокий подъем уровня морских вод, в октябре-ноябре – снижения уровня. Уровень между зимним и летним положением моря составляет 40 см.

Одной из актуальных задач современной гидроэнергетики является использование энергии морских волн с целью преобразования энергии волны в электрическую энергию. Для решения этой задачи необходимо иметь технические параметры волны. Так как волны не являются систематическими и изменяющимися по заранее заданным величинам, необходимо проанализировать возмущающие воздействия, создающие волны. Волны бывают продольными и поперечными. В продольных волнах частицы воды колеблются вдоль направления распределения волны. Перпендикулярные колебания частиц воды к направлению распространения волны создают поперечные волны. Волновые движения, включают продольные и поперечные колебания, возникающие на поверхности воды, гравитационные движения по окружности, убывающие с глубиной.

Для определения переноса энергии волной, который характеризуется вектором Пойтинга или вектором плотности потока энергии, необходимо знать величины длины и скорости волны.

Течение в Черном море у берегов Крыма преимущественно против направления часовой стрелки. Течения слабы, их скорость редко превышает 0,5 м/с. Основная струя течений имеет ширину 40 – 60 км и проходит на расстоянии 3 – 7 км от берега (рисунок 1.1). В бухтах образуются отдельные круговороты, направленные по часовой стрелке, их скорость достигает 0,5 м/с. Наибольшие высоты волн в Черном море – 14 м, длина таких волн составляет 200 м [23].

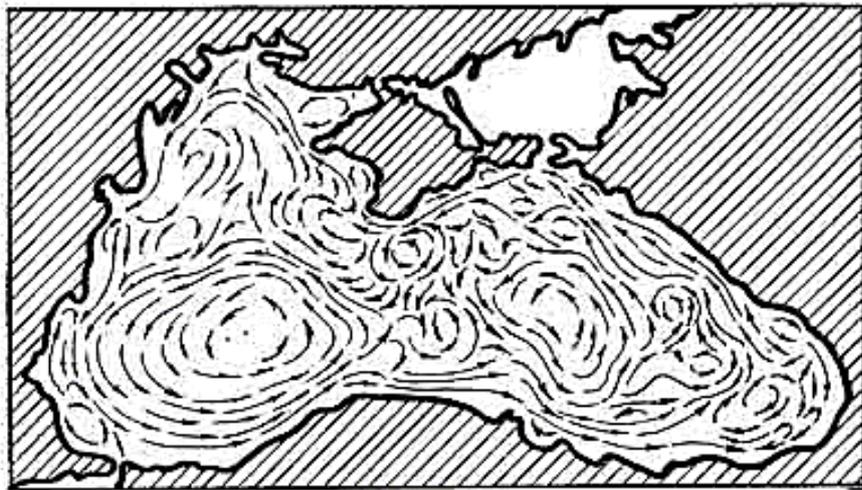


Рисунок 1.1 – Течения Черного моря [23]

Расстояние между гребнями черноморских волн – 20 – 40 м. Океанские волны раз в десять длиннее. Черноморские ударные волны (в результате землетрясений) достигают метровой высоты, а средняя скорость их – 120 – 160 км/час. В открытом море зимние волны достигают высоты 6 – 7 метров. Величина приливо-отливных колебаний уровня на Черном море – от 3 до 10 см.

Течения в Азовском море в основном зависят от ветра (рисунок 1.2). Большая изменчивость течений – следствие неустойчивости ветрового режима, мелководности моря и его сравнительно небольшой площади. Если скорость

ветра в южной части Азовского моря больше, чем в северной, то в северной части моря наблюдается циркуляция вод по часовой стрелке. При умеренном ветре, дующем с одинаковой скоростью над всем морем, в Таганрогском заливе наблюдается нагон воды. В северной части моря в это время, из-за большой разности в уровнях между Таганрогским заливом и западной частью моря, происходит ослабление ветрового течения и изменение его направления на противоположное. В центральной части моря отмечается циркуляция вод против часовой стрелки. В Керченском проливе течение обычно направлено из Азовского моря в Черное. Преобладающая скорость течений в Азовском море от 0,23 км/ч до 3,2 км/ч в Керченском проливе [24, 25].

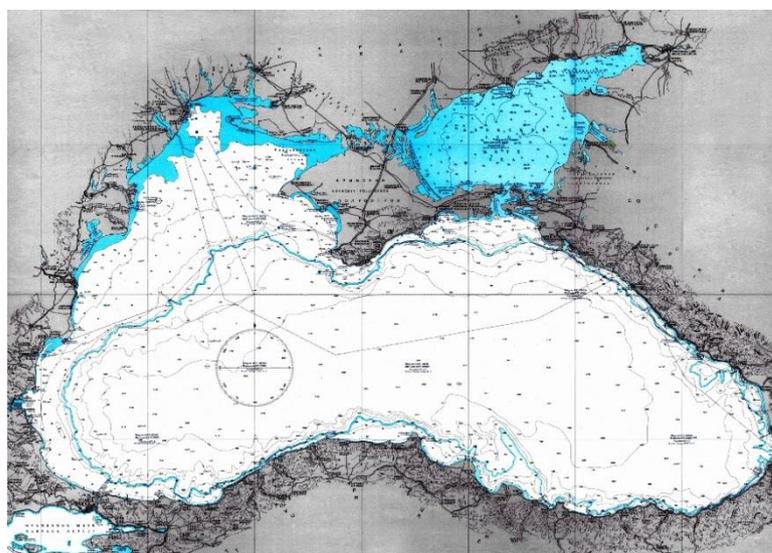


Рисунок 1.2 – Поверхностные течения Черного моря [25]

Режим волнения Азовского моря обусловлен небольшой площадью моря, малыми глубинами и значительной изрезанностью берегов. Преобладают высоты волн менее 1 м (повторяемость их достигает 75%). Повторяемость высот волн 1 – 2 м составляет 20 – 45%, а высот волн 2 – 3 м – не более 13% [24].

Наибольшая глубина Азовского моря 15 м, преобладающей является глубина до 7,5 м. В центральной, самой глубоководной части моря, высоты

волн не превышают 3,5 м. В Азовском море наблюдаются волны, имеющие длину в основном 15 – 25 м, и только иногда 80 м. Период волны обычно от 5 секунд до 8 секунд. Ветровое волнение в Азовском море развивается быстро. Через 4 – 6 часов после усиления ветра оно достигает наибольшего развития в зависимости от скорости ветра: при скорости ветра 5 – 10 м/с [24], высота волн от 0,25 до 0,5 м; при скорости ветра 10 – 15 м/с высота волн от 0,75 до 1,25 м; при скорости ветра 15 – 20 м/с высота волн от 1,25 до 2 м. Ветровые волны имеют малую длину и значительную крутизну.

### 1.3 Теоретический анализ существующих энергоагрегатов и волновых электростанций

Две трети планеты занимают моря и океаны, запасы энергии в Мировом океане колоссальны. Тепловая энергия, соответствующая нагреву поверхностных вод, имеет величину порядка  $10^{26}$  Дж. Кинетическая энергия океанских течений оценивается величиной порядка  $10^{18}$  Дж. Основная доля энергии, поступающей в Мировой океан, это результат поглощения солнечной энергии. Энергия мирового океана определяется также гравитационным воздействием планет и спутника Земли, создающим приливы, а также поступлением энергии из глубины планеты. За счет движения воздушных и водных масс запасенная океаном энергия переносится по всей планете.

Примерно две трети суммарного солнечного излучения испытывают в океане и на поверхности суши различные изменения: до 43% преобразуются в тепло и на испарения, образование осадков; до 23% передача энергии ветрам, волнам, различным видам течений, что в океане имеет небольшое значение. Даже при малом проценте передачи энергии ветрам, волнам и течениям, кинетическая энергия составляет внушительную цифру, равную  $2 \cdot 10^{12}$  Дж. С этой величиной соизмерим суммарный поток энергии, поступающей из недр Земли и в виде приливной энергии. Выделить, какой из потоков имеет непосредственное отношение только к океану, задача достаточно трудная. Для энергетики важны не абсолютные величины мощностей различных источников,

а лишь та часть, которую можно преобразовать в различные виды энергии, необходимые для хозяйственной деятельности.

В механическую и электрическую энергию можно преобразовать только часть мощности волны. Для воды коэффициент преобразования выше, чем для воздуха – до 85% [26, 27, 28, 29].

Существуют множество разработок волновых преобразователей, часть из которых реализованы в той или иной мере. Наиболее распространенные: поплавковая гидроэлектрическая установка (ГЭУ), плот Коккереля, качающаяся «утка» Солтера, осциллирующая водяная колона, пульсирующий водяной столб Массуды. На лучших установках в оптимальном режиме КПД отбора волновой энергии довольно высок (около 70 – 95%) [4, 5].

Крупные волновые станции могут быть использованы для волнозащиты морских буровых платформ и хозяйств, расположенных на побережье. В мире около 400 маяков и навигационных буйев получают питание от волновых установок. В Индии от волновой энергии работает плавучий маяк порта Мадра.

Создание волновых электростанций определяется оптимальным выбором с устойчивым запасом волновой энергии, эффективной конструкцией станции, в которую встроены устройства сглаживания неравномерного режима волнения. Считается, что эффективно волновые станции могут работать при использовании мощности около 80 кВт/м. Накопленный мировой опыт показывает, что удельные капиталовложения в строительство волновой электростанции достигают 5000 \$ на 1 кВт, и вырабатываемая ими энергия пока в 2 – 3 раза дороже традиционной, но в будущем ожидается значительное снижение ее стоимости [30].

Сотрудниками океанографического института Скриппса (США) выполнена оценка суммарных и допустимых для переработки мощностей различных океанических источников энергии [30].

Идеи использования энергии волн предпринималась еще до двадцатого века и попытки строительства морских электростанций рассматривалась в 1890

– 1900 годах. Применение энергии морских волн связано с нефтяным кризисом в 1970 г. В 1985 году в Норвегии появились две волновых электростанции, вырабатывающие энергию в промышленных масштабах, с мощностью 850 кВт первая и мощностью 450 кВт вторая, их конструкция предусматривала установки пневматического типа с использованием набегающей волны на поверхность конусообразного элемента. В конце 1988 года башня высотой 12,3 м и диаметром 3,6 м была разрушена. В настоящее время станций, использующих энергию волн, не много, однако потенциал волн настолько велик, что реализация проектов, имеющих экспериментальный характер, и разработка новых технологий и энергоагрегатов для преобразования энергии волн в электрическую энергию является одной из актуальнейших задач энергетики как для островных государств, так и для государств, имеющих большую береговую линию и большую площадь морских акваторий.

Разработка и исследование энергоагрегатов морских волн, является одной из актуальных задач энергообеспечения и энергонезависимости объектов Крыма, имеющих нефтегазодобывающие платформы на шельфе Черного моря и в Азовском море. Актуальной является задача разработки энергоагрегатов, турбин, устройств и преобразователей морских волн с целью обеспечения электроэнергией сельскохозяйственных объектов, приморских поселков и подключение волновых электростанций к общей сети электроснабжения.

Австралийская компания Oceanlinx по заказу энергетического оператора Diamond Energy и при содействии Australian Renewable Energy Agency построила за 8 млн \$ волновую электростанцию в 2005 г. в зоне Порт-Кембл, и в 2009 году после модернизации волновые генераторы мощностью 1 МВт выдали потребителям мощность 450 кВт. Генераторы построены по принципу «осциллирующего водяного столба» и работают на сжатом воздухе, вытесняемом из специальных камер под воздействием морских волн. Другая австралийская станция BioWave была установлена компанией BioPower Systems в 2015 году у побережья Порт-Фери мощностью 250 кВт. Стоимость проекта

составила 26 млн. \$. Станция работает по принципу воздействия волн на плавающие буи-лопасти, и полезную работу совершают как колебания поверхности моря, так и толща воды на глубине. Влияние волновых сил вызывает движение качающейся конструкции под названием O-Drive, установленной на дне, которая и раскручивает генератор [31].

В 2008 году был запущен и затем приостановлен для модернизации волновой проект в Португалии у города Агусадова мощностью 2,25 МВт, стоимостью 8 млн. €, построенный по шотландскому проекту, основанному на принципе «колеблющегося тела». Станция была оснащена тремя змеевидными преобразователями энергии волн Pelamis P-750. Вырабатываемая электроэнергия подавалась на берег, расположенный в пяти километрах от места размещения станции, обеспечивающей потребности 1,6 тысяч домохозяйств в населенном пункте Повуа-ди-Варзин. При установке дополнительных 25 преобразователей мощность установки будет наращена до 21 МВт и обеспечит электроэнергией 15 тысяч домов, что эквивалентно предотвращению выброса в атмосферу 60 тысяч тонн углекислого газа за год. Испанская Mutriku Breakwater мощностью 300 кВт входит в топ – 10 объектов альтернативной энергетики. Компания Wave Star Energy запустила опытную установку в районе мыса Ханстхольм (Северное море), расположив ее в трехстах метрах от побережья. Работает один генерирующий модуль электростанции мощностью 500 кВт. Конструкция предусматривает поплавки, участвующие в преобразовании кинетической энергии волн в электричество. Разработчики предложили обеспечить полную защиту станции от штормовых волн путем предоставления полной свободы движения поплавковой системе. При высоте волны до 2,5 м установка работает в штатном режиме, если же волны превышают 3 метра, система поплавков просто поднимается и отпускается вслед за увеличившимися колебаниями морской поверхности. В 2009 году на побережье британского графства Корнуолл началось возведение крупнейшей волновой станции в мире в рамках проекта Wave Hub. Оператором

проекта является компания Carnegie Wave Energy (Австрия). Конструкция генератора предусматривает установку турбин PowerBuoy, производства американской компании Ocean Power Technologies. Станция построена по технологии поплавковых рабочих тел. Проектная мощность 50 МВт, запуск станции состоялся в 2018 году, вторя очередь, предусматривающая наращивание мощности выработки, рассчитана на 2020 – 2021 годы [31].

Нидерландская компания Waterstudio реализовала пилотный проект Parthenon, построив подводную стену с электрогенераторами в нью-йоркской гавани на реке Гудзон. Установка производит электроэнергию и выступает в роли защиты прибрежной зоны и морского порта от волнового воздействия. Волнолом состоит из колонн, и каждая колонна представляет собой турбину метрового диаметра, вращающуюся в обе стороны вод воздействием речных волн. Эксперты полагают, что строительство и запуск волновых электростанций со временем даст возможность удовлетворить до 28% потребностей страны в энергии [31].

Большое значение имеет и обеспечение военно-морских сил электроэнергией за счет проектов волновой энергетики и в соответствии с программами развития флота в США [32].

### **1.3.1 Волновая электростанция конвертерного типа «Pelamis»**

Данный тип электростанции состоит из секций, в которых закреплены гидравлические поршни. Каждая секция содержит гидравлические двигатели и электрогенераторы. При воздействии волн, конвертеры относительно друг друга начинают изгибаться, при этом они находятся на поверхности. В результате вступают в работу гидравлические поршни, которые, в свою очередь, приводят в движение масло. Масло воздействует на гидравлические двигатели, а уже гидравлические двигатели приводят в движение электрические генераторы, вырабатывающие электроэнергию.

Как было указано выше, волновая электростанция подобного типа расположена в районе Агусадора, Португалия. Электростанция состоит из

четырёх устройств под названием Pelamis P-750 [33]. Размер каждого: длина 120 метров, диаметр 3,5 метра, вес 750 тонн. Мощность одного такого конвертера 750 кВт.

При этом «Pelamis» имеют следующие недостатки:

1. Коэффициент использования установленной мощности (далее КИУМ) не превышает 0,4.
2. Значительная материалоемкость.
3. Цена за киловатт установленной мощности составляет 6000 долларов США, что значительно больше аналогов.
4. Из-за больших размеров является помехой и представляет опасность для судов.

Электростанция «Pelamis» представлена на рисунке 1.3 [33].



Рисунок 1.3 – Электростанция «Pelamis» [33]

### 1.3.2 «Утки» Солтера

Станции этого типа представляют собой устройства, которые при набегании волны отклоняются и приводят в действие насосы, перекачивающие, в свою очередь, специально подготовленную воду через турбину.

Поплавки приходят в движение под действием волн и возвращаются в исходное положение под силой собственного веса. За счет движения поплавков насосы включаются в работу внутри вала, который наполнен специально подготовленной водой. Для движения турбины используется разность давления, создаваемая в трубах различного диаметра. Турбины расположены над уровнем моря и установлены между поплавками. Электричество от

генераторов поступает в сеть по подводному кабелю. Рекомендуется для более эффективного распределения нагрузок на валу устанавливать 20 – 30 поплавков.

Первые испытания в условиях, близких к морским, были проведены в мае 1977 года на озере Лох-Несс. Волновая электростанция работала с КПД около 50 процентов [30].

Модель установки мощностью 10 кВт, длиной 50 м, состоящая из 20 поплавков диаметром 1 м, была испытана в 1978 году. Более мощная установка 45 МВт, состоящая из 20 – 30 поплавков диаметром 15 м, укрепленных на валу длиной 1200 м, расположена у западных берегов Британских островов [34].

ВлЭС этого типа имеют следующие недостатки:

1. Для работы такой станции необходимо от 20 отдельных устройств, соединенных в гирлянду, что делает общую конструкцию громоздкой.
2. ВлЭС такого типа зависят от направления волнения.
3. Дороговизна и материалоемкость ВлЭС.
4. Также, как «Pelamis», являются помехой и представляют опасность для судов.

Электростанция с «утками» Солтера представлена на рисунке 1.4 [35].



Рисунок 1.4 – Электростанция с «утками» Солтера [35]

### 1.3.3 Устройства поплавкового типа, имеющие поршневую систему

Устройство поплавкового типа с поршнем представлено на рисунке 1.5 [5].

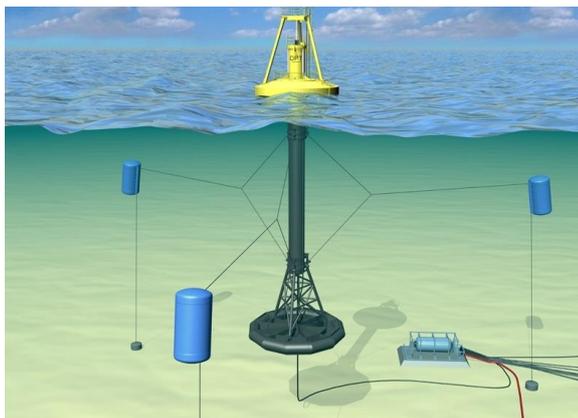


Рисунок 1.5 – Устройство поплавкового типа [5]

Принцип действия таких устройств заключается в перекачке масла за счет энергии волнения. Так же появляется возможность отделить генератор от морской воды.

Недостатками данной схемы являются:

1. Малая мощность одной установки (не более 100 кВт) по сравнению с аналогами.
2. Для выработки большей мощности необходимо большое количество установок, из-за чего станция занимает большую площадь.

#### **1.3.4 Сооружения, работающие по принципу колеблющегося водяного столба в зоне прилива**

Сооружение, работающее по принципу колеблющегося водяного столба в зоне прилива, показано на рисунке 1.6 [5].

Эти устройства представляют собой полые железобетонные конструкции. Волна, напирая на внутреннюю стенку, поднимается вверх по шахте, вытесняя воздух и прокачивая его через турбину. В отличие от буев, работающих по тому же принципу, такая схема имеет значительно большую мощность, но меньший коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). Выработка энергии начинается с определенной высоты волны, в остальное время ВлЭС простаивает. На сегодняшний день в мире сооружено две подобных установки, они расположены в Австралии. Одна ВлЭС была построена в масштабе 1:10 и,

после проведения испытаний, была построена вторая станция в масштабе 1:2. Ее мощность составила 1 МВт, а стоимость 8 млн. долларов [5].

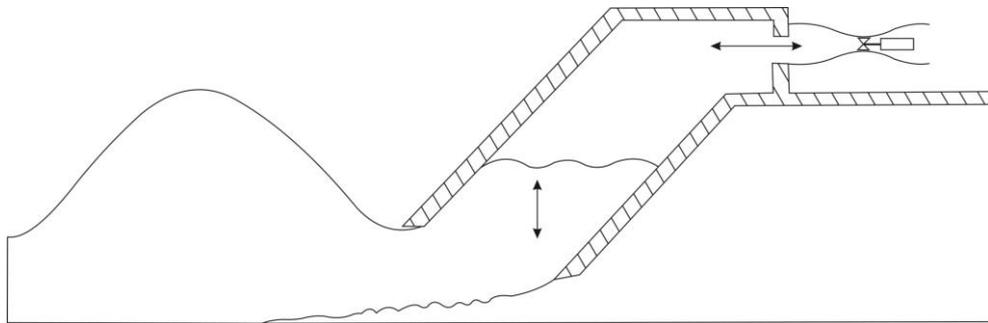


Рисунок 1.6 – Устройство водяного столба в зоне прибоя [5]

### **1.3.5 Электростанции, водохранилища которых наполняются за счет перекачки морской воды под действием энергии волнения**

Внешне ВлЭС этого типа похожи на гидроэлектростанцию, но их водохранилища наполняются не за счет осадков или рек, а за счет морской воды, которая перекачивается на большую высоту при помощи буёв или других установок, преобразующих энергию морского волнения. Схема станции представлена на рисунке 1.7 [5].

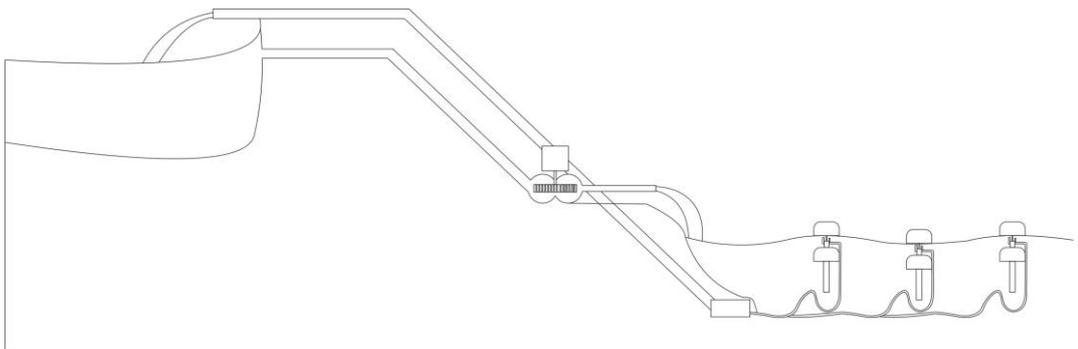


Рисунок 1.7 – ВлЭС с использованием водохранилища [5]

Станции такого типа имеют следующие преимущества:

1. Вся электрическая часть ВлЭС расположена на берегу и не имеет контакта с морской водой.

2. Так как в наличии есть водоем, постоянно наполняемый за счет энергии волн, то решается проблема с изменчивостью волнения. Так же такая станция может выполнять роль ведущей по частоте, как другие ГЭС.

Недостатки данной конструкции:

1. Требуется большая площадь для водоема на необходимой высоте.
2. Маленький коэффициент полезного действия, так как имеются большие потери при перекачке воды в водоем.
3. Затопление территории.
4. Большая итоговая стоимость проекта.

### **1.3.6 ВлЭС, работающие от кинетической энергии волны в зоне прибоя**

Эти станции представляют собой сооружения, установленные на сваях в зоне прибоя. Волны приводят в движение поплавки, соединенные с поршнем, который, в свою очередь, перекачивает масло и способствует вращению турбины. Компания «Wave Star» построила ВлЭС такого типа в 2005 году в районе города Ниссумбринг в Дании и в 2009 году вблизи города Ханстхолм. Фотография станции представлена на рисунке 1.8 [5].



Рисунок 1.8 – ВлЭС, работающие от кинетической энергии прибоя [5]

Основным недостатком станции является ее ресурсоемкость и высокая цена.

### 1.3.7 Устройство поплавкового типа, приводящее в движение линейный генератор

Установка такого типа представляет собой стеклопластиковый корпус, внутри которого находятся катушка и стержень с постоянными магнитами. Стержень при помощи троса крепится к свае. Буй, колеблясь на волнах, двигает стержень относительно катушки, вырабатывая электроэнергию мощностью до 100 кВт. Схема устройства представлена на рисунке 1.9 [5].

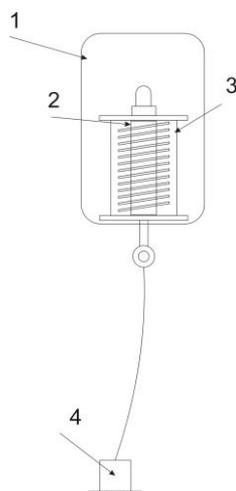


Рисунок 1.9 – Устройство поплавкового типа [5]:

1 – корпус; 2 – магнитный стержень; 3 – статор; 4 – свая

Основное преимущество такой схемы – это ее простота и надежность. Сам генератор и электрическая часть буя изолированы от морской воды, что минимизирует вероятность поломки. Но при этом такой генератор имеет большие размеры и высокую стоимость.

### 1.3.8 Осцилляционная водяная колонна

Осцилляционная водяная колонна сооружается из стали либо из бетона, при этом она полая и частично погружена в воду, имеет отверстие под водой. Во внутренней части, над столбом воды, находится воздух. Работа осцилляционной водяной колонны строится по принципу жидкого поршня.

Вода при попадании в колонну образует сжатый воздух и тем самым вращает турбину, которая крепится к генератору. Когда давление воды уменьшается воздух проходит обратно через турбину.

В данной установке используется турбина Уэллса, особенность которой заключается в том, что её лопасти вращаются в одном направлении независимо от направления движения воздушного потока (рисунок 1.10) [30].

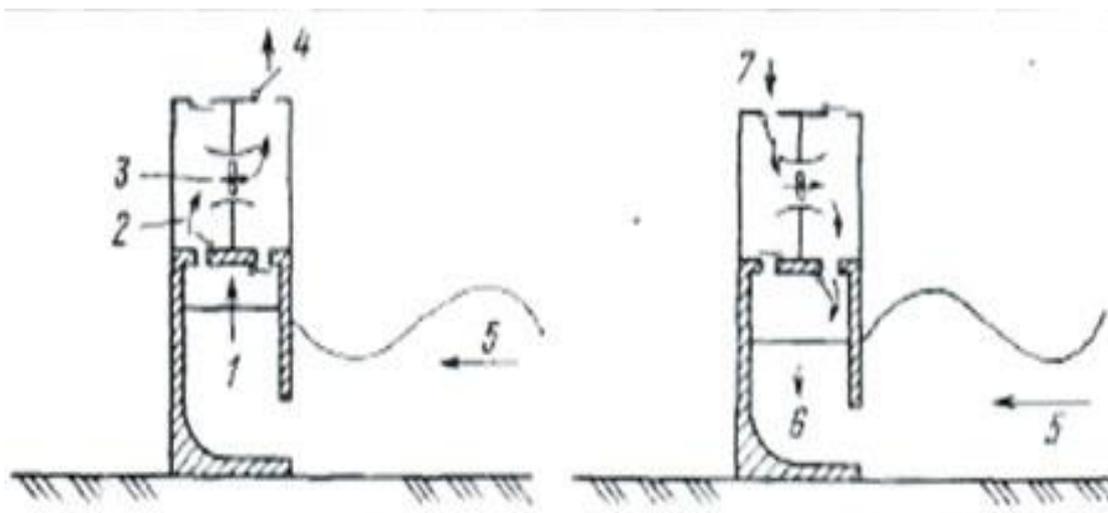


Рисунок 1.10 — Схема установки, в которой используется принцип колеблющегося водного столба [30]:

1 – волновой подъем уровня; 2 – воздушный поток; 3 – турбина; 4 – выпуск воздуха; 5 – направление волны; 6 – опускание уровня; 7 – впуск воздуха

На сегодняшний день одна из наиболее успешных волновых электростанций это - «Oceanlinx», которая работает в акватории города Порт-Кембл (Австралия). Её мощность насчитывает до 1,5 МВт (рисунок 1.11) [5].



Рисунок 1.11 — Волновая электростанция «Oceanlinx» в акватории города Порт-Кембл (Австралия) [5]

### 1.3.9 Волновая электростанция: плот Коккереля

Первая конструкция данного волнового плота Коккереля была запатентована в СССР еще в 1926 г. Схема волнового плота Коккереля довольно таки несложная. В ее основе шарнирно объединенные секции, передвижение которых относительно друг друга передается насосам с электрогенераторами. Помогают такой конструкции удерживаться на месте – якоря (рисунок 1.12), [6].

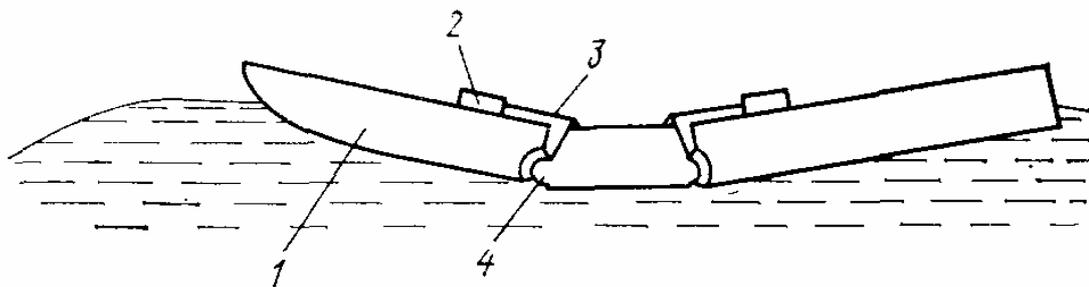


Рисунок 1.12 – Вариант выполнения контурного плота Коккерелля [36]:

1 – колеблющаяся секция; 2 – преобразователь; 3 – тяга; 4 – шарнир

В СССР было принято решение провести испытание ещё в 70-х годах в прибрежной зоне Черного моря. Модель волнового плота составляла в длину

12 м, имела ширину поплавков 0,4 м, при данных параметрах плот развивал мощность 150 кВт.

Результаты тестов в лабораторных условиях показали, что модель в масштабе 1:100 имела КПД 45 %.

В 1978 году в Великобритании проводились испытания опытных моделей океанских электростанций, в основе которых лежит решение использования волнового плота Коккереля, состоящего из шарнирно соединенных секций, перемещение которых относительно друг друга передается насосами с электрогенераторами и конструкция удерживается на месте якорями. Трехсекционный волновой плот Коккереля длиной 100 м, шириной 50 м и высотой 10 м может дать мощность до 2 МВт [34,36].

#### 1.4 Анализ моделей и устройств

Статья «Технический анализ экономической жизнеспособности морских волновых электростанций» [37] посвящена алгоритму разработки преобразователя энергии морской волны, работа которого основана на анализе процессов отражения, рефракции, дифракции и интерференции между волнами и их преобразователями энергии. В статье содержится информация о размещении приемника преобразователя энергии волны параллельно поверхности, что позволяет получать энергию волны раз за разом и дает представление о принципе оптимизации волновых электростанций.

Авторы статьи «Электростанция океанических волн плавающего типа при различных обстоятельствах» [38] предложили волновую электростанцию нового типа, которая состоит из плавучей платформы с парой поплавков, выстроенных в линию с интервалом в один шаг волны, и гидроагрегата встречно – вращающегося типа, погруженного в морскую воду по центру платформы. В этой статье экспериментально представлена динамическая реакция станции при набегании океанической волны и моделируются различные типы потоков вокруг турбин типа «Уэллс» в энергоблоке с противовращением.

В статье «Использование энергии волн на ионическом море Греческого побережья: пространственное планирование потенциальных волновых электростанций» [39] описывается геопространственный многокритериальный анализ решений, основанный на технологии географических информационных систем для определения наилучшего местоположения для развертывания потенциальной волновой энергетической станции в Ионическом море на западе материкового побережья Греции, с учетом факторов, таких, как расстояние до энергосистемы, высота волн, охраняемые зоны и т.д. Оценка волнового ресурса завершается с помощью измерений реальных данных и аппроксимации численной волновой модели. Результаты указывают на наиболее подходящие участки для установки предлагаемых волновых электростанций. Предложенная методология может в равной степени применяться в случае пространственного планирования.

В работе «Оценка качества электроэнергии от волновой электростанции» [40] описывается разработка и тестирование программного обеспечения на основе данных фликерметра, используемого для оценки качества снабжения от волновой электростанции LIMPET на Айла. Приводится воздействие колебаний напряжения с волновой электростанции на общее; поясняются методики, разработанные для улучшения характеристик фликерметра при использовании предварительно записанных данных. Представленные в работе колебания результатов по предварительным данным, собранным со станции LIMPET показали, что устройство работает в приемлемых пределах.

Выбор материалов для лопастей аэродинамического профиля турбины Уэллса, эксплуатируемой на волновой электростанции с колеблющемся водяным столбом (OWC) [41] является одним из ключевых вопросов для генераторов энергии волны OWC. Прилагаемые на лопасти нагрузки передаются на вал, конструкция лопасти должна выдерживать аэродинамические циклические и центробежные нагрузки. Дальнейшая оценка систематического метода определила основные материалы, необходимые при

создании лопастей: армированные композиты (углеводородное волокно, эпоксидная смола) и сплав титана (Ti 6Al 4V).

Статья «Предварительное технико-экономическое обоснование генерации энергии океанской волны для южного побережья Шри-Ланки: электрическая осуществимость» [42] включает краткий обзор устройств волновой энергии, подходящих для волнового климата страны, и техническую возможность интеграции электростанций волновой энергии в общую сеть. Приведены экономические показатели для волновых электростанций.

В работе «Применение технологии генерации волновой энергии» [43] рассматривается история развития технологий генерации, анализируются их оптимизация и применение устройств преобразования энергии волн, примеры применения устройств генерации волновой энергии на судах. Кратко излагается тенденция применения устройств на судах: генерируемая энергия должна использоваться в качестве вспомогательного источника и для бытовых нужд. Применение волновой энергии в морской энергетике может эффективно сократить выбросы с судов, что способствует экономии электроэнергии и защите окружающей среды, а также устойчивому развитию человеческого общества.

В статье «Имитационный анализ и обзор генераторов энергии океанской волны» [44] приведена конструкция устройства Wave Power Generator. Предлагаемая конструкция сравнивается с существующим устройством, преобразующим энергию морской волны в электрическую энергию, с целью показать, что разработанное устройство более эффективно, генерирует большее количество электроэнергии. Исследование проводится с использованием MATLAB.

Характеристика волновой энергетике, технологии преобразования энергии волн, развитие волновой энергетике и перспективы ее использования представлены в национальных программах развитых стран: Швеции, Норвегии, Дании, Ирландии, Великобритании [45]. Описание устройств волновой

энергетики, генераторы, используемые в волновой энергетике, технологии, используемые в Норвегии, Ирландии, США, Великобритании, Австралии, Японии представлены в литературе [46, 47, 48].

В работе [47] представлен краткий обзор планирования, преимуществ, рисков и воздействия на окружающую среду морской волновой электростанции. Выработка электроэнергии от морских волн имеет огромный потенциал. Поскольку эксплуатационные затраты на морские волновые электростанции низкие, то используя энергоагрегаты возобновляемой энергетики, можно производить электроэнергию по низкой цене.

Характеристики волн, энергия волн, технологии волновой энергетике, конструкции преобразователей и использование преобразователей постоянного и переменного тока в волновой энергетике показаны в работах [49, 50, 51]. В источнике [50] освещено преобразование энергии волн, а также обзор существующих станций и устройств. В работе [52] приведен обзор моделей волнопроводов для преобразователей энергии волн. Рассматриваются все этапы преобразования энергии волн в электрическую энергию с помощью волнопроводов. Определяются необходимые компоненты и материалы, управление и ограничения.

В патенте [53] описана волновая электрическая установка, содержащая герметичный поплавок, парус, размещенный на поплавке электрический генератор. В качестве электрического генератора использован генератор с постоянными магнитами на роторе (с большим числом пар полюсов ротора). Электрический генератор расположен в центральной части поплавка вблизи центра водоизмещения, парус расположен на корме поплавка, выход электрического генератора соединен со входом выпрямителя, выход выпрямителя соединен с емкостью, к емкости подключен вход стабилизатора напряжения и вторая емкость, к которой подключен также вход инвертора, а с выхода инвертора электроэнергия подается потребителям по подводному электрическому кабелю или воздушной линией электропередачи на берег, либо

используется на борту поплавок для питания опреснительной установки, зарядки аккумуляторов. Авторы утверждают, что это устройство позволит опреснять морскую воду, но не показывают сколько электрической энергии необходимо для опреснителя, допустим использующего обратный осмос, или может они имели в виду какой-то другой метод опреснения. Не понятно, каким образом они представляют себе хранение и доставку опреснённой воды на берег. Порывы ветра могут разворачивать устройство, боковые волны будут смещать его относительно крепления к якорю. Поэтому устройство будет обладать инерционностью, так как паруса не смогут быстро сориентировать в необходимом положении.

В изобретении [54] приведена поплавок волновая электростанция плавучего завода сжижения природного газа (СПГ), которая содержит механические преобразователи энергии морских волн, включающие винтовую пару, пружину, грузило, шестеренчатую обгонную муфту, паразитную шестерню, мультипликатор, электрогенератор. Внутри оболочки размещено четыре механических преобразователя энергии морских волн, каждый из которых содержит зубчатую пару. Шариковая винтовая пара выполнена в форме винта с гайкой, установленной в неподвижном основании. Технический результат, на достижение которого направлено предлагаемое изобретение, заключается в совершенствовании механического преобразователя энергии морских волн, повышении его чувствительности при малых амплитудах морских волн и увеличении процента преобразования энергии морских волн в электрическую энергию. Из патента не ясно, какова величина этих малых амплитуд и как эти малые амплитуды могут привести в движение шестеренчатые передачи с винтом и гайкой. Авторы пишут об увеличении процента преобразования энергии морских волн в электрическую энергию, не показывая величину этого процента. Не отмечается значение требуемого усилия для работы винта и гайки. Работа механического преобразователя энергии морских волн состоит из двух циклов: сжатие и растяжение пружины.

Эти циклы необходимо было связать с параметрами волны – периодом волны, длиной волны. Устройство включает ряд промежуточных элементов. Постоянная времени может быть в этом устройстве соизмерима с временем работы всех элементов устройства. Авторы работы утверждают, что предлагаемое изобретение является энергосберегающей системой, но не понятно, в чем суть энергосбережения. В работе указывается, что большее количество кинетической энергии морской волны будет преобразовано в электрическую энергию, и этот механический преобразователь энергии более чувствителен при малых амплитудах морских волн. Волны в море совершают в основном поступательное движение и обладают потенциальной энергией. Авторы путают амплитуды волн со скоростью распространения волны.

В описании изобретения к патенту [55] – поплачковая волновая электростанция – показано, что эта электростанция содержит корпус с камерами, наполненными жидкостью и соединёнными каналом, два поплавка, расположенные симметрично относительно его оси, турбину, расположенную в канале на одной оси с электрогенератором и связанную с ним. Электростанция снабжена килем, стабилизирующим ее положение относительно вертикали, двумя боковыми поплавками, прикрепленными к корпусу и расположенными с разных его сторон вдоль оси корпуса, стабилизирующими положение электростанции относительно фронта набегающей волны ограничителями движения поплавков, расположенными на корпусе. Из описания работы устройства видно, в отличие от прототипа [55], что для предлагаемой волновой электростанции отсутствует якорь и это может привести к дрейфу электростанции при наличии еще и дополнительных течений. Не ясно, каким образом автор предлагает аккумулировать вырабатываемую электроэнергию и передавать потребителю. Волна обладает довольно большим напором на один погонный метр и достаточной энергией, в результате гидростатических сил и сил тяжести может быть явно недостаточно, чтобы эту волновую электростанцию не унесло в море или не выкинуло на берег. Набегающая волна

имеет период несколько секунд и это устройство ввиду инерционности может быть не работоспособным.

В описании изобретения к патенту [56] – поплавок волновая электростанция – производство электроэнергии осуществляется путем преобразования энергии волн с использованием конструкции герметичного поплавка, внутри которого имеется цилиндрический корпус с размещенным в нем маятником. Маятник подвешен к концу троса, который переброшен через блок, установленный на вращающейся оси. Другой конец троса прикреплен к якорю, установленному на дне, к вращающейся оси блока присоединен ротор электрического генератора. Обмотка статора генератора присоединена к выходу зарядного устройства, выход которого присоединен к аккумулятору. Авторы используют оригинальную идею построения волновой электростанции и методику расчета, приведенную в патенте [56], однако при расчете не учтены силы трения, возникающие в трубе и силы трения направляющей троса. При расчете механической энергии и мощности имеются ошибки – энергия принята равной мощности, то есть период  $T$  равен 1 с, но в тексте авторы принимают период колебаний  $T = 3$  с. Имеется некоторая свободная трактовка принятых параметров и расчетов. Например, принят вес поплавок волновой электростанции с маятником и тросом  $F_3 = 200$  кг, сила Архимеда  $F_a = 300$  кг. Получим энергию:

$$W_{MC} = 205 \text{ Дж и мощность } P_{M \max} = \frac{W_{Mh} + W_{MC}}{T} = 205 \text{ Вт,}$$

где  $W_{Mh}$  – механическая энергия вращения блока, Дж,

$W_{MC}$  – энергия ротора электрического генератора, Дж.

В результате авторы пишут, что при подъеме на гребень волны используется только часть механической мощности  $W_{Mh \max}$ , равная  $W_{MC}$ , следовательно, получим  $P_M = 137$  Вт [56]. Из публикации не ясно, какое количество энергии вырабатывается волновой электростанцией в течение суток, года.

Методика, приведенная в источнике для поплавок волновой электростанции (ПВЭС), позволяет произвести расчеты преобразователей

энергии волн, включающих линейный электрогенератор, индуктор, выполненный в виде инерционной массы с постоянными магнитами, установленными с возможностью вертикального возвратно-поступательного перемещения посредством упругих элементов [57]. В патенте показано, что в зависимости от назначения возможно создание ПВЭС на малые ( $< 1\text{кВт}$ ) и большие ( $> 1\text{кВт}$ ) мощности. Малые ПВЭС могут устанавливаться на судах как вспомогательные источники тока, а мощные ПВЭС создаются путем составления многомодульных связок из оптимальных по характеристикам ПВЭС. Авторы предлагают путем таких связок достигать мощностей в десятки мегаватт и располагать эти связки в акваториях мирового океана с высокой штормовой и волнообразующей активностью, в местах, непригодных или мало пригодных для обитания человека или мореплавания, и наведение таких комплексов судно-связка ПВЭС на штормовые акватории с помощью спутников Земли. Идея использования ПВЭС [57] в штормовом океане для получения электрической энергии десятков МВт хорошая, но возникает ряд вопросов: как накапливать и использовать полученную электроэнергию в штормовом океане; возможность обрыва от якорей ПВЭС, причем соударение с каким-либо судном в штормовом океане может привести к непредсказуемым последствиям. Если бы авторы привели пример использования разработки для нефте- или газодобывающей платформы, то с этим можно было бы согласиться, но и тогда ПВЭС должна быть жестко закреплена.

Известны технические решения по созданию поплавковых волновых электростанций [57], эффективность которых существенно зависит от длин морских волн, скорости и направления их распространения. Эти параметры волн являются постоянно меняющимися, причем изменения их носят случайный характер. В техническом решении [57] ПВЭС не содержит накопитель энергии, который необходим для энергомашины как устройство, повышающее эффективность его работы. В ряде случаев для работы ПВЭС используется динамический инерционный накопитель энергии (ИНЭ), который

позволяет создавать запас энергии в периоды неполной нагрузки электрогенератора, а в периоды максимальной нагрузки или морского затишья поддерживать его вращение. Использование ИНЭ также существенно повышает эффективность действия электростанции и одновременно является хорошим стабилизатором вертикальной устойчивости всего поплавка. Для компенсации аритмии, предотвращения срыва колебаний и поддержания устойчивости колебательного движения маятника в ПВЭС предусматривают дополнительное периодическое воздействие на груз с помощью параметрического осциллятора. Для повышения эффективности действия ПВЭС оснащена ИНЭ [57]. Раскрутка маховика ИНЭ либо наоборот преобразование энергии вращательного движения в электроэнергию производится с помощью электромеханического привода двухстороннего действия. Использование ИНЭ в качестве энергетического буфера позволяет создавать запас энергии в периоды неполной нагрузки электрогенератора, в периоды максимальной нагрузки или морского затишья поддерживать его вращение. ИНЭ выполняет еще одну очень важную функцию. В связи с тем, что вращение маховика, выполненного в виде осесимметричного шарового сегмента большой массы, раскручиваемой до высоких угловых скоростей, характеризуется значительной величиной момента импульса, ИНЭ можно использовать в качестве стабилизатора вертикальной устойчивости всего поплавка. Это свойство поплавка весьма существенно, если учесть всевозможные боковые воздействия со стороны волн и потоков ветра. В процессе работы ПВЭС энергия колебаний упругого маятника расходуется на генерацию электроэнергии и работу против диссипативных сил. Это приводит к уменьшению амплитуды маятника и частому рассогласованию колебаний маятника и вынуждающей силы. На параметры колебаний упругого маятника могут также оказывать влияние амплитудные и фазовые изменения параметров колебаний поплавка, связанные со стохастическим характером процесса волнообразования в море [57].

В патенте [58] приведена волновая электростанция, построенная на основе двух тел, которые установлены с возможностью колебаний в противоположных фазах. Показанная волновая электростанция представляет собой конструкцию сложного типа.

Среди существующих в мире волновых микроэлектростанций, некоторые построены по плавиковому принципу. Известен проект под название Dartmouth Wave Energy английского изобретателя Элвина Смита (Alvin Smith). Он напоминает волновую электростанцию, использующую энергию вертикального движения поплавка. Поплавок не имеет электрических систем и является механическим насосом, закачивающим морскую воду на большую высоту, то есть является мини – ГАЭС (гидроаккумулирующей электростанцией (Pumped-storage hydroelectricity)). Вода накапливается на суше, в горах и выпускается обратно в море, вращая турбину гидроэлектростанции, но без дамбы. Основу установки составляют два поплавка, способных передвигаться друг относительно друга. Верхний поплавок раскачивается волнами, нижний поплавок соединен с дном при помощи цепи и якоря. Между поплавками находится “насосная станция” (цилиндр с поршнем двойного действия, который качает воду при движении вниз и вверх) и клапаны с выходными трубами. Недостаток такой конструкции заключается в том, что для работы станции рядом с береговой линией должно располагаться возвышение, на котором можно разместить бьеф с необходимым объемом воды. По оценке создателя машины, установка может поднимать морскую воду на высоту до 200 м, значит необходимо создать давление более 25 атмосфер, и практическое применение такой конструкции возможно только в некоторых местах, отвечающих этому требованию проекта. Другим недостатком являются потери в трубопроводе при перекачке воды, что ведет к снижению общего к.п.д [58].

Специалистами научно-производственной фирмы “Крок – 1” (Украина) под руководством Овсянкина В.В. была разработана конструкция волновой электростанции [59], преобразующей энергию морских волн в условиях

открытого моря, которая имеет ряд принципиальных отличий от всех существующих волновых электростанций. Возникающие при прохождении волн перемещения отдельных объемов воды воспринимаются рабочими органами станции посредством гидродинамического напора, что создает крутящий момент на рабочих валах. Этот момент преобразуется и передается трансмиссией на вал генератора. Авторы провели ряд испытаний макетов станций и опытного образца мощностью 10 кВт в волновом бассейне института гидромеханики НАН Украины и натурные испытания в условиях Киевского моря. На основе этого приведена энергетическая характеристика работы станции мощностью 2 МВт, где указано, что при высоте волны более 2 м и до 5,5 м, мощность, развиваемая установкой, составляет 2 МВт. Акватория, где предполагается установка, должна быть абсолютно открыта волнам, иметь глубину не менее 25 м и быть максимально приближена к объекту потребления электроэнергии. Не ясно, как конструкция может непрерывно изменять свои параметры под воздействием набегающих морских волн широкого диапазона длин и амплитуды, как обеспечивается надежность крепления при модульном соединении при штормующем море и их работа при высокобалльных штормах, срок работы установки и его к.п.д.

### 1.5 Оценка ресурсов волновой энергии Черного моря

Волны на воде возникают с помощью сил гравитации и потока ветра, который в свою очередь проходит довольно большое расстояние над поверхностью воды. Некоторые волны проходят тысячи миль, достигая суши. Ветер образует волны разных размеров, начиная от небольшой ряби, заканчивая огромными волнами. Частицы воды совпадают с большей совокупной энергией, которая создается волной. Также характер колебаний волн различен, что приводит к разным законам дисперсии и к всевозможному поведению волн.

На создание волн воздушным потоком воздействуют такие факторы, как: скорость движения ветра; усилие; время прохождения потока ветра; водная глубина.

Основные параметры волн: высота волны; длина волны; период.

Механизм распространения волны показан на рисунке 1.13, [60].

При подходе волны к берегу, ее длина уменьшается, а высота и крутизна увеличиваются.

В основном электростанции, применяющие волновую энергию, сконструированы для получения энергии на глубокой воде. Для таких электростанций должно быть соблюдено условие, что глубина моря  $D$  должна превышать половину длины волны  $\lambda/2$ .

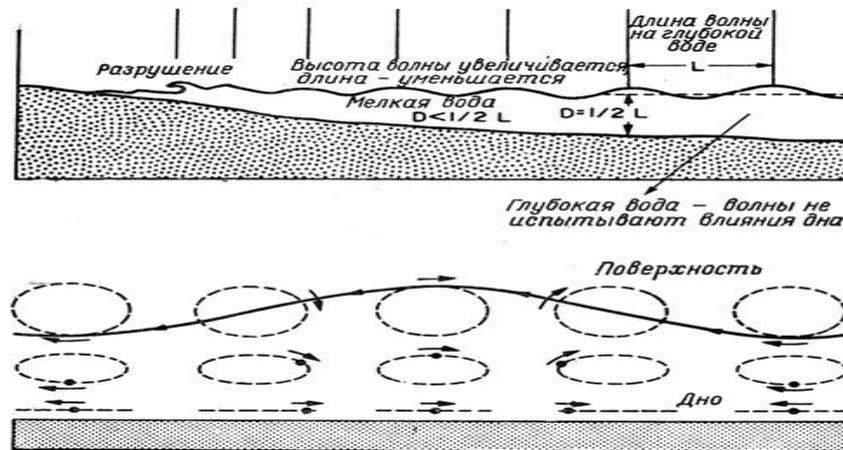


Рисунок 1.13 – Профиль волны [60]

Существуют некоторые особенности поверхностных волн на глубокой воде:

1. Нерегулярная длина, фаза, и направление прихода.
2. Круговое движение каждой частицы жидкости.
3. Уменьшение амплитуды частиц жидкости с глубиной.
4. Амплитуда волны зависит от характера предшествовавшего взаимодействия ветра с морской поверхностью.

По причине отсутствия поступательных движений на глубокой воде, для нее больше свойственно круговое движение с радиусом орбиты  $r$ . Высота

волны  $H$  от вершины гребня до основания одинакова и равна ее удвоенной амплитуде ( $H = 2r$ ). Угловая скорость движения частиц  $\omega$ .

Основные характеристики волны представлены на рисунке 1.14 [60].

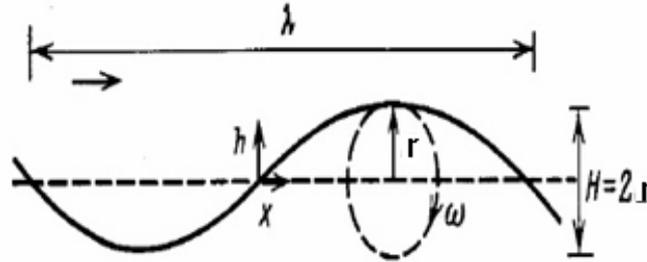


Рисунок 1.14 – Основные характеристики волны [61]

Исходя из гидродинамической теории, энергия волны складывается из кинетической энергии  $E_k$  частиц жидкости, участвующих в волновом движении, и потенциальной энергии  $E_p$ , которая определяется положением массы жидкости, поднятой над уровнем спокойной поверхности. Поток энергии, переносимый волной в направлении ее распространения, через полосу вертикальной плоскости единичной ширины и бесконечной глубины, можно определить как работу сил давления по выбранному направлению в единицу времени, усредненную за период волны, или как скорость переноса волновой энергии:

$$\Phi = \frac{1}{32} \frac{\rho g^2 h^2 T}{\pi}, \quad (1.1)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$h$  – амплитуда волны, м;

$T$  – период, с.

Таким образом, мощность, переносимая волнами на глубокой воде, пропорциональна квадрату их амплитуды и периоду. Приведенное выражение пригодно для описания энергетических характеристик волн, профиль которых вычерчен по синусоиде. В природе синусоидальным профилем обладают только волны весьма большого периода – приливные, у которых действительно длина волн несоизмеримо больше высоты. Для поверхностных волн,

создаваемых ветром, такое упрощенное допущение незаконно, а потому анализ колебательного движения водных частиц проводится по другому пути, классическую теорию модифицируют, используя статистический и спектральный подходы.

Изначально в качестве оценочных значений в нерегулярном волнении приняты параметры  $H_s$  и  $T_s$  значительного волнения [61]. Таким образом, были оценены запасы волновой энергии в прибрежных зонах Мирового океана.

В основе данного принципа лежали визуальные наблюдения за волнением морей и океанов. Далее они были исправлены методом расчета волновой обстановки по метеорологическим данным. По результатам исследования было выявлено, что почти во всех прибрежных зонах Мирового океана мощность превысила 15 кВт/м (рисунок 1.15). В высоких широтах северного и южного полушарий Земли были выявлены максимальные значения мощности волнения – до 70-90 кВт/м.

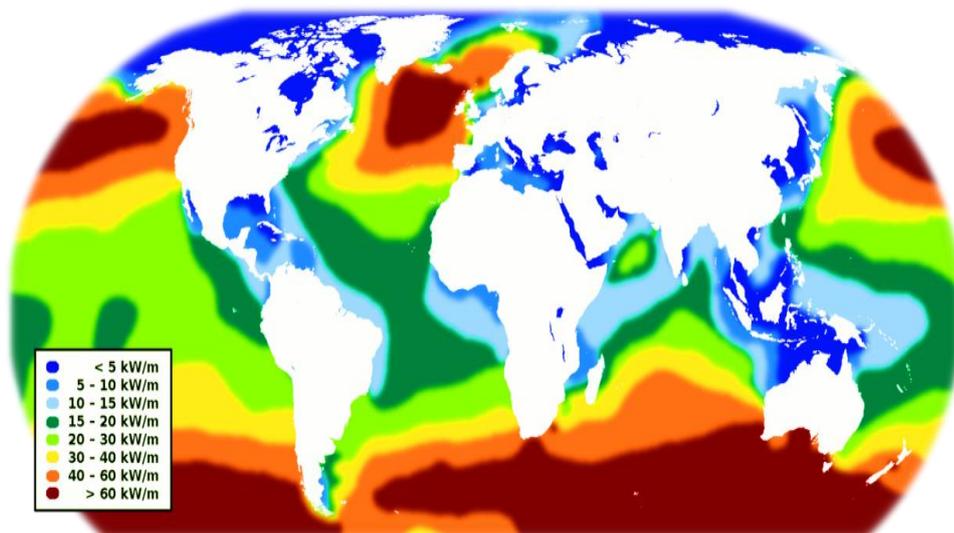


Рисунок 1.15 – Значение мощностей в зонах Мирового океана [61]

Было выявлено, что главным недостатком данного метода является то, что расчет производится за фиксированный момент времени. Работу по устранению данного недостатка провел Г.В. Матушевский [61]. Для этого он внедрил метод средних многолетних данных характеристик волнения. Таким образом ввели режимную климатическую функцию плотности распределения

высот ( $h$ ) и периодов ( $T$ ). Поток энергии волнения с учетом этой двумерной функции может быть представлен по формуле:

$$\Phi = \frac{\rho g^2}{32\pi} \iint_0^\infty \psi(h, T) h^2 T dh dT, \quad (1.2)$$

Значения потока волновой энергии в морях России, вычисленные по методу Матушевского приведены в таблице 1.1.

В настоящее время в мировой практике для расчета волнового климата используется подход, основанный на получении режимных сведений путем вычислений по гидродинамическим спектральным моделям.

Таблица 1.1 – Потоки волновой энергии в морях России [61]

Море	$\Phi$ , кВт/м	Море	$\Phi$ , кВт/м
Азовское	3	Охотское	12-20
Черное	6-8	Берингово	15-44
Балтийское	7-8	Баренцево	20-25
Каспийское	7-11	Японское	21-31

Наиболее популярными являются ветро-волновые модели третьего поколения WAM, SWAN, WaveWatch и др. Однако они, в первую очередь, ориентированы на описание волнения в открытой части моря [62], поэтому для моделирования волнения в прибрежной зоне Черного моря (рисунок 1.16) применялась спектральная волновая модель Mike 21 SW, разработанная специально для морских и прибрежных районов.

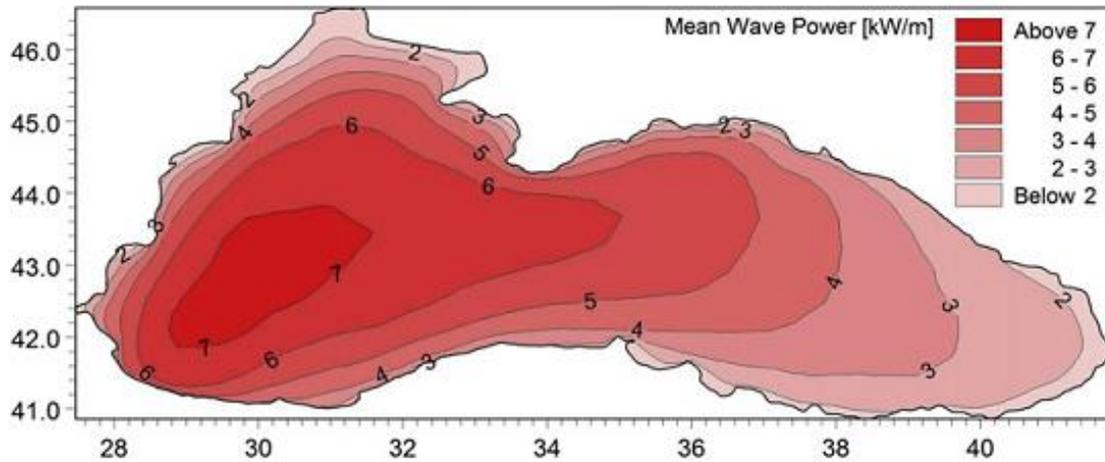


Рисунок 1.16 – Среднее распределения энергии волн в Черном море за 13 лет (кВт/м)

Переходя от анализа методов оценки потенциала волновой энергии к оценке ее запасов по прибрежной зоне Крымского полуострова, можно констатировать следующее [61]: в Черном море удельная среднегодовая мощность волн составляет около 6-8 кВт/м.

В соответствии с особенностями режима ветра, максимальная интенсивность ветрового волнения приходится на холодный период года – с октября по март. То есть можно ожидать, что в зимние месяцы средний потенциал волновой энергии Черного моря составит 8-9 кВт/м, а в летние – 5-6 кВт/м.

Значительные размеры моря, большие глубины, слабая изрезанность береговой черты, несмотря на редкую повторяемость сильных ветров, способствуют развитию штормового волнения. При этом в прибрежной зоне режим волнения очень изменчив и зависит от особенностей конкретного района.

Что касается Азовского моря, то его среднегодовой потенциал волновой энергии значительно ниже – около 3 кВт/м, это связано со сравнительно небольшими размерами моря, малой глубиной и наличием зимой ледяного покрова (в суровые зимы с конца декабря по март все море бывает покрыто сплошным льдом) [61].

В качестве источника возобновляемой энергии наибольший практический интерес представляет та часть мощности волнения, которая может извлекаться длительное время. Сичкарев В.И. [63] ввел для нее термин возобновляемая мощность волнения — часть полной мощности, которая постоянно передается волнению извне и поддерживает его на известном режимно-климатическом уровне.

Суммарную возобновляемую мощность волнения для площади  $S$  можно найти как:

Суммарную возобновляемую мощность волнения для площади  $S$ ,  $N_B$ , Вт, можно найти как:

$$N_B = 1,34 \cdot 10^{-4} \Phi^{0,6} S, \quad (1.3)$$

где  $T_{\text{год}}$  — годовое время, с.

Тогда годовая возобновляемая энергия волн на заданной акватории,  $\mathcal{E}_B$ , Дж:

$$\mathcal{E}_B = N_B T_{\text{год}} = 4215 \Phi^{0,6} S. \quad (1.4)$$

Возобновляемая мощность и энергия Черного и Азовского морей приведена в таблице 1.2. Там же для сравнения представлены данные по Баренцевому и Белому морям.

Таблица 1.2 – Возобновляемая мощность и годовая энергия акваторий некоторых морей России [63]

Море	$\Phi$ , кВт/м	$S \cdot 10^{12}$ , м <sup>2</sup>	$N_B$ , Вт	$\mathcal{E}_B$ , Дж
Черное	6-8	0,422	$12,42 \cdot 10^9$	$1,08 \cdot 10^{14}$
Азовское	3	0,039	$0,64 \cdot 10^9$	$5,6 \cdot 10^{12}$
Белое	10	0,09	$3,03 \cdot 10^9$	$9,55 \cdot 10^{16}$
Баренцево	25	1,42	$0,83 \cdot 10^{11}$	$2,61 \cdot 10^{18}$

По данным Г.В. Матушевского [63] возобновляемая мощность составляет всего 0,026–0,040 % полной мощности волнения. Таким образом, даже полный отбор возобновляемой мощности приводит лишь к незначительному изменению полной мощности волнения и соответственно к малому экологическому влиянию.

Расчеты показывают, что для Черного моря плотность возобновляемой мощности волнения составляет 29,4 кВт на 1 км<sup>2</sup> акватории, для Азовского — 16,4 кВт/км<sup>2</sup>.

Существуют множество разработок волновых преобразователей, часть из которых реализованы в той или иной мере. Наиболее распространенные: поплавковая станция, плот Коккереля, качающаяся «утка» Солтера, осциллирующий водяной столб, пульсирующий водяной столб Массуды. На лучших установках в оптимальном режиме КПД отбора волновой энергии довольно высок (около 70-95%), однако с учетом неизбежных потерь при преобразовании энергии в электрическую итоговый КПД снижается до 30-80%.

Если принять за основу КПД, равный 60%, то мощность волновых электростанций на акваториях Черного и Азовского морей может составить соответственно 7,45 и 0,38 ГВт, а суммарные технические ресурсы волновой энергии могут быть оценены примерно в 68,6 ТВт·ч в год. На рисунке 1.17 приведена схема районов Черного моря по Землякову [64].

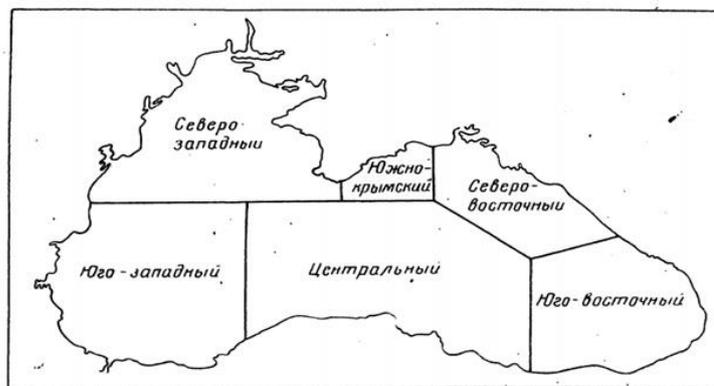


Рисунок 1.17 — Схема районов Черного моря по Землякову [64]

На схеме показано преимущественное использование энергии волн на акваториях с малыми и средними волнами. Однако при множестве принципиальных конструкторских решений, для всех видов ВлЭС характерен один общий недостаток, который ограничивает эффективность их применения. Это отсутствие свойства адаптации к изменяющимся внешним условиям морской среды и, в первую очередь, к нестационарности параметров морских волн: длины, амплитуды и частоты следования (скорости распространения), что существенно снижает общую эффективность применения ВлЭС. На акватории Черного моря возможно существование ветровых волн максимальной высотой до 5,1...20,0 м. Однако, как следует из таблицы 1.3, такие волны образуются чрезвычайно редко. Волны с 3%-й и большей обеспеченностью имеют высоту 1,5...3,0 м, что позволяет говорить о целесообразности создания морских ВлЭС для работы на малых и средних волнах. Предварительный анализ существующих принципов построения ВлЭС позволил выбрать в качестве одного из вариантов ВлЭС для работы на Черном море энергоагрегат поплавкового вида. В таблице 1.3 приведены данные по высоте волн в Черном море в течение года [65].

Таблица 1.3 – Характеристики волн Черного моря [31]

Высота волн, м	Повторяемость по месяцам и годовая, %												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
0,0...0,5	40,7	41,0	47,7	62,2	71,4	68,9	62,7	58,4	54,7	48,2	43,7	39,2	53,3
0,6...1,0	23,6	23,9	23,6	21,0	17,4	18,9	21,4	22,7	22,7	23,9	24,8	24,9	22,4
1,1...1,5	15,6	15,8	14,1	9,1	6,8	7,4	9,5	11,0	11,9	13,3	14,8	16,3	12,1
1,6...2,0	9,4	9,5	7,3	4,2	2,8	3,0	4,0	4,9	6,3	7,5	8,2	9,4	6,4
2,1...2,5	4,6	4,2	3,2	1,7	0,9	1,0	1,6	1,7	2,1	3,3	4,1	4,5	2,7
2,6...3,0	3,4	2,9	2,0	0,9	0,4	0,4	0,5	0,8	1,2	2,1	2,6	3,0	1,7
3,1...3,5	0,8	1,2	0,6	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7	1,0	0,5
3,6...4,0	1,2	0,8	0,7	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,4	0,6	0,7	0,9	0,5
4,1...4,5	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1
4,6...5,0	0,3	0,3	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
5,1...20,0	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1

В таблице 1.4 показан предел сезонный изменений скорости ветра в различных районах.

Таблица 1.4 – Предел сезонных изменений скорости ветра в различных районах Черного моря [65]

Район	январь	июль	Район	январь	июль
Северо-западный	4,4-8,8	3,5-5,4	Юго-западный	4,0-8,5	3,0-4,3
Крымский	3,3-8,3	2,5-4,6	Центральный	4,7-7,5	3,0-4,9
Северо-восточный	3,6-7,7	2,3-4,8	Юго-восточный	1,6-6,8	1,8-3,9

Анализируя данные, приведенные в таблице 1.3, можно сделать вывод, что наиболее перспективным для сооружения ВлЭС является Северо-западный район Черного моря, в связи с наиболее высокими показателями скорости ветра.

На рисунках 1.18 – 1.20 приведены данные повторяемости (%) различных градаций высот волн (м) по месяцам на береговых станциях. Градации волн выбраны на основании стандартной шкалы степени волнения и соответствуют баллам волнения.

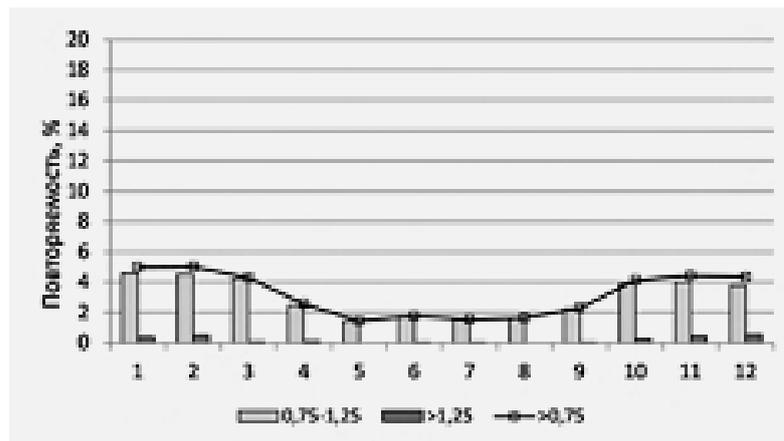


Рисунок 1.18 – Повторяемость (%) различных градаций высот волн (м) по месяцам на береговой станции МГС Черноморское [65]

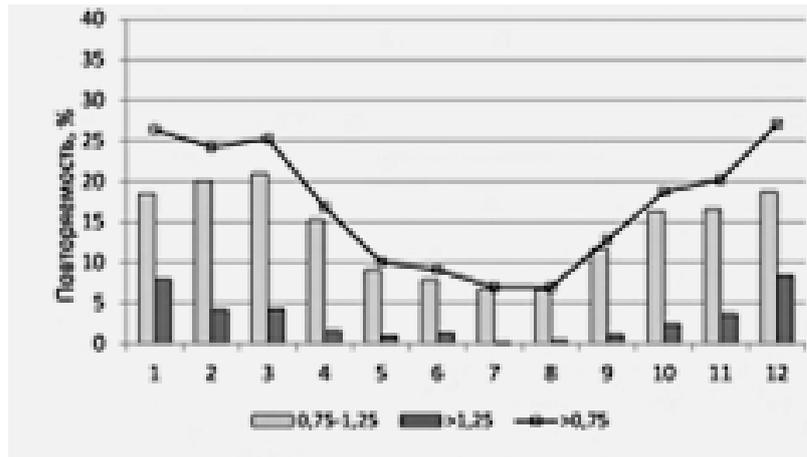


Рисунок 1.19 – Повторяемость (%) различных градаций высот волн (м) по месяцам на береговой станции МГС Тарханкут [65]

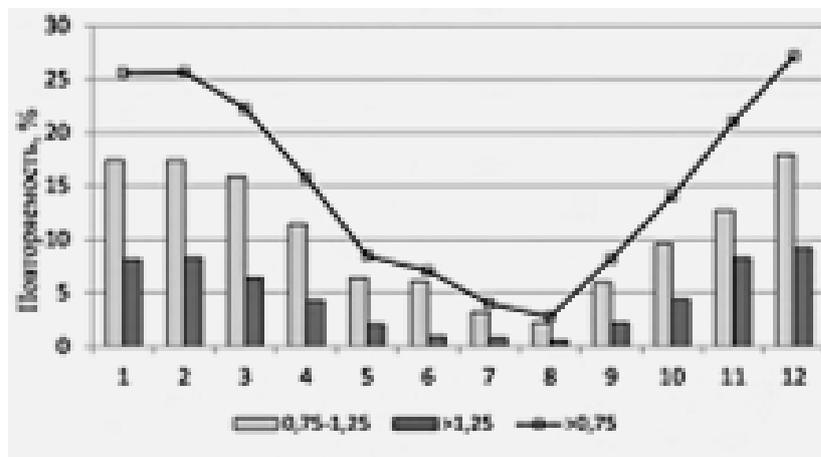


Рисунок 1.20 – Повторяемость (%) различных градаций высот волн (м) по месяцам на береговой станции МГС Евпатория [65]

Более детальный анализ показал, что наибольший интерес представляет прибрежная зона между г. Евпатория и г. Севастополь. Технические ресурсы волновой энергии в полосе шириной 10 км составляют около 83 ГВт·ч/год. Соответственно, мощность волновой электростанций в указанной зоне может составить 10 МВт.

### 1.6 Характеристики морских волн у побережья Крыма

Согласно статистическим данным среднее волнение у побережья Крыма не превышает 0,25 м в летний и 0,4 м в зимний период, но, для отдельно взятых

регионах Крыма, как и для открытых морей и океанов среднее значение может достигать 1 метра, что соответствует 3 баллам в таблице 1.5 [66].

Морские волны разделяются по следующим категориям:

1. Ветровые;
2. Корабельные;
3. Сейсмические;
4. Анемобатические;
5. Приливные.

Таблица 1.5 – Параметры морской волны [66]

Волнение в баллах	Описание	Характеристики волны		
		Высота (м)	Длина (м)	Период (с)
0	отсутствует	0	0	0
1	слабое	менее 0,25	5	2
2	умеренное	0,25-0,75	5 - 15	2 - 3
3	значительное	0,75 – 1,25	15 - 25	3 - 4
4				
5	сильное	2 – 3,5	40 – 75	5 – 7
6		3,5 – 6	75 - 125	7 – 9
7	очень сильное	6 – 8,5	125 – 170	9 – 11
8		8,5 - 11	170 – 220	11 - 12
9	исключительное	11	220	12

Для выработки электроэнергии на ВлЭС подходят ветровые волны, и вызванные ими зыбь и прибой. Так как у побережья Крыма волновой потенциал небольшой, целесообразно размещать установки перед зоной прибоя, где волна значительно больше и имеет кроме потенциальной энергии еще и кинетическую, но при этом не будет повреждать установку.

Дальнейшие расчеты в работе будут выполнены с учетом условий таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Высота, длина и период волны

Высота волны, м	1
Длина волны, м	15-25
Период, с	3-4

### 1.7 Выводы по главе

1. Анализ потенциала волновой энергетики и существующих энергоагрегатов показал, что использование энергии волн и существующие разработки требуют дальнейших исследований, чтобы повысить энергоэффективность энергии морской волны при преобразовании ее в электрическую энергию.

2. Проведен теоретический анализ использования энергии волн Черного и Азовского морей.

3. Рассмотрены принципы работы существующих волновых энергоагрегатов и волновых электростанций. Показаны недостатки разработанных моделей и неэффективность их применения для Черного и Азовского морей, являющихся внутренними морями.

4. Оценены ресурсы волновой энергии Черного моря и приведены характеристики морских волн у побережья Крыма.

5. Таким образом, анализ существующих данных для волн в условиях Крыма показывает, что требуется для разработки ВлЭС. То есть, для разработки и расчета параметров энергоагрегатов для ВлЭС необходимо руководствоваться следующими критериями:

- итоговая стоимость должна быть не выше аналогов;
- волновая электроустановка (ВлЭУ) должна быть не материалоемкой и состоять из серийно выпускаемых комплектующих.

- ВлЭУ должна иметь массогабаритные размеры, позволяющие транспортировать её железнодорожным и автотранспортом;
- ВлЭУ должна работать как в открытом море, так и в зоне прибоя;
- ВлЭУ должна иметь высокий коэффициент установленной мощности.

Данным критериям соответствует ВлЭУ поплавкового типа, расчет и моделирование которой произведен в четвертой главе.

### 1.8 Цель и задачи исследования

Подводя итог вышеизложенному, можно сформулировать цель и задачи исследования.

**Цель исследования.** Определить параметры устройства для расчета энергетического потенциала морских волн и разработать энергоагрегат для волновой электростанции.

#### **Задачи данной работы.**

1. Провести теоретические исследования параметров морских волн у побережья Республики Крым для анализа эффективности преобразования их энергии в электрическую энергию.
2. Разработать устройство для измерения параметров морских волн.
3. Разработать устройство для преобразования энергии морских волн в электрическую энергию с учетом особенностей побережья Республики Крым.
4. Провести экспериментальные испытания разработанного преобразователя энергии волн в электрическую энергию.
5. Определить экономическую эффективность внедрения предлагаемого устройства.

## ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКИХ ВОЛН

### 2.1 Энергия морских волн

Мощность волны оценивают в кВт на погонный метр, то есть в кВт/м. При сравнении с ветровой и солнечной энергией волновая энергия доминирует из-за более высокой удельной мощности. Средняя мощность волн морей и океанов, как правило, превышает 15 кВт/м. При высоте волн в 2 м мощность достигает 80 кВт/м. Таким образом, при охвате поверхности океанов не может быть недостатка энергии [61].

Энергия морских волн – это энергия, которая переносится по поверхности моря. Метровый отрезок волны переносит от 40 до 100 кВт мощности. Энергия волн считается неисчерпаемой и намного выше энергии приливов и отливов. Волновые электростанции можно использовать для энергоснабжения сигнальных буев, нефтедобывающих станций, прибрежных селений, сельскохозяйственных объектов с субтропическими культурами и т.д.

В настоящее время развитие и эксплуатация волновой энергетики находится на низком уровне по сравнению с солнечной и ветровой энергетикой. Энергоагрегаты волновых электростанций не получили должного развития, а существующее оборудование волновых электростанций требует очень больших расходов. КПД волновых электростанций имеют низкое значение. Многочисленные исследования показывают, что мощность волн может внести огромный вклад в альтернативную энергетику. Волновая энергетика пока что отстает на десятилетие от других видов возобновляемых источников энергии.

### 2.2 Характеристика и основные параметры морских волн

Морские волны могут быть представлены двумя видами: поверхностными и внутренними.

Поверхностные волны – это волны на поверхности моря, которые по происхождению могут быть ветровыми, приливными, анемобарическими, сейсмическими, корабельными.

Внутренние волны – это волны, возникающие на глубине и почти не проявляющие себя на поверхности.

Оба эти вида волн связаны друг с другом как природой возникновения, так и при взаимодействии между собой.

При стоячей волне частицы воды не совершают движений по круговым орбитам. Каждая волна, поступательная или стоячая, характеризуется определенными элементами: гребнем, вершиной, ложбиной и подошвой волны. Гребень волны – часть волны, расположенная выше среднего волнового уровня. Вершина волны – наивысшая точка гребня волны. Ложбина волны – часть волны, расположенная ниже среднего волнового уровня. Подошва волны – самая низкая точка ложбины волны (рисунок 2.1) [66]

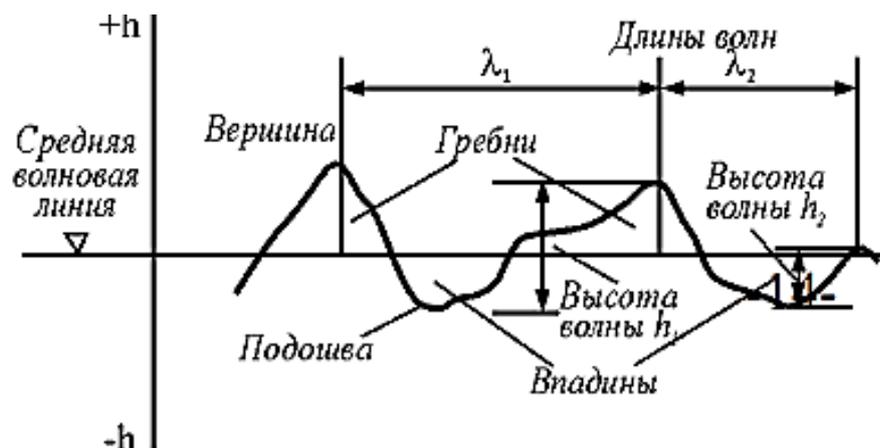


Рисунок 2.1. — Элементы волны [66]

Высота волны  $h$  – превышение высоты волны над соседней подошвой на волновом профиле, проведенном в генеральном направлении распространения волн. Высота волны равна удвоенной амплитуде или удвоенному радиусу орбиты поступательной волны при круговых орбитах. Длина волны  $\lambda$  – горизонтальное расстояние между вершинами двух смежных гребней на волновом профиле, проведенном в генеральном направлении распространения волн. Крутизна волны – отношение высоты данной волны к ее длине. Крутизна волны в различных точках волнового профиля различна. Для удобства

характеристики крутизны волны пользуются отношением высоты к длине  $\frac{h}{\lambda}$ , называемое средней крутизной волны. Частота формы волны:  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

Перечисленные элементы определяют геометрические характеристики волны.

Кроме геометрических характеристик волн, определяющими являются кинематические элементы. К ним относятся: период волны  $T$  – интервал времени между прохождением двух смежных вершин волн через фиксированную вертикаль; частота волн во времени, или угловая скорость трохоидаальной волны  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . Период волны  $T$  можно определить по ее орбите, а для стоячей волны период определяется промежутком времени, за которое совершается полное колебание уровня. Скорость распространения волны или фазовая скорость  $v_{\phi}$  – скорость перемещения гребня волны в направлении ее распространения, то есть за период волны  $T$ , профиль волны сместится на расстояние, равное длине волны  $\lambda$ . Фазовая скорость распространения волны,  $v_{\phi}$ , м/с.

$$v_{\phi} = \frac{\lambda}{T}, \quad (2.1)$$

где  $T$  – период волны, с.

Реальные ветровые волны всегда трехмерные, и для них, как и для стоячих волн, период волны по скорости перемещения волн определяется в одной точке.

При изучении элементов отдельной волны и их изменения обычно используется идеализированная волна, в качестве которой выбирается трохоидаальная. Это двухмерная волна, частицы которой вращаются по правильным окружностям, причем частицы, находящиеся на одной вертикали, колеблются синфазно. Трохоидаальная теория волн называется теорией волн для глубокого моря. Выразим параметры трохоидаальной волны. Угловую скорость элементарного объема воды  $\omega$  в некоторой точке определяем по формуле

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (2.2)$$

Длина волны

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2}, \quad (2.3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Скорость перемещения волны в направлении ее распространения с учетом выражения (2.3), то есть фазовая скорость,  $v_\phi$ ,  $\text{м/с}$ :

$$v_\phi = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}. \quad (2.4)$$

Фазовая скорость трохойдальной волны определяется ее длиной и не зависит от высоты волны. Волны большей длины распространяются с большей фазовой скоростью. Из приведенных формул получим соотношения для периода волны  $T$ , с.

$$T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}, \quad (2.5)$$

и угловой скорости волны  $\omega$ ,  $1/\text{с}$ :

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}}. \quad (2.6)$$

Длина волны, а значит, их скорость и период с глубиной не меняются. При волнении частицы воды движутся по круговым орбитам; радиусы орбит, по которым вращаются частицы, уменьшаются с глубиной по экспоненциальному закону и тем быстрее, чем короче волна. При этом радиус орбиты, по которым вращаются частицы,  $r_1$ , м, определится как:

$$r_1 = r_0 \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot Z}{\lambda}}, \quad (2.7)$$

где  $Z$  – вертикальное расстояние вниз от поверхности воды, м.

Высота волны  $H = 2r$ . Радиус орбиты частиц равен половине высоты волны на данной глубине. Заменяя  $r_0 = H_0/2$ , получим выражение, определяющее изменение высоты волны с глубиной

$$H = \frac{H_0}{2} \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot Z}{\lambda}}, \quad (2.8)$$

где  $H_0$  – высота волны на поверхности моря, м.

Следовательно, при убывании радиусов орбит частиц убывает и высота волны. На глубине, равной половине длины волны ( $Z = \lambda/2$ ), высота волны уменьшается в 23 раза, а на глубине, равной длине волны ( $Z = \lambda$ ) – в 6535 раз.

При глубине  $Z$  много больше длины волны  $\lambda$  ( $Z > \lambda$ ) волновые колебания отсутствуют [66]. При глубине  $Z = \lambda$  волновые колебания имеют очень малую величину, и при  $Z = \frac{1}{2} \lambda$  волновые колебания имеют наибольшее значение, при том, что  $Z$  доходит из глубины до центра волны.

Приведенная связь глубины моря и длины волны позволяет оценить глубину, на которой волны практически исчезают. Эта глубина может быть принята равной половине длине волны. На глубине, равной длине волны на поверхности, волнение практически отсутствует [66]. В соответствии с формулой (2.1) скорость распространения волны зависит только от ее длины. С глубиной она не изменяется, так же не изменяются период и длина волны.

Энергия частиц при волнении складывается из кинетической энергии, не меняющейся при их движении по орбите (круг трохоиды), и потенциальной, которая меняется, так как при движении по орбите меняется высота частиц над уровнем моря. Если центр орбиты частицы совпадает с положением частицы в состоянии покоя, средняя потенциальная энергия за один оборот частицы по орбите была бы равна нулю. В действительности центр орбиты частицы несколько приподнят над положением покоя и осредненное за период значение потенциальной энергии будет отличаться от нуля, и зависит от величины превышения центров орбит над положением частиц в покое. На рисунке 2.2 [67] показан профиль волны.

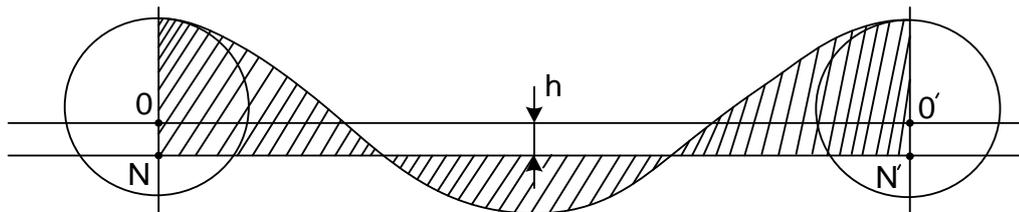


Рисунок 2.2 – Изображение профиля для расчета потенциальной энергии [67]

Трохоидальная волна не уравновешена относительно прямой линии, соединяющей центры катящейся окружности. Для определения уровня, соответствующего нулевому значению потенциальной энергии проведем линию  $NN'$ , которая делит площадь поперечного сечения волны на две равновеликие части. Как показано на рисунке 2.2, эта линия проходит ниже линии  $OO'$ , соединяющей центры орбит. Линия  $NN'$  соответствует положению частиц в спокойном состоянии, когда потенциальная энергия равна нулю. Следовательно, величина  $h$  определяет отклонение среднего положения частиц при волнении относительно состояния покоя. Потенциальная энергия элементарного объема воды массой  $m$  будет равна  $mgh$ . Математически определено [67], что среднее превышение частицы  $h$  для трохоиды

$$h = \frac{\pi r^2}{\lambda}. \quad (2.9)$$

Потенциальная энергия  $\Delta E_{\text{п}}$ , Дж, элементарного объема воды, имеющего массу  $m$ , кг, будет равна:

$$\Delta E_{\text{п}} = \frac{mg\pi r^2}{\lambda}, \quad (2.10)$$

Кинетическая энергия  $\Delta E_{\text{к}}$ , Дж, элементарного объема воды массой  $m$

$$\Delta E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}, \quad (2.11)$$

где  $v$  – линейная скорость движения частицы по орбите, м/с.

$$v = r \cdot \omega; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}; \quad v = r \cdot \omega. \quad (2.12)$$

С учетом формул (2.12) кинетическая энергия элементарного объема воды массой  $m$  будет равна:

$$\Delta E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega^2 r^2}{2} = \frac{m4\pi^2 r^2}{2T^2} = \frac{4\pi^2 mgr^2}{4\pi\lambda} = \frac{mg\pi r^2}{\lambda}. \quad (2.13)$$

Кинетическая энергия элементарного объема воды массой  $m$  равна его же потенциальной энергии  $\Delta E_{\text{к}} = \Delta E_{\text{п}}$ . Полная энергия равна сумме кинетической и потенциальной энергии:

$$\Delta E = \Delta E_{\text{к}} + \Delta E_{\text{п}} = \frac{2mg\pi r^2}{\lambda}. \quad (2.14)$$

Количество энергии  $dE$ , Дж, которым обладает волна воды шириной  $dl$ , с основанием, равным единице и плотностью морской волны  $\rho$  можно определить по формуле:

$$dE = \frac{2g\rho\pi r^2 dl}{\lambda}. \quad (2.15)$$

Для получения полной энергии, заключенной в волне воды с единичным основанием, то есть энергии, приходящейся на единицу поверхности волны, проинтегрируем это выражение по всей толще от нуля до бесконечности

$$E = \int_0^\infty 2gp \frac{\pi r^2}{\lambda} dl, \quad (2.16)$$

так как

$$r = r_0 e^{\frac{-2\pi l}{\lambda}}, \quad (2.17)$$

здесь величина  $r_0 = \frac{h_0}{2}$ ,

то энергия, заключенная под единичной площадью,  $E$ , Дж/м<sup>2</sup>:

$$E = \frac{1}{8} \rho g h_0^2, \quad (2.18)$$

Энергия, заключенная под единичной площадью, зависит только от высоты волны. Быстрое возрастание энергии при росте высоты волны определяется величиной  $h_0^2$ . Основная энергия волны сосредоточена на поверхности воды.

Рассмотрим поток переноса энергии волнами через плоскость, имеющую единичную ширину, совпадающую с направлением распространения волны. Глубину моря будем считать бесконечной. Работа сил давления, рассматриваемая на всей бесконечной полосе,  $W$ , Дж, определяется формулой, установленной в гидромеханике [66]:

$$W = \rho g r^2 \cdot \frac{\lambda}{4}. \quad (2.19)$$

Мощность волны  $N$ , Вт, характеризуется работой, производимой в единицу времени, равна переносимой энергии волн в единицу времени и находится по формуле:

$$N = \frac{W}{T} = \frac{\rho g r^2}{4} \cdot \frac{\lambda}{T} = \frac{\rho g r^2}{T} \cdot v_{\phi}, \quad (2.20)$$

Следовательно, с учетом ранее приводимых формул:

$$N = E \cdot \frac{v_{\phi}}{2}. \quad (2.21)$$

В бесконечно глубоком море полная механическая энергия волны переносится со скоростью вдвое меньшей фазовой скорости волны. Подставляя в приведенное выражение (2.21) значение энергии, заключенной под единичной площадью (2.18), фазовую скорость волны (2.4), и учитывая (2.5), а также, что  $r = \frac{H}{2}$ , получим выражение для мощности, переносимой волной в направлении ее распространения  $N_l$ , Дж/с·м, на единицу ширины волнового фронта:

$$N_l = \rho g^2 h^2 \frac{T}{32\pi}. \quad (2.22)$$

Мощность, переносимая волнами на глубокой воде, пропорциональна квадрату их амплитуды и периоду. Для волновой энергетике наибольший интерес представляют длиннопериодные волны большой высоты.

Для мелкого моря трение существенно изменяет геометрические и кинематические характеристики волн. Из формулы (2.17) следует, что чем меньше глубина моря и больше длина волны, тем слабее должен меняться радиус орбиты. При выходе волны на мелководье орбиты частиц принимают эллиптическую форму с большой осью, вытянутой в направлении распространения волны.

Скорость волны зависит не только от длины, но и от глубины моря:

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \operatorname{th} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot Z, \quad (2.23)$$

где  $v$  – скорость волны, м/с.

В случае, когда  $Z/\lambda$  велико, гиперболический тангенс стремится к единице  $\operatorname{th} \left( \frac{2\pi Z}{\lambda} \right) \Rightarrow 1$  и формула (2.23) принимает вид:

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}. \quad (2.24)$$

Волны, удовлетворяющие отношению  $Z > 0,5\lambda$ , называются короткими. Для волн, имеющих длину меньше удвоенной глубины моря, при нахождении параметров поверхностных волн на некотором удалении от береговой черты при  $Z/\lambda < 0,1$  значения тангенса и его аргумента становятся равными друг другу. Из формулы (2.23) получают формулу для фазовой скорости таких волн

$$v_{\phi} = \sqrt{gZ}. \quad (2.25)$$

Из выражения (2.25) видно, что скорость распространения этих волн зависит только от глубины моря. При  $Z/\lambda < 0,1$  волны называются длинными – это приливные волны.

В интервале  $Z/\lambda < (0,5 \div 0,1)$  волны изменяются от коротких к длинным и называются волнами мелководья или длинными короткопериодными. К ним относятся ветровые волны, распространяющиеся в прибрежной зоне и цунами. При подходе волн к прибрежному мелководью они становятся длинными, размывают дно, а также изменяет дно и берега.

Перемещения масс жидкости в направлении распространения волн не происходит, распространяется только форма движения. Сами частицы жидкости совершают малые колебания по замкнутым орбитам. Крутизна волны  $Z/\lambda$  ограничена предельной формой с острой вершиной (циклоидой) достигнув которой, волна теряет устойчивость и разрушается. Предельная форма волны была исследована Стоксом Д.Г. [68], который показал, что максимально возможная относительная высота волны  $Z/\lambda$  равна  $1/7$ . Фазовая скорость такой предельной волны на 12% больше скорости волны той же длины, но с малой амплитудой.

Волны всегда представляют собой сумму того или иного количества простых волн, распространяющихся в различных направлениях, и имеют различные высоты и периоды.

Одной из разновидностей системы волн является наложение (интерференция) волн, близких между собой по периоду и высоте,

распространяющихся в одном направлении. Результат интерференции двух таких волн показан на рисунке 2.3 [66].

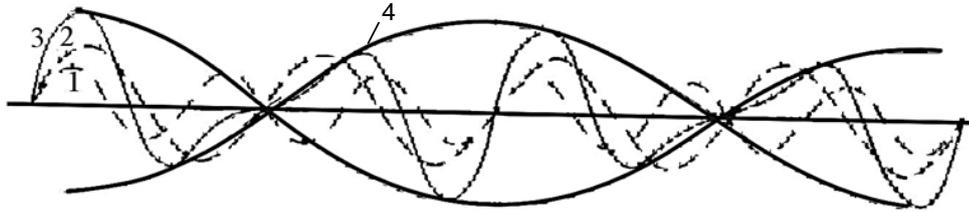


Рисунок 2.3 — Схема наложения (интерференции) волн [66]:

1 и 2 – интерферирующие волны; 3 – результирующая волна; 4 – волновой пакет

Пунктиром показаны интерферирующие волны, сплошной линией – результирующая волна, а тонкой сплошной линией – ее огибающая. Огибающая охватывает две и более результирующих волн, изменяющих свою высоту от почти нулевых значений до наибольшей в данной совокупности, называемой группой волн.

### 2.2.1 Модуляция волн

Интерференция волн приводит к появлению такого явления как «девятый вал», когда через несколько постепенно нарастающих по высоте волн приходит особенно высокая волна, которую называют девятым валом. После этого высота волн начинает уменьшаться до почти спокойного моря, а затем снова начинает возрастать. Самая крупная в групповом пакете волна в динамике своего движения всегда проявляется как малоподвижная или стоячая волна. Девятый вал может иметь двойную высоту, угол склона вблизи гребня может достигать  $60^\circ$ . Явление групповых волн зависит от периодов интерферирующих волн, наибольшая по высоте волна может быть любой, не только девятой.

Огибающая группы волн перемещается вместе с перемещением результирующей волны. Скорость ее перемещения, называемая групповой скоростью, не совпадает с фазовой скоростью интерферирующих волн  $v_{\phi 1}$  и  $v_{\phi 2}$ . Для волн глубокого моря периоды интерферирующих ветровых волн

часто близки между собой и, если принять  $v_{\phi 1} = v_{\phi 2}$  и равными их средней скорости  $v_{\phi}$ , то

$$v_{\phi \text{ гр.}} = \frac{v_{\phi}}{2},$$

где  $v_{\phi \text{ гр.}}$  – групповая скорость волн, м/с.

Скорость перемещения  $v_{\phi \text{ гр.}}$  равна половине фазовой скорости составляющих.

Для мелководного моря групповая скорость зависит от отношения глубины моря  $Z$  к длине волны  $\lambda$ . Групповая скорость волн определяет скорость переноса энергии в направлении их распространения и входит в уравнение баланса энергии волн. В таблице 2.1 [68], приведены период –  $T$ , с; длина –  $\lambda$ , м; фазовая скорость –  $v_{\phi}$ , м/с и максимальная амплитуда –  $A_m$ , м обрушающейся ветровой волны.

Таблица 2.1 – Оценка морских волн с периодами от 1 до 15 секунд [68]

$T$ , сек	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\lambda$ , м	1,6	6,2	14,1	25	39	56	77	100	126	156	189	225	264	351	451
$v_{\phi}$ , м/с	1,6	3,1	4,7	6,2	7,0	9,4	10,9	12,5	14,1	15,6	17,2	18,7	20,3	21,9	23,4
$A_{\text{max}}$ , м	0,2	0,7	1,7	3,0	4,7	6,7	9,2	12	15	18	23	27	32	42	54

Поток воды движется со скоростью, равной скорости фронта волны  $v_{\phi}$ . Для моря характерными являются периоды волн от 6 до 8 секунд, что соответствует длине волны около 80 м, максимальной скорости потока в гребне волны 10 м/с и максимальной амплитуде волны около 10 м. В открытом океане период волн может достигать более 15 секунд, но только для волн зыби, имеющих малую амплитуду без обрушающихся гребней.

На побережье открытого океана, при прохождении штормов, наблюдаются волны с периодами 11 – 13 с, высота которых существенно выше, чем у волн открытого моря. Поэтому плавание судов вблизи побережья или около морских отмелей представляет повышенную опасность.

Реальные ветровые волны всегда трехмерные, и для них так же, как и для стоячих волн, трудно определится период по скорости перемещения гребня. В этом случае введены понятия периода волны в одной точке и высоты трехмерных волн. Скорость поступательного движения частиц, то есть скорость волнового течения, за период волны уменьшается с глубиной.

Осредненная за период волны скорость волнового течения  $v_\phi$  на поверхности определяется формулой Стокса через радиус орбиты частицы на поверхности  $r_0$ , ее скорость  $v_B$  и длину волны  $\lambda$

$$v_\phi = r_0^2 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 v_B. \quad (2.26)$$

Так как радиус орбит частиц убывает с глубиной по экспоненциальному закону  $r = r_0 e^{-\frac{2\pi Z}{\lambda}}$ , то скорость волнового течения  $v_{B,Z}$  на глубине  $Z$  определяется формулой:

$$v_{B,Z} = r_0^2 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 v_B e^{-\frac{2\pi Z}{\lambda}}, \quad (2.27)$$

средняя ее величина за полный период волны зависит от высоты и длины волны и быстро уменьшается с глубиной, но на поверхности может быть существенной.

Если применить принцип наложения к волнам с различными амплитудами и существенно отличающимися частотами, распространяющимися в одном направлении, то результирующая кривая, если профиль результирующей волны подвергнем гармоническому анализу, представима в виде суммы некоторого числа простых гармонических составляющих с разными частотами и различными амплитудами. Принцип суперпозиции лежит в основе спектрального метода расчета морского ветрового волнения. Волновая поверхность получается как результат

наложения большого числа ветровых волн с различными длинами и направлениями распространения. Для полной количественной оценки необходимо иметь данные амплитуды и начальные фазы каждой гармонической составляющей, распространяющейся в определенном направлении. Количественные оценки волнения осуществляются спектральным методом с помощью энергетических соотношений.

Поскольку полная механическая энергия волны, приходящаяся на единицу длины ее гребня, пропорциональна квадрату ее амплитуды:

$$E_{ij} \sim A_{ij}^2 \Rightarrow A_{ij} = \sqrt{\frac{2E_{ij}}{\rho g}} = \sqrt{r_{ij}^2}, \quad (2.28)$$

энергию каждой  $i$ -той гармонической составляющей волнения, имеющей  $j$ -тое направление распространения, приходящуюся на каждую гармоническую составляющую спектра можно рассчитать следующим способом. Рассмотрим элементарный участок поверхности моря, на границах которого расположены системы волн с частотами от  $\omega$  до  $\omega + \Delta\omega$  и с направлениями распространения от  $U$  до  $U + \Delta U$ . Обозначим через  $S$  удельную энергию волн – количество энергии, приходящейся на единицу площади поверхности моря, зависящую от того какая из гармонических составляющих волнения располагается на выделенной единичной площадке  $S = S(\omega, u)$ . Энергия  $i$ -той гармонической составляющей с  $j$ -тым направлением, приходящаяся на бесконечно малый интервал частот  $\Delta\omega$  и направлений распространения  $\Delta U$  будет равна

$$E_{ij} = S(\omega, u)\Delta\omega\Delta u. \quad (2.29)$$

С учетом (2.29) амплитуда этой составляющей

$$A_{ij} = \sqrt{\frac{2S(\omega, u)}{\rho g}} \cdot \sqrt{\Delta\omega\Delta u}, \quad (2.30)$$

где  $S(\omega, u)$  – двухмерная спектральная плотность волнения или двухмерный энергетический спектр,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ .

Формула (2.30) позволяет определить амплитуды гармонических составляющих через их удельную энергию  $S$ . Функция  $S(\omega, u)$ , характеризующая распределение удельной энергии волн по частотам и направления распространения, называется двумерной спектральной плотностью волнения или двумерным энергетическим спектром. Если эту функцию проинтегрировать по всем возможным углам  $U$ , например от 0 до  $2\pi$ , то получим одномерный энергетический спектр, называемый частотным. В гидромеханике, с помощью двумерного энергетического спектра принято количественно оценивать трехмерное морское волнение, а с помощью частотного – двумерное. Спектральная плотность измеряется в  $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $S(\omega)[\text{м}^2 \cdot \text{с}]$ . Как и любое колебание, волны можно представлять в виде наложения гармонических волн, изменяющихся по синусоидальному закону с различными параметрами. Уравнение одномерной гармонической волны:

$$\varphi(x, t) = A \sin \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi \right], \quad (2.31)$$

или

$$\varphi(x, t) = A \sin(\omega T - kx + \varphi), \quad (2.32)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний, м;

$k = 2\pi/\lambda$ , – волновое число (количество волн, уменьшающих), 1/м;

$\omega$  – циклическая частота, 1/с;

$T$  – период волны, с,  $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu}$ ;

$\nu$  – линейная частота колебания частицы в волне, 1/с;

$\lambda$  – длина волны, м;

$\varphi$  – отклонение частиц от положений в волне.

В волновом движении в упругой среде отсутствует перенос материи. При колебании волн морской воды присутствует перенос материи. В зависимости от направления колебания в волне частиц среды (воды), волны бывают продольными и поперечными. В продольных волнах частицы колеблются вдоль распространения волны. В поперечных волнах колебания частиц

перпендикулярно к направлению волны. В гравитационных волнах, содержащих в себе компоненты и продольных и поперечных колебаний, например, возникающие на поверхности вод частицы совершают вертикальные движения по окружности с радиусом, убывающим с глубиной [69].

Источник волн, воздействуя на примыкающие к нему объемы, непрерывно передает им энергию, которая перемещает волну в водной среде.

При распространении продольной волны, характеризующимся уравнением (2.32), можно определить изменение энергии объема  $dV$ . В качестве объема  $dV$  выберем элементарный цилиндр (рисунок 2.4). Волна веса  $P$  и радиуса  $r$  приводится в движение под действием силы волны  $F_1$  и силы ветра  $F_2$ .

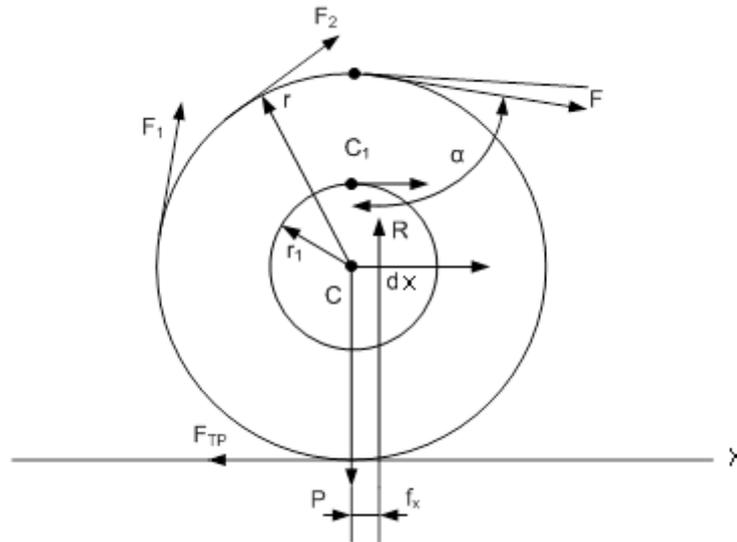


Рисунок 2.4 – Характеристика продольной волны

На рисунке 2.4:

$R$  – нормальная сила реакции плоскости воды, смещенная относительно центра инерции  $C$  волны на величину коэффициента трения качения  $f_k$  в сторону движения;

$F$  – сила реакции гребня волны, равная по модулю силе, приложенной к волне;

$F_{тр}$  – сила трения волны о горизонтальную плоскость водной поверхности.

В соответствии с направлением оси  $X$  принимаем положительное направление угла спадания волны  $\alpha$ .

Запишем теорему об изменении кинетической энергии системы материальных точек при движении волны под действием силы  $F$  и скорости центра инерции  $C$  волны в момент, когда он переместится на расстояние  $dx$ :

$$E_2 - E_1 = \sum_{k=1}^n A_p(F_k^l) + \sum_{k=1}^n A_p(F_k^i). \quad (2.33)$$

Так как волна является неизменяемой материальной системой, то сумма работ  $A_p$  внутренних сил равна нулю, следовательно

$$E_2 - E_1 = \sum_{k=1}^n A_p(F_k^l). \quad (2.34)$$

Центр инерции  $C$  волны перемещается под действием силы волны и силы ветра на элементарное расстояние  $dx$ , направленное по оси  $X$  вправо. Элементарное угловое перемещение волны  $d\varphi$  связано с элементарным перемещением  $dx$  центра тяжести  $C$  зависимостью

$$dx = r \cdot d\varphi, \quad (2.35)$$

где  $d\varphi$  – элементарное угловое перемещение волны вокруг мгновенного центра скоростей.

Работа внешних сил по элементарному перемещению  $dx$  имеет вид:

$$\delta A_p = \delta A_p(P) + \delta A_{p_{т.к.}} + \delta A_p(F) + \delta A_p(F_{т.п.}). \quad (2.36)$$

Так как перемещение центра инерции  $C$  происходит по горизонтали, то

$$\delta A_p(P) = 0. \quad (2.37)$$

Элементарная работа трения качения

$$\delta A_{p_{т.к.}} = -m_{т.к.} d\varphi. \quad (2.38)$$

Работа пары трения качения отрицательна, так как направление момента пары противоположно направлению движения волны.

Так как

$$m_{т.к.} = N \cdot f_k = (P - F \sin \alpha) f_k, \quad (2.39)$$

то, принимая во внимание формулу (2.35), находим

$$\delta A_{p_{т.к.}} = -(P - F \sin \alpha) f_k \frac{dx}{r}. \quad (2.40)$$

Сила трения  $F_{\text{т.р.}}$  не совершает работы (при качении без скольжения  $v_{\phi}=0$ ).

$$\delta A_p(F_{\text{т.р.}}) = F_{\text{т.р.}} \cdot v_{\phi} \cdot dt = 0. \quad (2.41)$$

Вычислим элементарную работу силы  $F$ . Выберем за полюс точку  $C$ , тогда

$$\delta A_p(F) = F \cdot dx + m_c d\varphi, \quad (2.42)$$

где  $dx$  – вектор элементарного перемещения центра инерции  $C$ , м;

$m_c$  – момент силы  $F$  относительно оси, проходящей через точку  $C$  перпендикулярно к неподвижной плоскости, т.е.  $m_c = F \cdot r_1$ , Н·м.

Тогда

$$\delta A_p(F) = F dx \cdot \cos \alpha + F \cdot r_1 d\varphi. \quad (2.43)$$

Учитывая формулу (2.35), получим

$$\delta A_p(F) = \frac{F}{r} (r_1 + r \cos \alpha) dx. \quad (2.44)$$

После подстановки формул (2.37), (2.40), (2.41), (2.34) в (2.32), получим элементарную работу внешних сил, приложенных к волне при элементарном перемещении  $dx$ :

$$\delta A_p = \left[ F(r_1 + r \cos \alpha) - f_k(P - F \sin \alpha) \right] \frac{dx}{r}. \quad (2.45)$$

Для определения суммы работ внешних сил на перемещение центра инерции  $C$  следует, воспользовавшись формулой (2.45), взять определенный интеграл в пределах от 0 до  $\infty$ . В результате получим:

$$\sum A_p(F_k^l) = \left[ F(r_1 + r \cos \alpha) - f_k(P - F \sin \alpha) \right] \frac{x}{r}. \quad (2.46)$$

Вычислим кинетическую энергию волн, если в начальном положении волна была в покое, то есть

$$E_1 = 0. \quad (2.47)$$

Кинетическая энергия  $E$ , Дж, в конечном положении волны равна

$$E_2 = \frac{1}{2} m v_e^2 + \frac{1}{2} I_c \omega^2, \quad (2.48)$$

где  $m = \frac{P}{g}$  – масса волны, кг;

$I_c = \frac{P}{g} \rho_{in}^2$  – момент инерции, кг·м<sup>2</sup>;

$\rho_{in}$  – радиус инерции;

$\omega = \frac{v_B}{r}$  – угловая скорость, 1/с.

Следовательно,

$$E_2 = \frac{1}{2} \frac{P}{g} \cdot v_B^2 \left( 1 + \frac{\rho_{in}^2}{r^2} \right). \quad (2.49)$$

Подставив (2.46), (2.47), (2.49) в уравнение (2.34) и решив это уравнение относительно  $v_B$ , находим искомую скорость центра волны  $C$

$$v_B = \sqrt{\frac{2grx}{r^2 + \rho_{in}^2} [F(r_1 + r \cos \alpha) - (P - F \sin \alpha) f_k]}. \quad (2.50)$$

Из формулы (2.50) видно, что волна находится в движении, если модуль силы  $F$  удовлетворяет условию:

$$F > \frac{P f_k}{r_1 + r \cdot \cos \alpha + f_k \cdot \sin \alpha}. \quad (2.51)$$

При определении трения скольжения  $f_k$  жидкости имеет значение вязкость  $\eta$ , которая зависит от температуры  $t_0$  воды. Вязкость воды равна 1 при 20° С.

Теоретическое описание закономерностей зарождения и развития морских волн показывает, что очень сложно создать устройство, которое было бы в состоянии использовать огромную энергию, переносимую волнами, для преобразования этой энергии в электрическую энергию с большим коэффициентом полезной мощности. Но исследования и разработки в создании таких устройств являются актуальнейшей задачей.

### 2.2.2 Расчет кинетической энергии трохoidalной волны по фазовой скорости

Трохоида описывается параметрическим уравнением:

$$\begin{cases} x = rt - h \sin t; \\ y = r - h \cos t, \end{cases} \quad (2.52)$$

где  $x$  – направление распространения волны, м;

$y$  – ордината волны трохойды, м;

$r$  – радиус производящей окружности, м;

$h$  – расстояние от точки до центра окружности, м;

Профиль волны представляет перевернутую трохойду (рисунок 2.5):

$$-y = h \cos t - r.$$

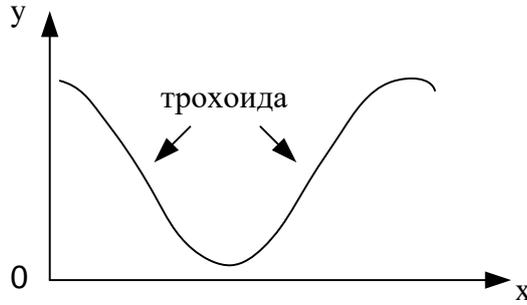


Рисунок 2.5 – Трохоида

После переноса начала отсчета оси  $y$  в нижнюю точку трохойды (рис. 2.6) получим

После переноса начала отсчета оси  $y$  в нижнюю точку трохойды (рисунок 2.6) получим:

$$-y + h + r = h \cos t - r + h + r = h(1 + \cos t).$$

Таким образом волна описывается уравнениями:

$$\begin{cases} x = rt - h \sin t \\ y = h(1 + \cos t) \end{cases} \quad (2.53)$$

Высота волн  $H = 2h \Rightarrow y = \frac{H}{2} (1 + \cos t)$ .

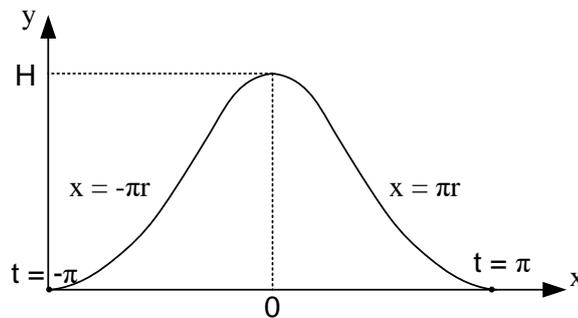


Рисунок 2.6 — Профиль волны

Минимальное значение  $y=0$  будет при  $t_1 = -\pi$  и  $t_2 = \pi$ .  
Соответствующие значения  $x$  будут такие:

$$\begin{aligned} x = rt - h \sin t & \rightarrow x_1 = r(-\pi) - h \sin(-\pi) = -\pi r; \\ & \rightarrow x_2 = r(\pi) - h \sin(\pi) = \pi r. \end{aligned}$$

При  $t_1 = -\pi$

$$x_1 = r(-\pi) - h \sin(-\pi) = -\pi r.$$

При  $t_2 = \pi$

$$x_2 = r(\pi) - h \sin(\pi) = \pi r.$$

Тогда длина волны

$$\lambda = x_2 - x_1 = \pi r - (-\pi r) = 2\pi r, \quad (2.54)$$

откуда радиус

$$r = \frac{\lambda}{2\pi},$$

а так как волновое число  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ , то  $r = \frac{1}{K}$ .

Таким образом, окончательно получаем уравнение волны в параметрическом виде как функцию ее высоты  $H$  и длины  $\lambda$ :

$$\begin{cases} x(t) = \frac{t}{K} - \frac{H}{2} \sin(t) \\ y(t) = \frac{H}{2} (1 + \cos(t)) \end{cases} \quad (2.55)$$

Найдем площадь под трохойдой в пределах по  $x$  от 0 до  $\lambda$ , по параметру  $t$ , это от  $-\pi$  до  $\pi$ .

$$\begin{aligned} S &= \int_{-\pi}^{\pi} y(t) d(x(t)) = \int_{-\pi}^{\pi} y(t) x'(t) dt = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{H}{2} (1 + \cos(t)) \left( \frac{t}{K} - \frac{H}{2} \sin(t) \right)' dt = \\ &= \frac{H}{2} \int_{-\pi}^{\pi} (1 + \cos(t)) \left( \frac{1}{K} - \frac{H}{2} \cos(t) \right) dt = \frac{H}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \left( \frac{1}{K} - \frac{H}{2} \cos(t) \right) + \frac{\cos(t)}{K} - \\ &\quad - \frac{H}{2} \cos^2(t) dt. \end{aligned} \quad (2.56)$$

$$S = \frac{H}{2} \left[ \left( \frac{t}{K} - \frac{H}{2} \sin(t) + \frac{\sin(t)}{K} - \frac{H}{2} \left( \frac{t}{2} + \frac{\sin(2t)}{4} \right) \right) \right] \Big|_{-\pi}^{\pi} \quad (2.57)$$

Подставим  $\sin(t) = \sin(2t) = 0$ , получаем

$$S = \frac{H}{2} \left( t \left( \frac{1}{K} - \frac{H}{4} \right) \right) \Big|_{-\pi}^{\pi} = \frac{H}{2} \left( \frac{1}{K} - \frac{H}{2} \right) \cdot (t) \Big|_{-\pi}^{\pi} = \frac{H}{2} \left( \frac{1}{K} - \frac{H}{4} \right) \cdot 2\pi = \pi H \left( \frac{1}{K} - \frac{H}{4} \right). \quad (2.57)$$

Так как  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ , то площадь

$$S = \pi H \left( \frac{\lambda}{2\pi} - \frac{H}{4} \right) \pi H \frac{2\lambda - \pi H}{4\pi} = \frac{H}{4} (2\lambda - \pi H). \quad (2.58)$$

Получим площадь сечения  $S$ ,  $m^2$ , трохоидалной волны

$$S = \frac{H}{4} (2\lambda - \pi H). \quad (2.60)$$

Отрицательное число в скобках не может получиться, так как для требуемой трохойды должно быть  $r > h$  (она называется – укороченная циклоида) и так как  $r = \frac{\lambda}{2\pi}$ , а  $h = \frac{H}{2}$ , следовательно

$$\frac{\lambda}{2\pi} > \frac{H}{2},$$

откуда

$$H < \frac{\lambda}{\pi}$$

и длина волны

$$\lambda > \pi H. \quad (2.61)$$

Найдем объем волны.

$$dV = S dx;$$

$$V = \int S dx = S \int dx.$$

Для контура волны, показанной на рисунке 2.7, имеем

$$V = S \int_0^l dx = \frac{H}{4} (2\lambda - \pi H) \cdot l. \quad (2.62)$$

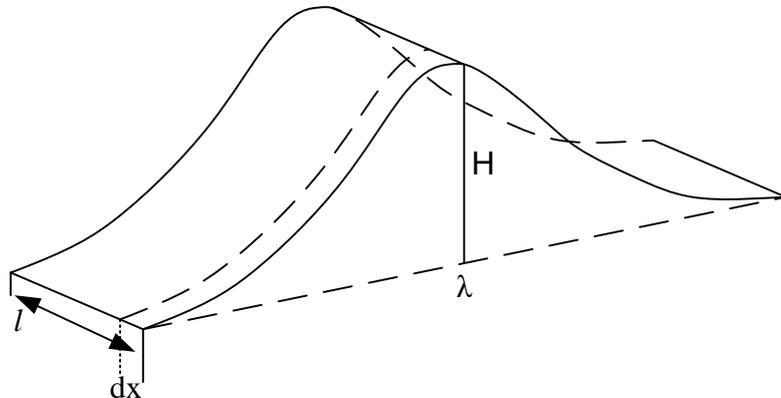


Рисунок 2.7 — Контур волны

Масса волны  $m$ , кг,

$$m = \rho V = \rho \frac{lH}{4} \cdot (2\lambda - \pi H), \quad (2.63)$$

где  $\rho$  – плотность морской воды, кг/м<sup>3</sup>;

$l$  – ширина волны, м;

$H$  – высота волны, м.

Скорость (фазовую) волны определим по формуле:

$$v_{\phi} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \cdot th\left(\frac{2\pi y}{\lambda}\right)}, \quad (2.64)$$

где  $y$  – глубина моря, м.

Для  $\frac{y}{\lambda} < 0,1$ ;  $th\left(\frac{2\pi y}{\lambda}\right) \approx \frac{2\pi y}{\lambda}$ .

Тогда фазовая скорость:

$$v_{\phi} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \cdot \frac{2\pi y}{\lambda}} = \sqrt{gy}. \quad (2.65)$$

Найдем кинетическую энергию волны по формуле

$$E_K = \frac{mv_{\phi}^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{\rho l H}{4} (2\lambda - \pi H) \cdot g \cdot y = \frac{1}{8} \rho l H \cdot g \cdot y (2\lambda - \pi H). \quad (2.66)$$

Следовательно, кинетическую энергию  $E_K$ , Дж, волны определяем по формуле:

$$E_K = \frac{1}{8} \rho l H \cdot g \cdot y (2\lambda - \pi H). \quad (2.67)$$

### 2.2.3 Характеристика и показатели волн Черного и Азовского морей

Как было показано ранее, представим волну в синусоидальной форме, уравнение которой имеет вид

$$y = H \sin\left(\frac{2\pi x}{vT}\right), \quad (2.68)$$

где  $H$  – высота волны м;

$x$  – распространение волны, м/с;

$v$  – скорость, м/с;

$T$  – период, с.

Определим поперечную площадь волны для участка  $dx$ ,  $S$ , м<sup>2</sup>:

$$S = \int_0^{v \frac{L}{2}} H \sin\left(\frac{2\pi x}{vT}\right) dx = H \frac{vT}{2} \int_0^{v \frac{L}{2}} \sin\left(\frac{2\pi x}{vT}\right) d\left(\frac{2\pi x}{vT}\right) = H \frac{vT}{2\pi} \cdot 2 = \frac{vTH}{\pi}, \quad (2.69)$$

где  $L$  – половина длины волны, м.

Определим объем волны,  $V$ , м<sup>3</sup>:

$$dV = S dx = \frac{vTH}{\pi} dx, \quad (2.70)$$

$$V = \int_0^l \frac{vTH}{\pi} dx = \frac{vTH \cdot l}{\pi}, \quad (2.71)$$

где  $l$  – ширина волны, м.

Масса волны  $m$ , кг,

$$m = \rho V = \frac{vTHl\rho}{\pi}, \quad (2.72)$$

где  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  – удельная плотность воды.

При попадании волны на препятствие имеем неупругий и упругий удар

Неупругий удар

$$\overline{F}_1 = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{mv - 0}{\Delta t} = \frac{v^2 THl\rho}{\frac{l}{2}\pi} = \frac{2v^2 Hl\rho}{\pi} = \frac{2v^2 Hl\rho}{\pi}. \quad (2.73)$$

Упругий удар

$$\overline{F}_2 = \frac{\overline{F}_1 + \overline{F}_2}{2} = \frac{3v^2 Hl\rho}{\pi} = \frac{3v^2 Hl\rho}{\pi}. \quad (2.74)$$

Масса волны  $m = (2,5 \div 5)$  тонн на один погонный метр.

Период волны

$$T_1 = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3}{9,8}} = 1,39 \text{ с}; \quad T_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5}{9,8}} = 1,79 \text{ с}.$$

Угловая скорость

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} = \sqrt{\frac{6,28 \cdot 9,8}{3}} = 4,53 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{6,28 \cdot 9,8}{5}} = 3,51 \text{ с}^{-1}.$$

Длина волны

$$\lambda_1 = \frac{2\pi g}{\omega^2} = \frac{6,28 \cdot 9,8}{4,53^2} = 3 \text{ м}; \quad \lambda_2 = \frac{6,28 \cdot 9,8}{3,51^2} = 5 \text{ м}.$$

Объем волны

$$V_1 = \frac{v_1 \cdot T_1 \cdot H_1 \cdot l_1}{\pi} = \frac{3 \cdot 1,39 \cdot 1,5 \cdot 0,8}{3,14} = 1,594 \text{ м}^3.$$

где  $v = 3 \text{ М/с}$  – скорость волны;

$T = 1,39 \text{ с}$  – период волны;

$H = 1,5 \text{ м}$  – высота волны;

$l = 0,8 \text{ м}$  – ширина волны;

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

$$V_2 = \frac{v_2 \cdot T_2 \cdot H_2 \cdot l_2}{\pi} = \frac{5 \cdot 1,79 \cdot 2 \cdot 1,5}{3,14} = 18,551 \text{ м}^3.$$

$v_2 = 5 \text{ М/с}$ ;  $T_2 = 1,79 \text{ с}$ ;  $H_2 = 2 \text{ м}$ ;  $l_2 = \tau_2 = 1,5 \text{ с}$ .

Масса волны

$$m_1 = \rho \cdot V_1 = 1000 \frac{3 \cdot 1,39 \cdot 1,5 \cdot 0,8}{3,14} = 1594 \text{ кг},$$

$$m_2 = \rho \cdot V_2 = 8551 \text{ кг}.$$

Определим среднее значение силы удара морской волны при  $H_1, V_1$  и  $H_2, V_2$ .

$$F_1 = \frac{3 \cdot v_1^2 \cdot H_1 \cdot l_1 \cdot \rho}{\pi} = \frac{3 \cdot 9 \cdot 1,5 \cdot 0,8 \cdot 1000}{3,14} = 10320 \text{ Н}.$$

$$F_2 = \frac{3 \cdot v_2^2 \cdot H_2 \cdot l_2 \cdot \rho}{\pi} = \frac{3 \cdot 25 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 1000}{3,14} = 71655 \text{ Н},$$

где  $v_1 = 3 \text{ М/с}$ ;  $H_1 = 1,5 \text{ м}$ ;  $l_1 = \tau_1 = 0,8 \text{ с}$ .

$v_2 = 5 \text{ М/с}$ ;  $H_2 = 2 \text{ м}$ ;  $l_2 = \tau_2 = 1,5 \text{ с}$ .

Потенциальная энергия  $\Delta E_{\text{п}}$ , Дж, объема  $V$ ,  $\text{м}^3$ , воды, имеющего массу  $m$ , при высоте волны  $r = H$ .

$$r_1 = 1,5 \text{ м}; \Delta E_{\text{п1}} = \frac{m_1 \cdot g \cdot \pi \cdot r_1^2}{\lambda_1} = \frac{1594 \cdot 9,8 \cdot 3,14 \cdot 1,5^2}{3} = 36788 \text{ Дж}.$$

$$r_2 = 2 \text{ м}; \Delta E_{\text{п2}} = \frac{m_2 \cdot g \cdot \pi \cdot r_2^2}{\lambda_2} = \frac{8551 \cdot 9,8 \cdot 3,14 \cdot 2^2}{5} = 210505 \text{ Дж}.$$

Кинетическая энергия  $\Delta E_{\text{к}}$  объема воды  $V$  массой  $m$ :

$$\Delta E_{\text{к1}} = \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} = \frac{1594 \cdot 9}{2} = 7173 \text{ Дж};$$

$$\Delta E_{к2} = \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} = \frac{8551 \cdot 25}{2} = 106888 \text{ Дж.}$$

Суммарная энергия волны высотой  $H_1 = 1,5\text{м}$ , скоростью  $v_1 = 3\text{ М/с}$ , массой 1594 кг и  $H_2 = 2\text{м}$ , скоростью  $v_2 = 5\text{ М/с}$ , массой 8551кг.

$$\Delta E_1 = \Delta E_{п1} + \Delta E_{к1} = 36788 + 7173 = 43961 \text{ Дж,}$$

$$\Delta E_2 = \Delta E_{п2} + \Delta E_{к2} = 21055 + 106888 = 317393 \text{ Дж.}$$

Определим основные параметры и энергию, создаваемую морскими волнами высотой  $H_{ср} = 0,4\text{ м}; 0,8\text{ м}; 1\text{ м}; 4\text{ м}$  (таблица 2.2).

1кВт·ч = 3600 кДж. Для определения мощности волны, энергию волны E, Дж разделим на период волны T, с:

$$N = \frac{E}{T},$$

$$1\text{кВт} \cdot \text{с} = \frac{3600}{3600} \text{кДж} = 1\text{кДж.}$$

Таблица 2.2 – Энергетические параметры волны

H,м	1,5	0,4	0,8	1	4	H = 2	0,4	0,8	1	4
$\lambda$ ,м	3	0,8	1,6	2	8	$\lambda = 5$	1	2	2,5	10
$v$ , $\frac{\text{М}}{\text{с}}$	3	0,8	1,6	2	8	V = 5	1	2	2,5	10
T,с	1,39	0,716	1,0126	1,152	2,264	T = 1,79	0,799	1,129	1,263	2,53
V, м <sup>3</sup>	1,594	0,06	0,66	1,442	13,59	V = 8,551	0,102	1,073	1,586	17,95
m,кг	1594	60	660	1442	13590	8551	102	1073	1586	17950
F,Н	38694	196	3131	7643	1956688	238853	382	6115	14928	3821656
E, кДж	43,96	0,05	1,674	5,24	7,066	317,4	0,102	3,762	11	17734
N, кВт	31,63	0,07	1,653	4,55	3121	177,3	0,127	3,332	8,71	7009

Из указанной таблицы необходимо исключить среднее значение силы удара и энергии при высоте волн 4 м и более, при скорости волн  $5\text{ М/с}$ , так как это соответствует шторму и при этих параметрах энергоустановка по преобразованию энергии морской волны в электрическую энергию может быть

выведена из строя, что аналогично работе ветроэнергостановки при скорости ветра более  $25 \text{ м/с}$ .

$N$  – мощность волны.

Определим энергию волны при различных значениях объемов  $V$  волны и параметров: период волны -  $T$ , высота волны -  $H$ , ширина волны -  $l$ .

$$H = 0,4 \text{ м}; V_1 = \frac{vTHl}{\pi} = \frac{0,8 \cdot 0,716 \cdot 0,4 \cdot 0,8}{3,14} = 0,058 \text{ м}^3;$$

$$H = 0,8 \text{ м}; V_2 = \frac{1,6 \cdot 1,0126 \cdot 0,8 \cdot 1,6}{3,14} = 0,66 \text{ м}^3;$$

$$H = 1 \text{ м}; V_3 = \frac{2 \cdot 1,152 \cdot 1 \cdot 2}{3,14} = 1,468 \text{ м}^3;$$

$$H = 4 \text{ м}; V_4 = \frac{18 \cdot 2,264 \cdot 4 \cdot 8}{3,14} = 184,58 \text{ м}^3;$$

$$H = 0,4 \text{ м}; V'_2 = \frac{1 \cdot 0,799 \cdot 0,4 \cdot 1}{3,14} = 0,102 \text{ м}^3;$$

$$H = 0,8 \text{ м}; V'_3 = \frac{2 \cdot 1,229 \cdot 0,8 \cdot 2}{3,14} = 1,252 \text{ м}^3;$$

$$H = 1 \text{ м}; V'_4 = \frac{2,5 \cdot 1,263 \cdot 1 \cdot 2,5}{3,14} = 2,51 \text{ м}^3;$$

$$H = 4 \text{ м}; V'_5 = \frac{10 \cdot 2,53 \cdot 4 \cdot 10}{3,14} = 322,3 \text{ м}^3;$$

$$E_{п1} = \frac{mg\pi r^2}{\lambda} = \frac{\rho V \pi r^2}{\lambda} = \frac{1000 \cdot 0,058 \cdot 3,14 \cdot 0,4^2}{0,8} = 36,424 \text{ Дж};$$

$$E_{п2} = \frac{1000 \cdot 0,66 \cdot 3,14 \cdot 0,8^2}{1,6} = 829 \text{ Дж};$$

$$E_{п3} = \frac{1000 \cdot 1,468 \cdot 3,14 \cdot 1^2}{2} = 2304,76 \text{ Дж};$$

$$E_{п4} = \frac{1000 \cdot 184,58 \cdot 3,14 \cdot 4^2}{18} = 1159162 \text{ Дж};$$

$$E'_{п2} = \frac{1000 \cdot 0,102 \cdot 3,14 \cdot 0,4^2}{1} = 51,245 \text{ Дж};$$

$$E'_{п3} = \frac{1000 \cdot 1,152 \cdot 3,14 \cdot 0,8^2}{2} = 1258 \text{ Дж};$$

$$E'_{п4} = \frac{1000 \cdot 2,51 \cdot 3,14 \cdot 1^2}{2,5} = 3152,5 \text{ Дж};$$

$$E'_{п5} = \frac{1000 \cdot 322,3 \cdot 3,14 \cdot 4^2}{10} = 1619235 \text{ Дж};$$

$$E_{к1} = \frac{mV^2}{2} = \frac{1000 \cdot 0,058 \cdot 0,8^2}{2} = 18,56 \text{ Дж};$$

$$E_{к2} = \frac{1000 \cdot 0,66 \cdot 1,6^2}{2} = 844,8 \text{ Дж};$$

$$E_{к3} = \frac{1000 \cdot 1,468 \cdot 2^2}{2} = 2936 \text{ Дж};$$

$$E_{к4} = \frac{1000 \cdot 184,58 \cdot 8^2}{2} = 5906560 \text{ Дж};$$

$$E'_{к2} = \frac{1000 \cdot 0,102 \cdot 1^2}{2} = 51 \text{ Дж};$$

$$E'_{к3} = \frac{1000 \cdot 1,252 \cdot 2^2}{2} = 2504 \text{ Дж};$$

$$E'_{к4} = \frac{1000 \cdot 2,51 \cdot 25^2}{2} = 7843,75 \text{ Дж};$$

$$E'_{к5} = \frac{1000 \cdot 322,3 \cdot 10^2}{2} = 16115000 \text{ Дж};$$

$$E = E_{п} + E_{к}.$$

Рассмотрим технические и энергетические параметры энергии морских волн Черного моря на основе гидрографических данных [70] исследования карты, вычисленной средней значимой высоты волны и периода зимой и летом в прибрежной зоне Крыма (рисунок 2.8).

Черное море:

Максимальная глубина – 2258 м;

Объем воды – 555000 км<sup>3</sup>;

Площадь – 423000 км<sup>3</sup>;

Длина береговой линии – 4125 км;

Высота волны  $H = 0,7 \div 1,2$  м.

Среднегодовой поток волны – 3,48 кВт/м.

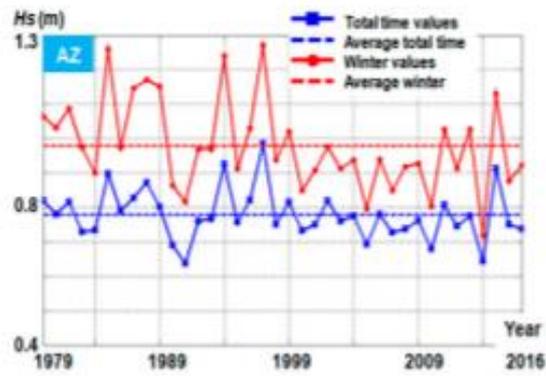
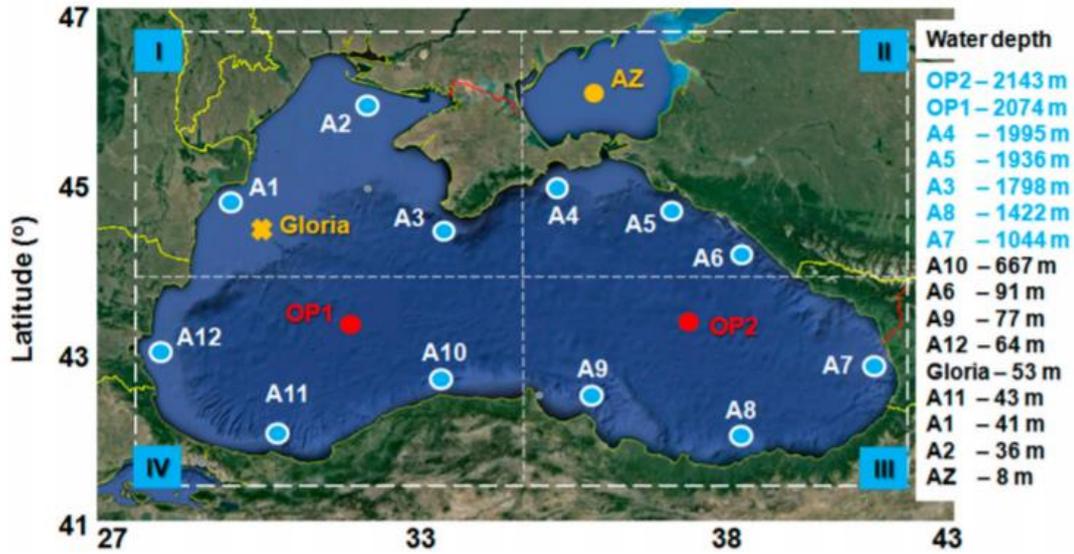
Усредненные значения высоты волны –  $H$ (м), ширина волны –  $l$ (м) и период –  $T$ (с) в зимнее время имеют значения:  $H = (0,5 \div 1,2)$  м;  $l = 5$  м;  $T = 2$  с, при скорости волны  $v = 3$  м/с.

а) при высоте волны 0,5 м определим объем волны

$$V_1 = \frac{v \cdot T \cdot H_1 \cdot l}{\pi} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 5}{3,14} = 4,777 \text{ м}^3.$$

б) при высоте волны 1,2 м объем волны равен

$$V_2 = \frac{v \cdot T \cdot H_2 \cdot l}{\pi} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 5}{3,14} = 11,465 \text{ м}^3.$$



(b)

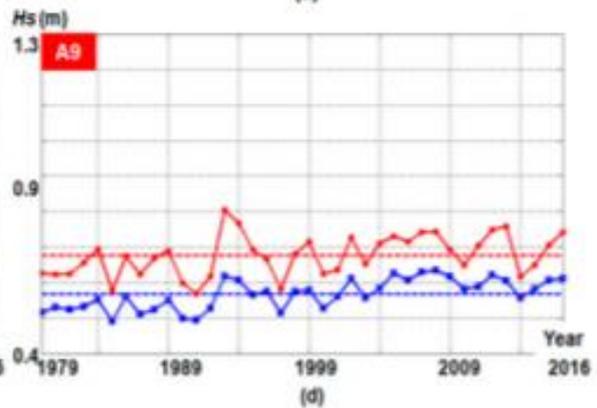
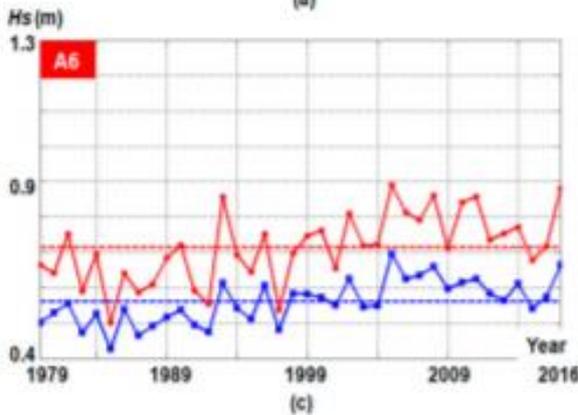


Рисунок 2.8 — Параметры энергии морских волн Черного моря [68]

Масса волны

а)  $m_1 = \rho V_1 = 1000 \cdot 4,777 = 4777 \text{ кг.}$

б)  $m_2 = \rho V_2 = 1000 \cdot 11,465 = 11465 \text{ кг.}$

Определим среднее значение силы удара морской волны:

$$\text{а) } F = \frac{3 \cdot V^2 \cdot H_1 \cdot l \cdot \rho}{\pi} = \frac{3 \cdot 9 \cdot 0,5 \cdot 5 \cdot 1000}{3,14} = 21497 \text{ Н};$$

$$\text{б) } F = \frac{3 \cdot V^2 \cdot H_2 \cdot l \cdot \rho}{\pi} = \frac{3 \cdot 9 \cdot 1,2 \cdot 5 \cdot 1000}{3,14} = 51592 \text{ Н}.$$

Потенциальная энергия  $\Delta E_{\text{п}}$  объема  $V$  воды, имеющего массу  $m$ , при высоте волны  $H$

$$\text{а) } \Delta E_{\text{п1}} = \frac{m_1 \cdot g \cdot \pi \cdot H_1^2}{l} = \frac{4777 \cdot 9,8 \cdot 3,14 \cdot 0,5^2}{5} = 7350 \text{ Дж};$$

$$\text{б) } \Delta E_{\text{п2}} = \frac{m \cdot g \pi H_2^2}{l} = \frac{11465 \cdot 9,8 \cdot 3,14 \cdot 1,2^2}{5} = 101607 \text{ Дж}.$$

Кинетическая энергия  $\Delta E_{\text{к}}$

$$\text{а) } \Delta E_{\text{к1}} = \frac{m_1 \cdot v^2}{2} = \frac{4777 \cdot 9}{2} = 21496,5 \text{ Дж};$$

$$\text{б) } \Delta E_{\text{к2}} = \frac{m_2 \cdot v^2}{2} = \frac{11465 \cdot 9}{2} = 51592,5 \text{ Дж}.$$

Суммарная энергия

$$\text{а) } E_1 = \Delta E_{\text{п1}} + \Delta E_{\text{к1}} = 7350 + 21496,5 = 28846,5 \text{ Дж};$$

$$\text{б) } E_2 = \Delta E_{\text{п2}} + \Delta E_{\text{к2}} = 101607 + 51592,5 = 153199,5 \text{ Дж}.$$

Мощность волны

$$\text{а) } N_1 = \frac{E_1}{T} = \frac{28846,5}{2} = 14423,25 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 14,42325 \text{ кВт};$$

$$\text{б) } N_2 = \frac{E_2}{T} = \frac{153199,5}{2} = 76599,75 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 76,6 \text{ кВт}.$$

Это при ширине волны 5 м.

Если считать на 1 м, то среднезимний поток мощности волны:

$$N'_1 = \frac{N_1}{l} = \frac{14,42325}{5} = 2,88 \text{ кВт/м};$$

$$N'_2 = \frac{N_2}{l} = \frac{76,6}{5} = 15,32 \text{ кВт/м}.$$

Определим параметры волны черноморского побережья Крыма в летнее время при усредненных значениях высоты волны  $H = 0,3$  м, ширины волны  $l = 4$  м и периода волны  $T = 1,8$  с.

Объем волны

$$V = \frac{v \cdot T \cdot H \cdot l}{\pi} = \frac{3 \cdot 1,8 \cdot 0,3 \cdot 4}{3,14} = 20,64 \text{ м}^3.$$

Масса волны

$$m = \rho V = 1000 \cdot 20,64 = 2064 \text{ кг.}$$

Сила удара морской волны.

$$F = \frac{3 \cdot v^2 \cdot H \cdot l \cdot \rho}{\pi} = \frac{3 \cdot 9 \cdot 0,3 \cdot 4 \cdot 1000}{3,14} = 10318,5 \text{ Н.}$$

Потенциальная энергия  $\Delta E_{\text{п}}$

$$\Delta E_{\text{п}} = \frac{m \cdot g \cdot \pi \cdot H^2}{l} = \frac{10318,5 \cdot 9,8 \cdot 3,14 \cdot 0,3^2}{3,14} = 9101 \text{ Дж.}$$

Кинетическая энергия  $\Delta E_{\text{к}}$

$$\Delta E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{10318,5 \cdot 9}{2} = 46433,25 \text{ Дж.}$$

Суммарная энергия

$$E = \Delta E_{\text{п}} + \Delta E_{\text{к}} = 9101 + 46433,25 = 55534,25 \text{ Дж.}$$

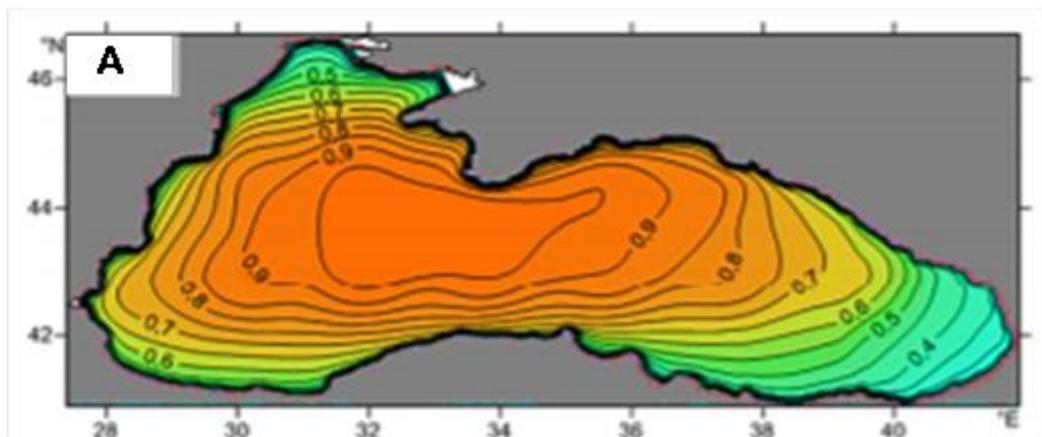
Мощность волны

$$N = \frac{E}{T} = \frac{55534,25}{1,8} = 30852,36 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 30,852 \text{ кВт.}$$

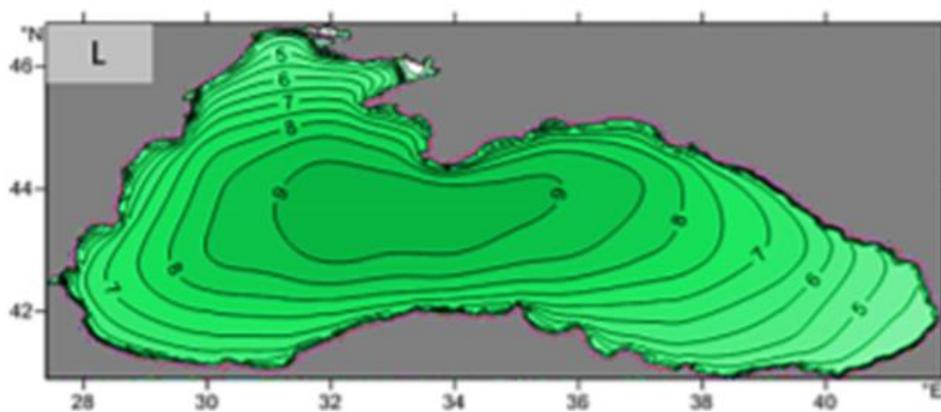
Поток мощности волны на 1 м в летнее время составляет

$$N' = \frac{N}{l} = \frac{30,852}{4} = 7,713 \text{ кВт/м.}$$

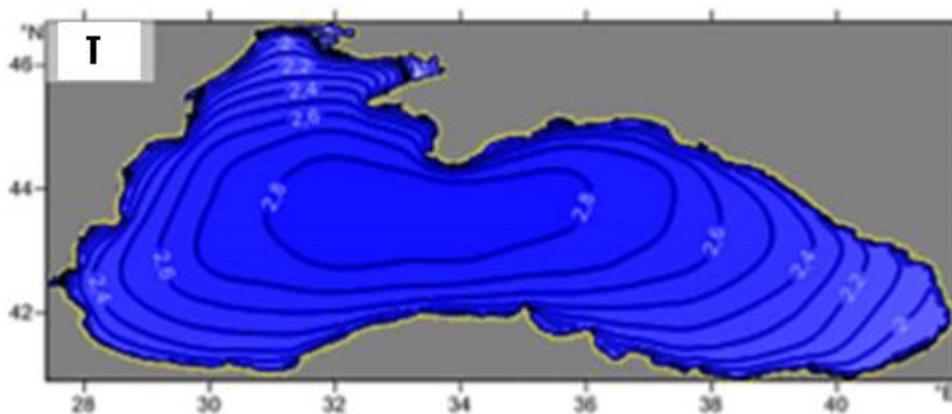
На рисунках 2.9 и 2.10 показаны амплитуды волны  $A$ , ширина волны  $l$  и периоды волн  $T$  в летнее и зимнее время года соответственно [68].



а

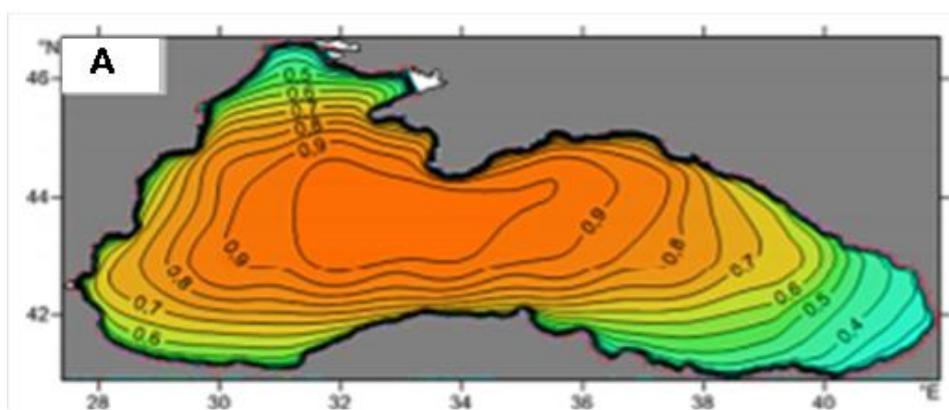


б

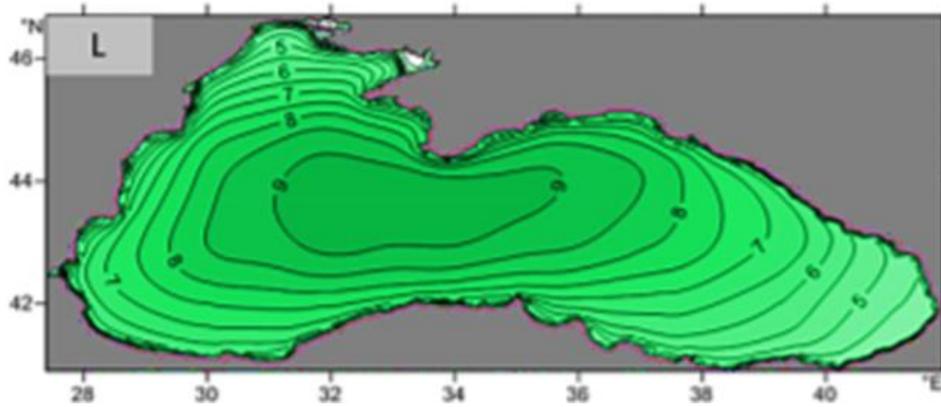


в

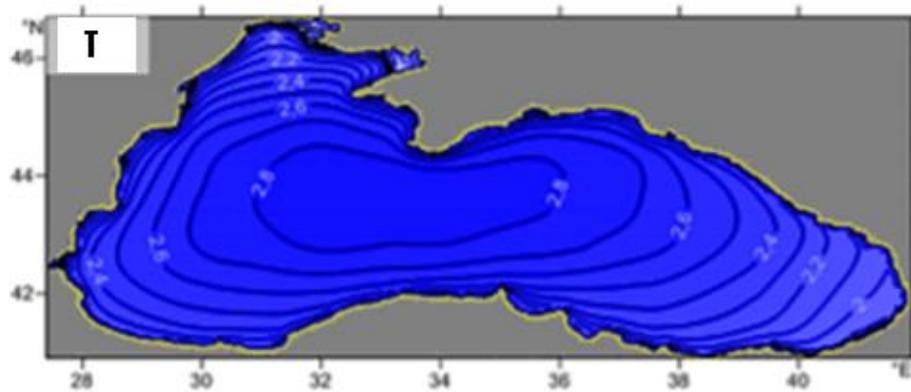
Рисунок 2.9 — Карты вычислений средней амплитуды значимой волны  $A = 0,5$ ;  $0,7$ ;  $1,2$  м, ширины волны  $l = 5$  м и периода  $T = 2$  м в летнее время года [68]



а



б



в

Рисунок 2.10 — Карты вычислений средней амплитуды значимой волны  $A = 0,3$  м, длины волны  $L = 5$  м и периода  $T = 1,8$  с в зимнее время года [68]

### 2.3 Выводы по главе

1. Получено уравнение скорости центра продольной волны и модуль силы волны при ее движении.

2. Выведены уравнения волны в параметрическом виде как функции ее высоты  $H$  и длины  $\lambda$ , кинетической энергии трохойдальной волны через фазовую скорость. При представлении трохойды параметрическим уравнением при заданных параметрах профиля волны выведена формула площади сечения трохойдальной волны.

3. По характеристикам и показателям волн Черного и Азовского морей определены и рассчитаны энергетические параметры: мощность, потенциальная, кинетическая и полная энергия морских волн при существующих в этих морях скорости, периоде, высоте и длине волн. Мощность волны при высоте волны 1м может достигать 4,55 кВт, а суммарная энергия 5,24 кДж. Поток мощности волны на 1м может достигать 7,7 кВт/м.

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ ВОЛНЫ

### 3.1 Разработка схемы и структуры устройства для измерения параметров морской волны

Для измерения энергии волны разработаны различные устройства [71-80], которые не позволяют получать требуемые данные оперативно, точность этих устройств невелика, имеются сложные схемотехнические решения со сложной обработкой сигнала.

С целью повышения точности измерения, постоянного контроля параметров волн, хранения и передачи информации о скорости, высоте и длине волны на расстоянии разработано электронное устройство измерения параметров морской волны, которое может быть использовано как в прибрежной зоне, так и при значительном удалении от береговой полосы.

Разработанное устройство (рисунок 3.1) для измерения параметров волны [81] содержит: 1 - датчик измерения скорости волны; 2 - датчик высоты волны; 3 - блок измерения высоты волны; 4 - инфракрасный датчик; 5 - кодирующее устройство; 6 - дешифратор; 7 - панель управления; 8 - микроконтроллер; 9 - генератор частоты; 10 - индикатор; 11 - блок передачи данных. Датчик измерения скорости волны 1, инфракрасный датчик 4; кодирующее устройство 5; дешифратор 6; панель управления 7; микроконтроллер 8; и индикатор 10 соединены последовательно, датчик высоты волны 2 соединен через блок измерения высоты волны 3 с инфракрасным датчиком 4, генератор частоты 9 и блок передачи данных 11 соединены с микроконтроллером 8.

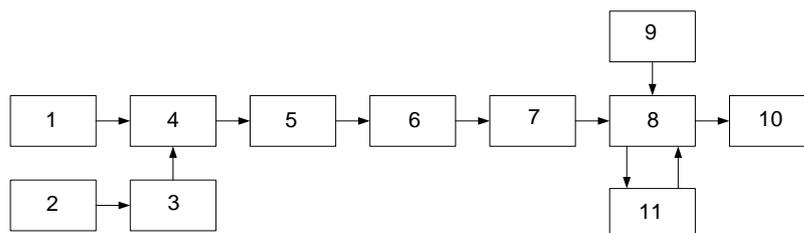


Рисунок 3.1 — Блок-схема устройства измерения параметров морской волны

Разработка такого устройства позволит повысить точность измерения параметров за счёт упрощения схемотехнического решения и применения современных электронных блоков и микроконтроллера.

Поставленная задача решается за счёт того, что в устройство измерения параметров морских волн, состоящее из блоков измерения скорости и высоты волны, блока приёма – передачи данных параметров волн включены ультразвуковой датчик для измерения уровня высоты волн, который своим выходом соединён через кодирующее устройство, вычислитель с входом микроконтроллера, а также датчик инфракрасного излучения, сигнал с которого подаётся на энкодер диска, имеющего отверстия, через которые световой сигнал от датчика инфракрасного излучения попадает на приёмное устройство, и от длительности и импульсов можно определять скорость волны, вращение диска осуществляется за счёт винта и редуктора. Данные с приёмника инфракрасного излучения попадают на второй вход микроконтроллера, который осуществляет обработку поступающих сигналов, далее через дешифратор поступает на индикатор; на счётный вход микроконтроллера поступают импульсы мегагерцовой частоты с эталонного генератора частоты; микроконтроллер осуществляет хранение информации в буферном устройстве и передачу приемопередающим устройствам по сотовым сетям GSM/GPRS на расстояние.

На рисунке 3.2 представлено конструктивное решение разработанного устройства для измерения силы волны, которое содержит: 1 – поплавок; 2 – панели управления с жидкокристаллическим дисплеем; 3 – диск; 4 – винт; 5 – панель управления; 6 - инфракрасный датчик; 7 – редуктор; 8 – гидроцилиндр; 9 – труба защитная; 10 – упругий элемент – пружина; 11 – датчик ультразвуковой; 12 – стержень; 13 – якорь.

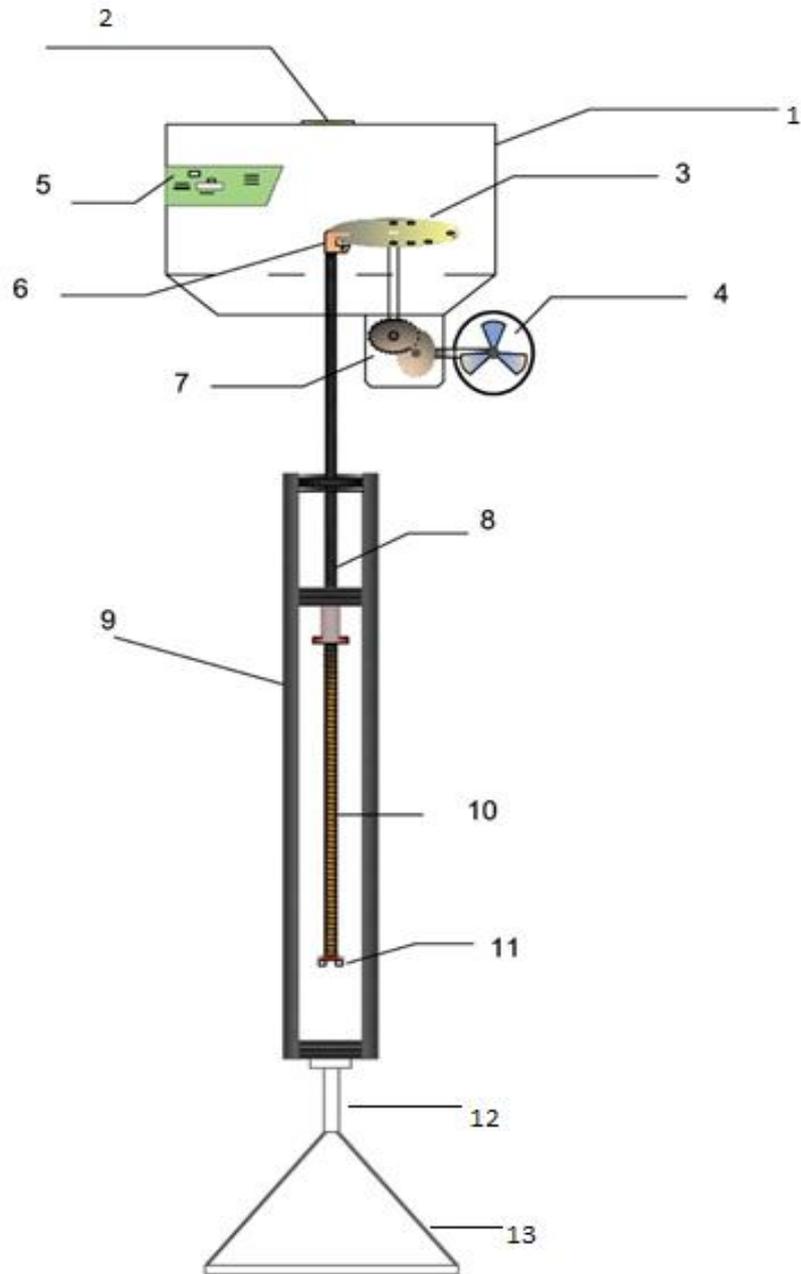


Рисунок 3.2 — Конструктивное исполнение измерителя морской волны

Для измерения скорости волны использованы следующие элементы: винт (4), редуктор (7), диск (3), инфракрасный датчик (6). При увеличении скорости волны увеличивается частота вращения винта. Винт через редуктор приводит во вращение диск, имеющий отверстия (рисунок 3.3).

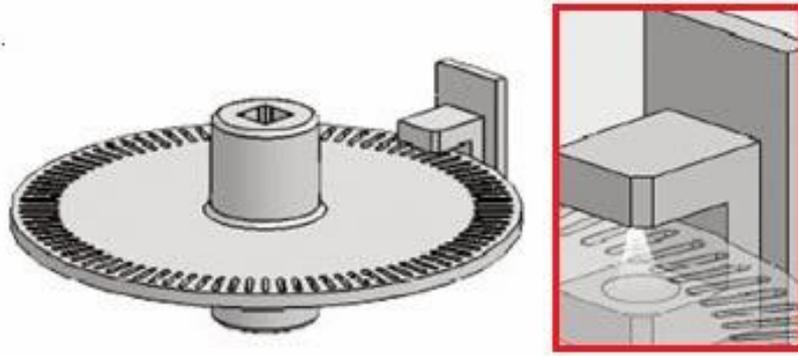


Рисунок 3.3 — Диск инкрементный энкодер

Диск представляет собой инкрементный энкодер, который позволяет осуществлять шифровку. Шаговый оптический энкодер состоит из следующих компонентов (рисунок 3.3): источника света, диска с метками, фоточувствительного датчика и диска, имеющий определенное количество отверстий, через который свет от источника попадает на фоточувствительный датчик. При вращении диска с фоточувствительного датчика имеем серию импульсов ( $v = f(t)$ ), частота которых прямопропорциональна скорости волны. Если бы на валу диска была установлена червячная передача и интегрирующий механизм для счета импульсов, то в этом случае можно было бы оценить среднее значение изменения скорости волны в том или ином месте моря за определенный интервал времени.

При вращении диска с датчика (рисунок 3.4, а) получаем модулированные импульсы (рисунок 3.4, б), которые поступают на микроконтроллер (рисунок 3.5) электронного блока измерительного устройства.

Измеритель скорости волны работает в режиме частотно-импульсной модуляции, то есть, на выходе имеем импульсы, модулированные по частоте, в зависимости от скорости, длины и напора волны. Увеличение скорости волны приводит к увеличению частоты вращения винта и соответственно увеличению количества импульсов.

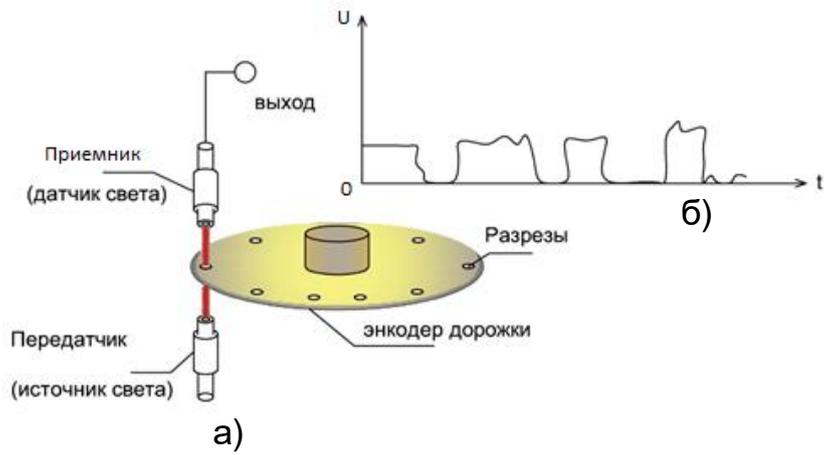


Рисунок 3.4 — Схема устройства для измерения скорости волны (а) и импульсы на приемнике (б)

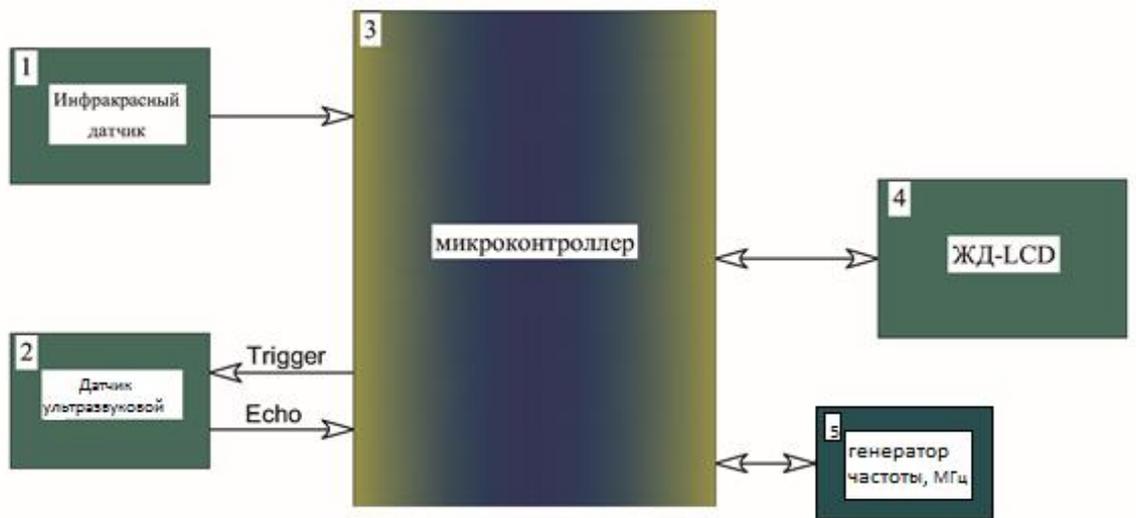


Рисунок 3.5 — Блок-схема электронного блока измерительного устройства

$$n = f(v), \quad (3.1)$$

где  $n$  – частота вращения диска (при 1 м/с), 1/с;

$v$  – скорость, м/с.

$$k_d = \frac{m_d}{n_d}, \quad (3.2)$$

где  $k$  – постоянная диска;

$n_d$  – количество меток на диске.

$m_d$  – число импульсов, создаваемых в секунду, 1/с.

Если количество меток на диске равно 72, то это означает, что при каждых 72 импульсах от датчика диск завершает полный цикл. Для измерения импульсной циркуляции волны необходимо рассчитать количество импульсов, генерируемых датчиками. Предположим, что число импульсов, создаваемых в секунду равно 360. Делим его на число отверстий в диске, чтобы получить число циклов диска ( $k$  равно 5 циклам в секунду):

$$k_d = \frac{m_d}{n_d} = \frac{360}{72} = 5.$$

Следовательно, скорость волны составит  $v=18$  км/ч.

При радиусе диска, равном 25 см, и количестве меток на диске, равном 72, угол между каждой парой меток составляет 5 градусов. Определим при заданных значениях длину волны

$$\lambda = 2\pi r, \quad (3.3)$$

$$\lambda = 2\pi \cdot 25 = 157 \text{ см.}$$

Предположим, что диск совершает пять полных оборотов  $\theta=5 \cdot 360=1800^\circ$ , тогда

$$\lambda = \frac{\theta \cdot \lambda}{360^\circ} = \frac{1800 \cdot 157}{360} = 785 \text{ см} = 7,85 \text{ м.}$$

Измерение длины волны

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2} = \frac{2\pi g}{\frac{(2\pi)^2}{T^2}} = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (3.4)$$

или

$$\lambda = \frac{2\pi g}{(2\pi)^2 f^2} = \frac{g}{2\pi f^2}, \quad (3.5)$$

$$\lambda = F(T) \text{ и } \lambda = F(f), \quad (3.6)$$

где  $T$  – период волны, с;

$f$  – частота волны, 1/с.

Длина волны прямо пропорциональна квадрату периода волны.

Погрешность измерения скорости волны при  $m_d=72$ .

$$\delta = \frac{5 \cdot 100}{360} = 1,4 \text{ \%}.$$

Для определения длины волны с помощью разработанного устройства – расстояния по горизонтали между двумя последовательными гребнями волны, измеренного вдоль направления распространения, выразим формулами частоту ( $\omega$ ), длину волны ( $\lambda$ ), м, и период волн ( $T$ ), с, при рассмотрении параметров трохоидаальной волны. Угловая скорость движения волны:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (3.7)$$

Длина волны

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2}. \quad (3.8)$$

Период – интервал времени между двумя последовательными гребнями волны в фиксированной точке:

$$T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (3.9)$$

Скорость волны

$$v = \lambda \cdot f. \quad (3.10)$$

Интервал времени между двумя последовательными гребнями волны в фиксированной точке определяем по формуле

$$t = \frac{\lambda}{v}. \quad (3.11)$$

Полученные данные о скорости волны и длине волны поступают на блок 3 – микроконтроллер (рисунок 3.5). Выход микроконтроллера (блок 3) соединен со входом жидкокристаллического дисплея (блок 4) (рисунок 3.5) и на жидкокристаллическом дисплее отображаются результаты скорости и длины волны. При необходимости данные этих величин могут быть переданы через передатчик или по сотовой связи на регистрирующий прибор станции контроля метеорологического наблюдения, если предлагаемое устройство находится на небольшом удалении от берега.

Для определения уровня гребня волны – высоты волны, предлагается использовать ультразвуковой дальномер, который позволяет определить высоту волны  $H$  (рисунок 3.6) по принципу работы эхолота.

Ультразвуковой датчик 11 (рисунок 3.6) связан с поплавком 1 и крепится в гидроцилиндре 8, защищен трубой 9 (обозначения соответствуют рисунку 3.2). Принцип его действия заключается в том, что при изменении высоты волны, одновременно изменяется положение поплавка и ультразвуковые импульсы передаются на панель управления от датчика ультразвуковых сигналов (блок 2 на рисунке 3.5) на вход микроконтроллера (блок 3 на рисунке 3.5). Микроконтроллер 4 обрабатывает сигнал, калибрует и с выхода микроконтроллера этот ультразвуковой сигнал, откалиброванный в параметр высоты волны в метрах, передается на отсчетное устройство – жидкокристаллический дисплей 4 (рисунок 3.5).

Ультразвуковой датчик (рисунок 3.6) излучает ультразвуковые волны частотой 40 кГц. Он выдает сигнал, позволяющий определить расстояние, а, следовательно, и высоту волны  $H=2r$ .

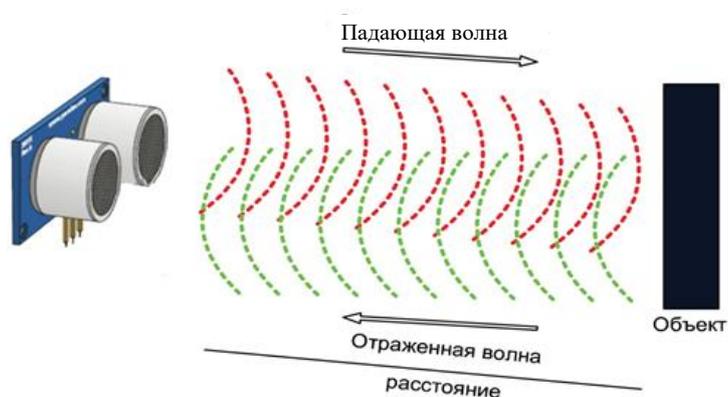


Рисунок 3.6 — Ультразвуковой датчик

Ультразвуковой датчик представляет собой ультразвуковой модуль HC-SR04 (рисунок 3.7), имеющий 4 контакта. На первый контакт – 1 (рисунок 3.7) подается напряжение питания – 5 В; на контакт 2 – положительный излучающий импульс 10 мкс, он работает в режиме триггера; на контакт 3 – эхо-пин, поступает отраженный сигнал; к контакту 4 подключается земля.



Рисунок 3.7 – Ультразвуковой модуль HC-SR04

Сенсор излучает короткий ультразвуковой импульс в начале отсчета (в момент времени 0), который отражается от объекта и принимается сенсором обратно. Расстояние рассчитывается с момента начала излучения сигнала, который отражается от объекта и принимается сенсором, и до получения эха, распространяющегося со скоростью звука в водной среде. На рисунке 3.8 показаны эпюры выходных напряжений и импульсы сигналов, соответствующих измеренным данным.

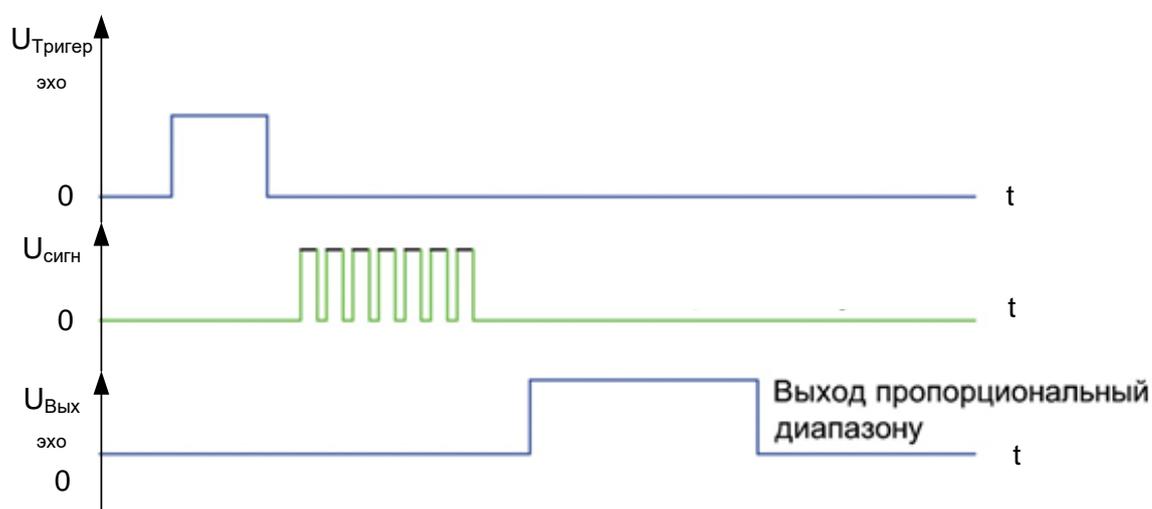


Рисунок 3.8 – Эпюры выходных напряжений

Сенсор получает сигнал эха и выдает расстояние, которое кодируется длительностью электрического сигнала на выходе датчика (ЭХО). Следующий

импульс может быть излучен только после исчезновения эха от предыдущего. Это время называется периодом цикла. Рекомендованный период между импульсами должен быть не менее 50 мс [82]. Если на сигнальный пин (Trigger) (рис. 3.8) подается импульс длительностью 10 мкс, то ультразвуковой модуль будет излучать восемь пачек ультразвукового сигнала с частотой 40 кГц и регистрировать их ЭХО. Измеренное расстояние до объекта пропорционально ширине эха и может быть рассчитано по формуле

$$H_r = \frac{t}{58}, \quad (3.12)$$

где  $t$  – время таймера (эхо-сигнал).

58 – калибровка.

Высота гребня волны, определяемая устройством, соответствует формуле:

$$r = \frac{t}{58 \cdot 2}, \quad \text{так как } H_r = 2r.$$

Полученные величины скорости волны, длины волны и высоты волны от датчиков подаются на микроконтроллер – 3 (рисунок 3.5) и регистрируются на индикаторе – 4. Для работы микроконтроллера предусмотрен эталонный генератор – 5 (рисунок 3.5).

Датчик прибора для измерения высоты волн устанавливается над поверхностью воды, перпендикулярно ей, на расстоянии, которое обеспечивает функционирование прибора и не позволяет волнам достигнуть датчика. В качестве датчика для измерения расстояния до поверхности воды выбран ультразвуковой датчик расстояния. Выбор датчика обусловлен доступностью, простотой функционирования, надежностью, невысокими требованиями к питанию. Надежность является следствием отсутствия подвижных частей в датчике. К недостаткам датчика можно отнести не слишком высокую точность выбранной модели и зависимость датчиков подобного типа от параметров окружающей среды: атмосферного давления, температуры, влажности. Тем не менее, для описанного типа измерений этой точности достаточно. Датчик

периодически измеряет расстояние до поверхности воды. Таким образом при наличии волн полученное значение расстояния циклически меняется с периодом следования волн, а по измеренному расстоянию можно судить о высоте волн. Получение значения длины волны осуществляется расчетным методом в зависимости от измеренного периода.

Ультразвуковые датчики работают лучше всего, когда они размещаются перед материалами, которые легко отражают ультразвуковые волны, такими как металл, пластик и стекло. Это позволяет датчику давать точные показания на большем расстоянии от объекта перед ним. Однако, когда датчик помещается перед объектом, который легко поглощает ультразвуковые волны, например, волокнистым материалом, датчик должен приблизиться к объекту, чтобы дать точные показания. Угол наклона объекта также влияет на точность считывания, поскольку плоская поверхность расположена под прямым углом к датчику, обеспечивая самый большой диапазон чувствительности. Эта точность снижается при изменении угла наклона объекта по отношению к датчику.

Для использования в устройстве выбран влагозащищенный ультразвуковой датчик AJ-SR04T.

С целью передачи параметров волны на расстояние, то есть на берег, необходимо произвести модуляцию данных сигнала параметров волны до 150 МГц для радиопередатчика и на берегу установить демодулирующее устройство. Питание передатчика на напряжение 9 В можно осуществлять с помощью батарей.

Передача сигналов о параметрах волны – высоте, длине и скорости морской волны при значительном удалении от берега, может осуществляться с помощью беспроводной связи по сотовым сетям с дальнейшей передачей в интернет. Осуществлять передачу данных по сотовым сетям GSM/GPRS можно с помощью оборудования, разработанного ООО «Энергия - Источник» г. Челябинск. Структурная блок-схема представлена ниже (рисунок 3.9).

На представленной блок-схеме (рисунок 3.9) беспроводной передачи данных:

- ЭН И-405 (GSM/GPRS – RS 485/232) – оконечное устройство (модем) сотовой связи  $f=900/1800$  МГц с SIM картой;
- ЭН И-750 – программируемый логический контроллер, осуществляющий управление опросом датчиков, формирование, поиск информации или сигнала on-line (по запросу);
- ПЛК – программируемый логический контроллер;
- ЭН И-751 – блоки преобразования – измеряют ток  $I=4-20$  мА от датчиков блока передачи импульсов (БПИ) и передают в ЭН И – 750;
- БПИ – блоки преобразования информации (БПИ).

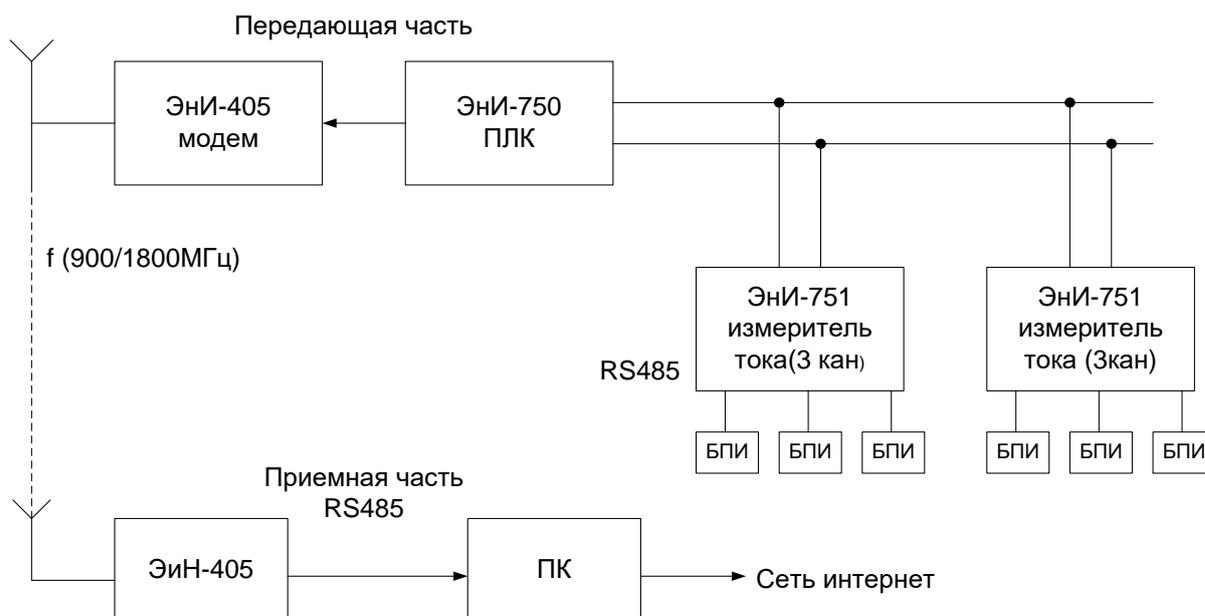


Рисунок 3.9 — Структурная блок-схема беспроводной передачи данных по сотовым сетям

Приемная часть на основе ЭН И – 405 с использованием сети RS 485 для подключения к ноутбуку или персональному компьютеру (ПК).

Далее данные из сети можно использовать в любом удобном месте.

Разработанное устройство позволяет измерить характеристики волн на поверхности воды с последующей передачей полученной информации при помощи сетей GSM. Устройство автономное, питание осуществляется от кислотного аккумулятора. Подзарядка аккумулятора осуществляется при помощи солнечной батареи.

### 3.2 Разработка алгоритма работы

На контакт 2 рис.3.7. (Trig) подается импульс длительностью не менее 10 мкс. В ответ на это датчик передает звуковой пакет из восьми импульсов с частотой 40 кГц. Этот 8-импульсный шаблон делает «ультразвуковую сигнатуру» устройства уникальной, позволяя приемнику отличать передаваемый шаблон от окружающего ультразвукового шума. Восемь ультразвуковых импульсов проходят по воздуху от передатчика. Между тем, вывод 3 рис.3.7. (Echo) переходит в HIGH, чтобы начать формирование сигнала эхо-ответа. В случае, если эти импульсы не отражаются обратно, то сигнал Echo будет отключен через 38 мс и вернется на низкий уровень. Таким образом, импульс 38 мс указывает на отсутствие препятствий в зоне действия датчика. Если эти импульсы отражаются обратно, вывод Echo переходит в низкий уровень, как только сигнал получен. Это создает импульс, ширина которого варьируется от 150 мкс до 25 мс, в зависимости от времени, требуемого для приема сигнала. Затем ширина полученного импульса используется для расчета расстояния до отраженного объекта. Его можно вычислить, используя простое уравнение  $\text{расстояние} = \text{скорость} \cdot \text{время}$ .

Скорость звука при нормальных условиях составляет 340 м/с. Таким образом, уравнение расчета расстояния будет выглядеть следующим образом:  
 $\text{расстояние} = 340(\text{м/с}) \cdot \text{время}$

Для передачи собранной информации воспользуемся модулем модема SIM800L.

Модуль SIM800L GSM / GPRS - это миниатюрный GSM-модем, который может быть интегрирован в большое количество IoT-проектов. Можно

использовать этот модуль для выполнения почти всего, что может сделать обычный сотовый телефон; SMS сообщения, совершать или принимать телефонные звонки, подключаться к Интернету через GPRS, TCP/IP и многое другое. В довершение всего, модуль поддерживает четырехдиапазонную сеть GSM/GPRS, что означает, что он работает практически в любой точке мира.

Проведем обзор оборудования SIM800L GSM / GPRS модуля.

В основе модуля лежит сотовый чип SIM800L GSM от SimCom. Рабочее напряжение чипа составляет от 3,4 В до 4,4 В, что делает его идеальным элементом для прямого питания от LiPo батареи.

Все необходимые выводы данных микросхемы SIM800L GSM разбиты на группы с шагом 2,54 мм. Сюда входят контакты, необходимые для связи с микроконтроллером через UART. Модуль поддерживает скорость передачи от 1200 до 115200 бит/с с автоматическим определением скорости передачи.

Модулю требуется внешняя антенна для подключения к сети. Модуль обычно поставляется со спиральной антенной и припаивается непосредственно к контакту NET на печатной плате. На плате также есть разъем для подключения выносной антенны.

На обратной стороне модуля находится гнездо для SIM-карты. Любая активированная микро-SIM-карта 2G будет работоспособной. Правильное направление вставки SIM-карты обычно выгравировано на поверхности гнезда для SIM-карты.

Этот модуль имеет размеры всего 6,5см<sup>2</sup>, но в нем собрано большое количество функций. Некоторые из них перечислены ниже:

- Поддержка четырех диапазонов: GSM850, EGSM900, DCS1800 и PCS1900;
- Подключение к любой глобальной сети GSM с любой SIM-картой 2G;
- Совершение и принятие голосовых вызовов с помощью внешнего динамика 8 Ом и электретного микрофона;
- Отправка и получение SMS-сообщений;

- Отправка и получение данных GPRS (TCP / IP, HTTP и т.д.);
- Сканирование и прием радиопередач FM;
- Мощность передачи:
- Класс 4 (2 Вт) для GSM850;
- Класс 1 (1 Вт) для DCS1800;
- Последовательный набор AT-команд;
- Разъем FL для сотовых антенн;
- Micro SIM-карта;
- Светодиодные индикаторы состояния.

В правом верхнем углу модуля сотовой связи SIM800L есть светодиод, который показывает состояние сотовой сети. Он будет мигать с разной частотой, показывая, в каком состоянии находится модуль.

Антенна необходима для использования модуля для любого типа передачи голоса или данных, а также для некоторых команд SIM. Таким образом, выбор антенны является оказаться решающим. Есть два способа добавить антенну к модулю SIM800L.

Первая – это спиральная GSM-антенна, которая обычно идет в комплекте с модулем и припаивается непосредственно к контакту NET на печатной плате. Эта антенна очень полезна для проектов, которые нуждаются в экономии места.

Вторая – это любая антенна GSM 3дБ вместе с адаптером U.FL-SMA. Эту антенну с защелкой можно прикрепить к небольшому разъему u.fl, расположенному в верхнем левом углу модуля. Этот тип антенны обладает лучшими характеристиками и позволяет поместить модуль в металлический корпус, если антенна находится снаружи.

Одна из наиболее важных составляющих работы модуля SIM800L – это подача на него достаточного количества энергии.

В зависимости от того, в каком состоянии находится модуль, SIM800L может быть относительно энергоемким устройством. Максимальный ток, потребляемый модулем, составляет около 2 А во время пакетной передачи.

Обычно он не потребляет так много, но может потребовать около 216 мА во время телефонных звонков или 80 мА во время передачи по сети. Таблица 3.1 суммирует потребление тока модулем.

Поскольку модуль SIM800L не имеет встроенного регулятора напряжения, требуется внешний источник питания, настроенный на напряжение от 3,4В до 4,4В (в идеале 4,1В). Источник питания также должен быть способен выдавать импульсный ток 2А, в противном случае модуль будет постоянно отключаться.

Таблица 3.1 – Потребление тока в разных режимах

Режимы	Потребление тока
Отключение	60 мкА
Спящий режим	1 мА
Ожидание	18 мА
Работа в GSM850	199 мА
Работа в EGSM900	216 мА
Работа в DCS1800	146 мА
Работа в PCS1900	131 мА
Работа в GPRS	453 мА
Пакетная передача	2 А

Модуль SIM800L имеет всего 12 контактов, которые соединяют его с внешним миром. Распиновка GSM модуля SIM800L:

- NET – это контакт, к которому можно припаять спиральную антенну, поставляемую вместе с модулем.

- VCC обеспечивает питание модуля. Это может быть от 3,4В до 4,4В. Подойдет внешний источник питания, такой как батарея Li-Po или понижающие преобразователи постоянного тока с номиналом 3,7 В 2 А.

- RST (Reset) – вывод для аппаратного сброса. В случае зависания модуля нужно установить на этом входе высокий уровень сигнала на 100 мс, чтобы выполнить полный сброс.

- Вывод RxD (приемник) используется для последовательной связи.

- Вывод TxD (передатчик) используется для последовательной связи.

- GND - это контакт заземления, общий.

- RING действует как индикатор звонка. По сути, это вывод "прерывания" модуля. По умолчанию на нем высокий уровень и будет пульсировать на низком уровне в течение 120 мс при получении вызова. Его также можно настроить на импульс при получении SMS.

- Вывод DTR включает / выключает спящий режим. Если установить высокое значение, модуль перейдет в спящий режим, отключив последовательную связь. Подача на него низкого значения разбудит модуль.

- MIC  $\pm$  – это дифференциальный микрофонный вход. Два микрофонных контакта могут быть подключены непосредственно к этим контактам.

- SPK  $\pm$  – это дифференциальный интерфейс динамика. Два контакта динамика можно привязать непосредственно к этим двум контактам.

В качестве контроллера, обрабатывающего информацию с датчика и управляющего модемом, будем использовать Arduino MEGA 2560.

Arduino Mega 2560 – это плата микроконтроллера на базе ATmega2560.

Он имеет 54 цифровых входа / выхода (из которых 14 могут использоваться как выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 UART (аппаратные последовательные порты), кварцевый генератор 16 МГц, USB-соединение, разъем питания, разъем ICSP и кнопка сброса. Плата содержит все необходимое для поддержки микроконтроллера. Достаточно подключить ее к компьютеру с помощью USB-кабеля или подключить адаптер питания или аккумулятор, чтобы начать работу. Плата Mega 2560 совместима с большинством разработанных экранов [83].

Для Arduino Duemilanove или Diecimila плата обладает следующими характеристиками:

- Микроконтроллер – ATmega2560;
- Рабочее напряжение – 5 В;
- Входное напряжение (рекомендуемое) – 7-12 В;
- Входное напряжение (пределы) – 6-20 В;
- Цифровые входы / выходы – 54 (из которых 14 обеспечивают выход ШИМ) [83];
- Аналоговые входы – 16;
- Постоянный ток на выводе ввода / вывода – 40 мА;
- Постоянный ток для вывода 3.3 В – 50 мА;
- Флэш-память – 256 КБ, из которых 8 КБ используется загрузчиком;
- SRAM – 8 КБ;
- EEPROM – 4 КБ;
- Тактовая частота – 16 МГц.

Arduino Mega может получать питание через USB-соединение или от внешнего источника питания. Источник питания выбирается автоматически. Внешнее (не USB) питание может поступать либо от источника постоянного тока, либо от аккумулятора. Адаптер можно подключить, вставив штекер 2,1 мм в разъем питания платы. Выводы от аккумулятора можно вставить в разъемы Gnd и Vin.

Плата может работать от внешнего источника питания от 6 до 20 вольт. Однако при питании менее чем от 7 В плата может работать нестабильно. При использовании более 12 В регулятор напряжения может перегреться и повредить плату. Рекомендуемый диапазон от 7 до 12 Вольт.

Назначение выводов питания следующие:

- VIN. Входное напряжение на плату Arduino при использовании внешнего источника питания (в отличие от 5 вольт от USB-соединения или другого регулируемого источника питания).

- 5В. Выход регулируемого источника питания, используемый для питания микроконтроллера и других устройств компоненты на плате.

- 3V3. Питание 3,3 В, генерируемое бортовым регулятором. Максимальное потребление тока составляет 50 мА.

- GND. Контакты заземления.

Память. ATmega2560 имеет 256 КБ флэш-памяти для хранения кода (из которых 8 КБ используются для загрузчика), 8 КБ SRAM и 4 КБ EEPROM (которые можно читать и записывать с помощью библиотеки EEPROM).

Ввод и вывод. Каждый из 54 цифровых контактов Mega может использоваться как вход или выход, используя функции `pinMode()`, `digitalWrite()` и `digitalRead()`. Они работают от 5 Вольт. Каждый вывод может выдать максимум 40 мА и имеет внутренний подтягивающий резистор (по умолчанию отключен) 20-50 кОм. Кроме того, некоторые контакты имеют специализированные функции:

- Последовательный интерфейс 0: (RX) и 1 (TX); последовательный интерфейс 1: 19 (RX) и 18 (TX); последовательный интерфейс 0:17 (RX) и 16 (TX); последовательный интерфейс 3: 15 (RX) и 14 (TX). Используется для приема (RX) и передачи (TX) Последовательных данных TTL.

- Внешние прерывания: 2 (прерывание 0), 3 (прерывание 1), 18 (прерывание 5), 19 (прерывание 4), 20 (прерывание 3) и 21 (прерывание 2). Эти входы могут быть настроены на запуск прерывания при низком значении, нарастающем или спадающем фронте или изменении сигнала.

- ШИМ: от 0 до 13. Обеспечивают 8-битный вывод ШИМ с помощью функции `analogWrite()`.

- SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS). Эти контакты поддерживают SPI интерфейс с использованием библиотеки SPI.

- Светодиод: 13. К цифровому контакту 13 подключен встроенный светодиод. При подаче высокого уровня сигнала светодиод горит, когда вывод низкий, он выключен.

- I2C: 20 (SDA) и 21 (SCL). Поддержка связи I2C (TWI) через библиотеку Wire.

Mega2560 имеет 16 аналоговых входов, каждый из которых обеспечивает разрешение 10 бит (т.е. 1024 разные значения). По умолчанию они измеряют от земли до 5 вольт, хотя можно изменить верхний предел своего диапазона с помощью вывода AREF и функции `analogReference()`.

На плате есть еще пара контактов:

- AREF. Опорное напряжение для аналоговых входов. Используется с `analogReference()`.
- Сброс. Необходимо установить низкий уровень, чтобы сбросить микроконтроллер.

Связь. Arduino Mega2560 имеет ряд средств для связи с компьютером, другой Arduino или другими микроконтроллерами. ATmega2560 имеет четыре аппаратных UART для последовательной связи TTL (5 В). Программное обеспечение Arduino включает в себя монитор последовательного порта, который позволяет использовать простые текстовые данные для отправки на плату и с нее. Светодиоды RX и TX на плате будут мигать, когда данные передаются через USB-соединение с компьютером. Библиотека `SoftwareSerial` обеспечивает последовательную связь на любых контактах. ATmega2560 также поддерживает связь I2C (TWI) и SPI. Программное обеспечение Arduino включает библиотеку `Wire` для упрощения использования шины I2C. Для связи по SPI используется библиотека `SPI` [83].

Программирование. Arduino Mega можно запрограммировать с помощью программного обеспечения Arduino. ATmega2560 на Arduino Mega поставляется с предварительно записанным загрузчиком, который позволяет загрузить в него новый код без использования внешнего аппаратного программатора. Программирование осуществляется при помощи протокола STK500. Также можно обойти загрузчик и запрограммировать микроконтроллер через заголовок [83] ICSP.

Данные, которые отправлены в СМС:  $H$  – высота волны;  $A$  – амплитуда волны;  $T$  – это период волны;  $\lambda$  – это длина волны.

На рисунке 3.10 показан разработанный алгоритм работы измерителя волн.

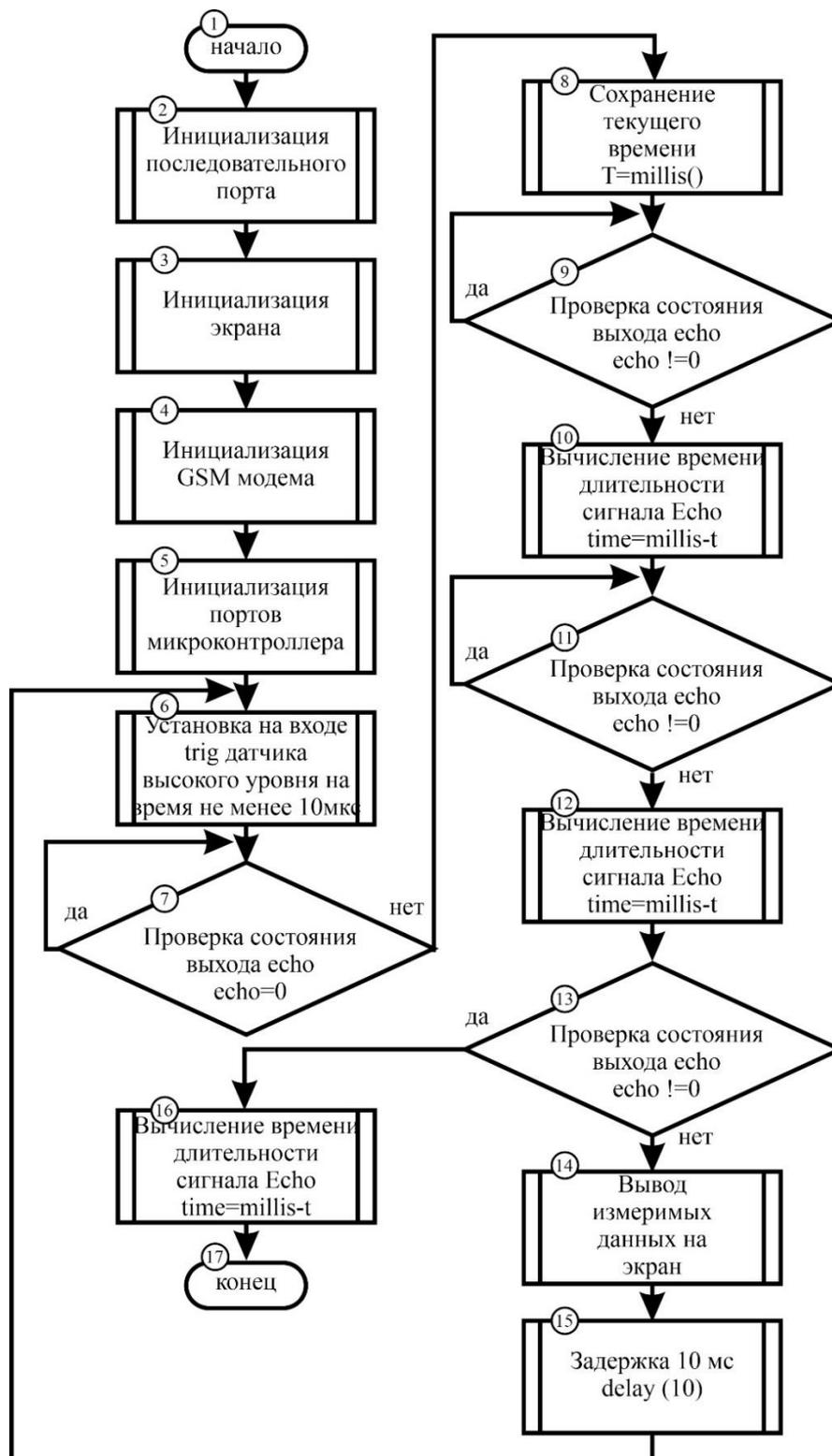


Рисунок 3.10 – Алгоритм работы измерителя волн

Реализация алгоритма позволяет определять требуемые параметры.

### 3.3 Выводы по главе

1. Разработано электронное устройство с микроконтроллером для измерения параметров морской волны, обеспечивающее постоянный контроль, хранение и передачу информации о скорости, высоте и длине волны, которое может быть использовано как в прибрежной зоне, так и на значительном удалении от береговой полосы. Предложена блок-схема и конструктивное решение устройства измерения параметров морской волны. Измеритель скорости волн работает в режиме частотно-импульсной модуляции, в результате чего на выходе соответствующего датчика импульсы модулированы по частоте в зависимости от скорости, длины и напора волны. Погрешность измерения составляет 1,4%.

2. Предложена структурная блок-схема беспроводной передачи данных с электронного устройства измерителя параметров волн по сотовой сети.

3. Разработан алгоритм работы измерителя параметров волн.

## Глава 4. РАЗРАБОКА ЭНЕРГОАГРЕГАТА ДЛЯ ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

### 4.1 Принцип работы и составные части волновой электростанции

Для преобразования энергии волн в электрическую энергию была разработана соответствующая энергоустановка (рисунок 4.1).

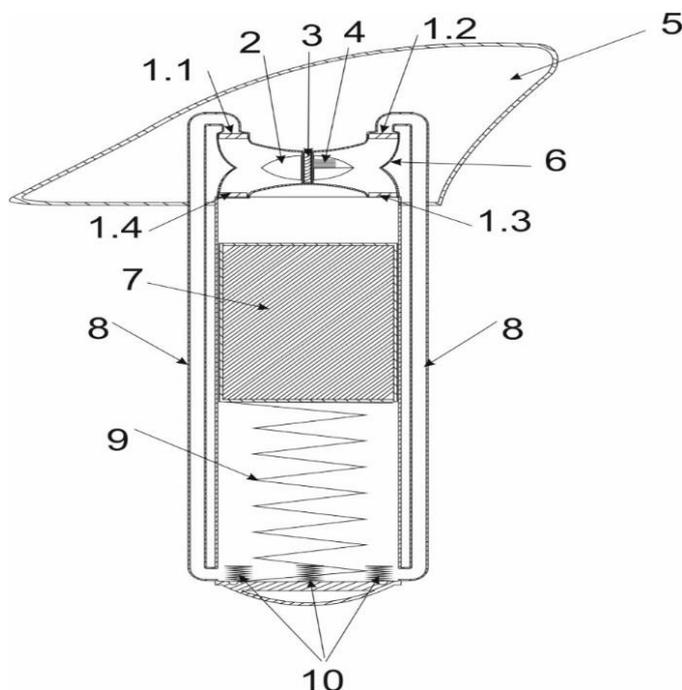


Рисунок 4.1 — Устройство преобразователя энергии волн:

1.1-1.4 - впускные и выпускные клапаны; 2 - обтекатель; 3 - турбина;  
4 - генератор; 5 - поплавок; 6 - диффузор; 7 - поршень; 8 - воздуховоды;  
9 - пружина; 10 - пружины для гашения удар

Он представляет собой герметичный буй, который колеблется в воде под действием волн. Эти колебания заставляют перемещаться поршень внутри буйка. Движение поршня вытесняет воздух, который проходя через воздуховод вращает турбину и генератор.

Принцип действия данного устройства заключается в том, что при набегающей волне буй начинает всплывать, при этом поршень 7, имея большую инерцию остается на месте и сжимает пружину 9. В этот момент воздух под давлением вытесняется из полости под поршнем 7 в воздуховод 8 и через обратный клапан 1.1-1.2 попадает в диффузор 6. Затем приводит в движение

турбину 3 и генератор 4 после чего через обратный клапан 1.3-.14 попадает в полость над поршнем 7[84].

#### 4.2 Изготовление действующей модели устройства

Корпус модели выполнен из пластиковой трубы диаметром 100 мм, поршень изготовлен из стеклопластика и утяжелен металлическим балластом. Зная расход и давление, были рассчитаны параметры конфузора и диффузора. 3D модель устройства представлена на рисунках 4.2 и 4.3.

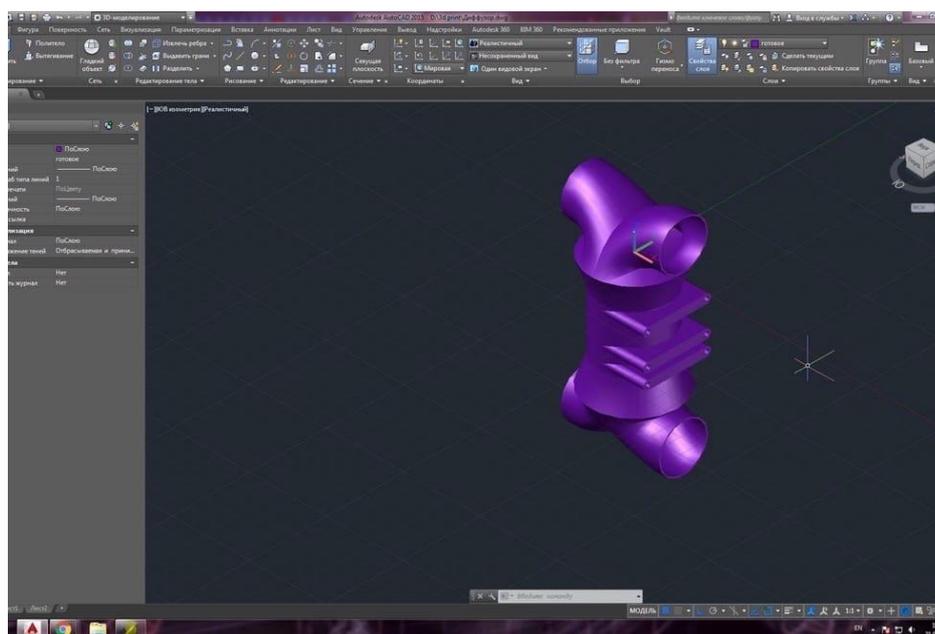


Рисунок 4.2 — Конфузор

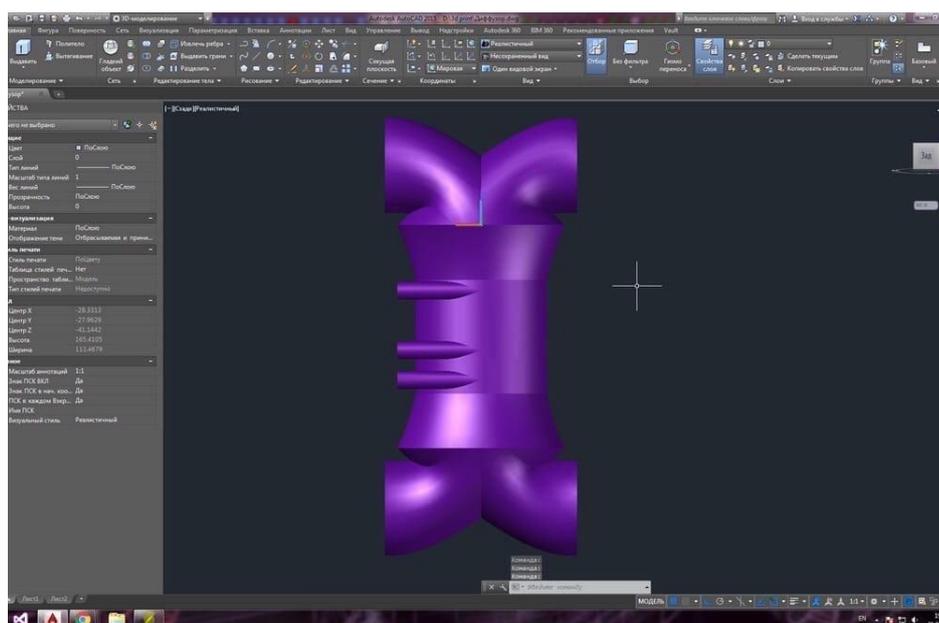


Рисунок 4.3 — Диффузор

Диффузор, конфузор и турбина были изготовлены на 3D принтере из ABS пластика и представлены на рисунках 4.4 и 4.5 [84].



Рисунок 4.4 — Модель диффузора и конфузора [84]



Рисунок 4.5 — Модель турбины [84]

К выходам диффузора подсоединяются обратные клапаны и воздуховоды, как показано на рисунке 4.6 [84].

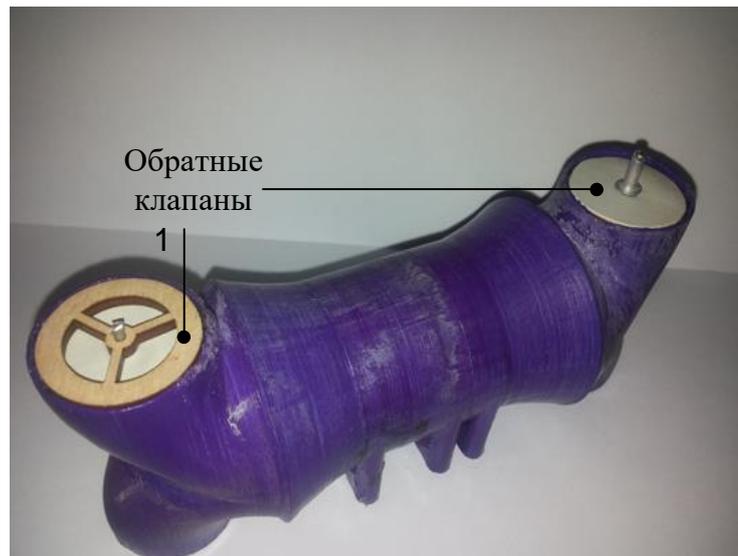


Рисунок 4.6 — Обратные клапаны и воздухопроводы на выходе диффузора [84]:

1 - обратные клапаны

Для проведения эксперимента и определения оптимального соотношения расхода и давления при заданных условиях было установлено устройство для регулировки сечения диффузора, генератор был установлен внутри корпуса диффузора, как показано на рисунке 4.7 [84] и общий вид преобразователя показан на рисунке 4.8.

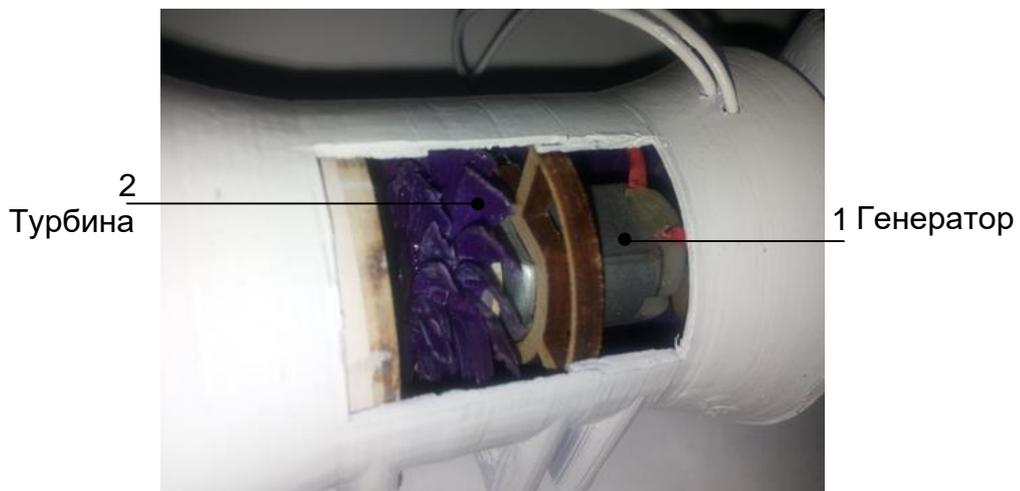


Рисунок 4.7 – Установка генератора:

1 – генератор; 2 – турбина



Рисунок 4.8 — Общий вид опытной модели преобразователя

#### 4.3 Экспериментальные исследования работы преобразователя энергии волн в электрическую энергию

Для определения характеристик турбины и генератора, используемых в преобразователе энергии волн, были проведены экспериментальные исследования. Турбина была помещена на вал генератора, который, в свою очередь, был закреплен на стенде. С помощью вентилятора создавался воздушный поток, который воздействовал на турбину и вращал ее, тем самым вращая вал генератора. Измерения скорости воздушного потока проводились с помощью анемометра, а выходная мощность генератора определялась ваттметром. На основе полученных данных был построен график зависимости

выходной мощности генератора от скорости набегающего потока воздуха. Эта зависимость была описана математически.

Для определения скорости потока воздуха в воздуховоде преобразователя энергии волн, а, следовательно, и мощности на выходе генератора, была составлена его математическая модель. В качестве исходных данных были взяты следующие значения: Начальное давление в герметичном бую  $p_0 = 101325$  Па; универсальная газовая постоянная  $R = 8,314$  Дж/(моль·К); газовая постоянная  $R_{\Gamma} = 287$  Дж/(кг·К); молярная масса воздуха  $M = 28,9610^{-3}$  моль; температура воздуха  $T = 10^{\circ}\text{C} = 288$  К; диаметр воздуховода  $d = 110$  мм; длина воздуховода  $L = 1$  м

Найдем объем воздуха над и под поршнем:

$$V_0 = \pi \cdot r^2 \cdot L; \quad V_1 = \pi \cdot r^2 \cdot (L - x), \quad (4.1)$$

где  $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  м – шаг движения поршня.

Найдем массу воздуха в бую:

$$m_B = \frac{p_0 \cdot V_0 \cdot M}{R \cdot T_B} = 0,012 \text{ кг.}$$

Проследим изменение давления воздуха,  $P_1$ , Па, под поршнем при его движении в низ буя, то есть, при перемещении буя на гребень волны:

$$p_1 = \frac{m_B \cdot R \cdot T_B}{M \cdot V_1}. \quad (4.2)$$

Найдем изменение скорости воздуха в воздуховоде при движении поршня в низ буя,  $V$ , м/с:

$$v = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_0^2) \cdot d}{\lambda \cdot Z \cdot R_{\Gamma} \cdot T_B \cdot L}}, \quad (4.3)$$

где  $\rho = 1,2466 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность воздуха;

$\lambda = \frac{0,009407}{\sqrt[3]{d}} = 0,02$  - коэффициент гидравлического сопротивления;

$Z = 0,93$  - коэффициент сжимаемости воздуха.

Результаты расчета по координате  $x$  представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчета

$x$ , см	$p_1$ , Па	$v$ , м/с
0	$1,013 \cdot 10^5$	0
0,1	$1,126 \cdot 10^5$	1,975
0,2	$1,267 \cdot 10^5$	3,058
0,3	$1,447 \cdot 10^5$	4,159
0,4	$1,689 \cdot 10^5$	5,436
0,5	$2,026 \cdot 10^5$	7,062
0,6	$2,533 \cdot 10^5$	9,342
0,7	$3,377 \cdot 10^5$	12,96
0,8	$5,066 \cdot 10^5$	19,97
0,9	$1,013 \cdot 10^6$	30,57

Расчетная зависимость выходной мощности генератора от потока воздуха в энергоагрегате представлена на рисунке 4.9.

На основании графика зависимости  $P=f(v)$  было найдено выражение, которое связывает  $P$  и  $v$ :

$$P(v)=0,004V^2+1,4616V-1,7652 \quad (4.4)$$

Для определения зависимости мощности на выходе от скорости воздуха в воздуховоде воспользуемся найденным ранее экспериментальным выражением (4.4)

График зависимости  $P=f(v)$  будет иметь следующий вид.



Рисунок 4.9 — График зависимости выходной мощности генератора от потока воздуха в энергоагрегате

Величина достоверности аппроксимации  $R^2$  теоретической кривой экспериментальной составляет 0,9857.

Используя (4.3) было найдено выражение для нахождения оптимальной длины буя:

$$L = \frac{(P_1^2 - P_0^2) d}{\lambda Z R_\Gamma T_B V^2 \rho^2} = \frac{\left[ \left( \frac{mRT}{M\pi r^2 L} - P_0^2 \right) \right] \cdot d}{\lambda Z R_\Gamma T_B V^2 \rho^2} =$$

$$= \frac{m^2 R^2 T^2 \cdot d - P_0^2 M^2 \pi^2 r^4 \cdot d L^2}{\lambda Z R_\Gamma T_B V^2 \rho^2 \cdot M^2 \pi^2 r^4 L^2} \quad (4.5)$$

Введем обозначения:  $a = m^2 R^2 T^2 \cdot d$ ;  $b = P_0^2 M^2 \pi^2 r^4 \cdot d$ ;  $c = \lambda Z R_\Gamma T_B V^2 \rho^2 \cdot M^2 \pi^2 r^4$

тогда получим

$$\frac{a - bL^2}{cL^2} = L; \quad a - bL^2 = cL^3; \quad cL^3 + bL^2 - a = 0$$

Уравнение (4.5) имеет три корня, один из которых – действительное число, а два других – комплексные числа. Действительное уравнение имеет вид:

$$L_1 = \left[ \sqrt{\frac{a^2}{4c^2} - \frac{ab^3}{27c^4}} + \frac{a}{2c} - \frac{b^3}{27c^3} \right]^{\frac{1}{3}} -$$

$$-\frac{b}{3c} + \frac{b^2}{9c^2 \left( \sqrt{\frac{a^2}{4c^2} - \frac{ab^3}{27c^4}} + \frac{a}{2c} - \frac{b^3}{27c^3} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (4.5)$$

#### 4.4 Экспериментальные исследования энергоагрегата

Буй представляет собой герметичный сосуд, внутри которого под действием волнения перекачивается газ. Такая схема обеспечивает высокую надежность, так как она имеет минимум деталей и не имеет контакта с морской водой.

Испытание устройства включает в себя два этапа:

**I этап. Исследование характеристик модели ВлЭУ при работе с воздухом.** Модель буя наполняется воздухом под атмосферным давлением и подвешивается на резиновые тросы к перекладине, как показано на рисунке 4.8. Далее буй отклоняют до заданного значения по шкале и отпускают. При этом он совершает вертикальные колебательные движения, аналогичные тем, которые вызваны морским волнением. При этом поршень перекачивает воздух, приводя в движение турбину и генератор. К генератору подсоединены: амперметр, вольтметр и нагрузка в виде реостата. После того как буй сделал несколько колебаний и выходной сигнал с генератора стабилизировался, производим замеры тока и напряжения под нагрузкой. Далее опыт повторяется еще для четырех значений высот волны с учетом зависимости  $N=f(h)$ . Экспериментальные исследования модели буя поясняются рисунком 4.10, результаты представлены в таблице 4.2.

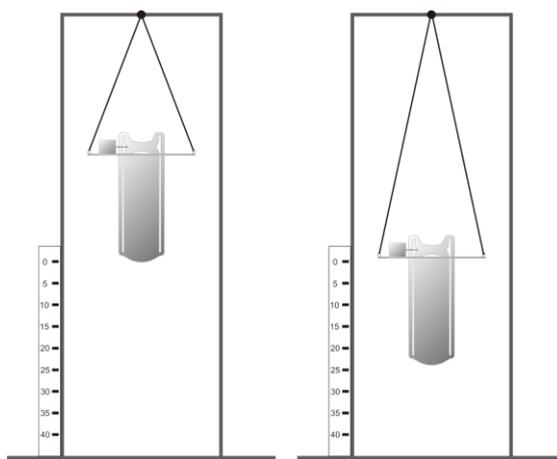


Рисунок 4.10 — Экспериментальные исследования модели буя

Таблица 4.2 – Экспериментальные исследования модели буй с воздухом

Высота колебания буй, h, м	Сила тока, I, А	Напряжение, U, В	Мощность, P, Вт
0,05	2	0,1	0,2
0,1	3	0,14	0,42
0,15	5	0,2	1
0,2	9	0,35	3,15
0,25	11	0,4	4,4

**II этап. Исследование характеристик модели ВлЭУ при работе с углекислым газом.** Так же как и в предыдущем этапе, буй подвешивается на эластичных тросах, но при этом в него закачивается газ с плотностью большей, чем плотность воздуха. В данном случае эксперимент проводился с углекислым газом. Он имеет плотность  $1,97 \text{ кг/м}^3$ . Далее эксперимент повторяется для тех же значений высот волн, снимаются показания и заносятся в таблицу 4.3, по которой строится график зависимости  $N = f(h)$ .

Таблица 4.3 – Экспериментальные сравнения модели буй с углекислым газом

Высота колебания буй, h, м	Сила тока, I, А	Напряжение, U, В	Мощность, P, Вт
0,05	3,28	0,11	0,36
0,1	4,92	0,14	0,68
0,15	8,2	0,2	1,64
0,2	14,7	0,35	5,14
0,25	18	0,4	7,2

По полученным значениям строится общий график (рисунок 4.11), который включает в себя графики зависимости:

- мощности от высот волн с воздухом;
- мощности от высот волн при наполнении углекислым газом.

Таким образом, в результате испытаний были получены значения мощности, представленные в таблицах 4.2 и 4.3 для воздуха и углекислого газа соответственно. Зависимость изменения мощности от плотности рабочего тела – линейная. Наиболее целесообразно применение в качестве рабочего тела газов большей плотности, при условии обеспечения скорости потока достаточной для вращения турбины с частотой 1500 об/мин. Такая частота вращения турбины позволяет применять серийно выпускаемый генератор с минимальным числом пар полюсов, что в свою очередь уменьшает его стоимость и необходимый запас плавучести ВлЭУ.

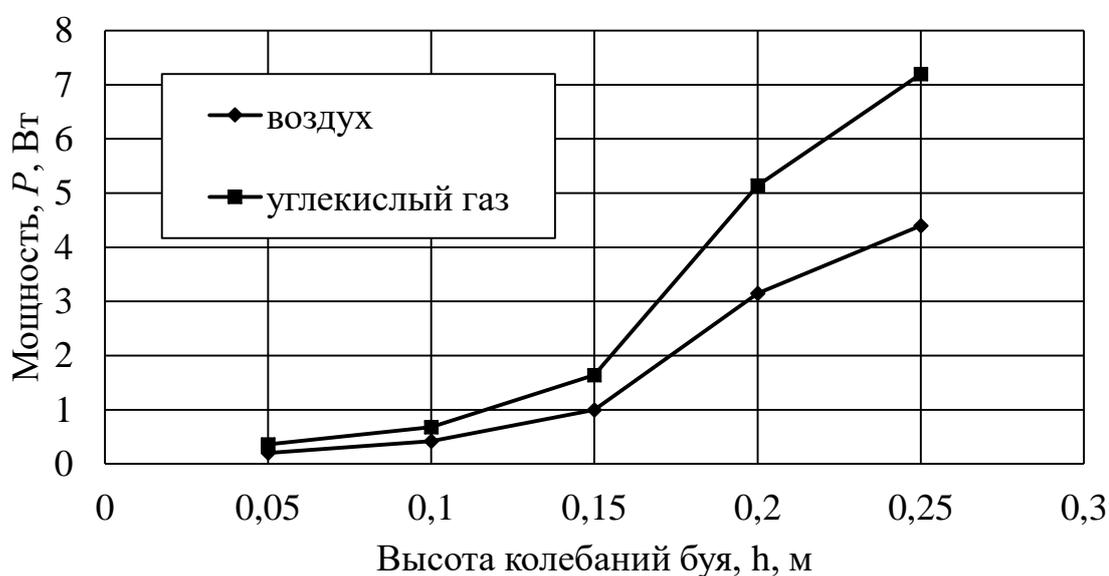


Рисунок 4.11 — Экспериментальное исследование модели буя с углекислым газом

Экспериментальные модели измерителя параметров волн и устройство для преобразования волн показаны на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 — Экспериментальные модели измерителя параметров волн и устройство для преобразования волн

#### 4.5 Надежность систем электроснабжения энергоагрегатов ВлЭС

Основными компонентами рассматриваемого преобразователя энергии волн в электрическую энергию являются турбина, редуктор и электрический генератор. Они соединены последовательно, с точки зрения теории надежности (рисунок 4.13).

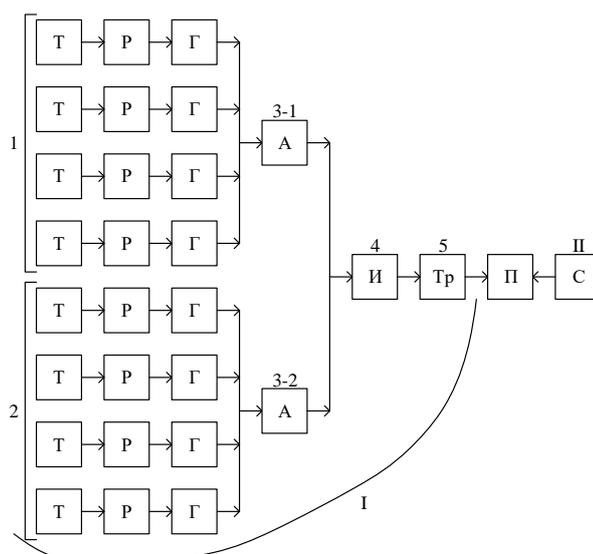


Рисунок 4.13 — Блок схема системы электроснабжения потребителя от генерирующего устройства и централизованной энергосистемы:

Т – турбина; Р – редуктор; Г – генератор; А – аккумуляторная батарея;  
И – инвертор; Тр – трансформатор; П – потребитель; С – общая энергосистема

Рассмотрим генерирующее устройство, состоящее из восьми преобразователей энергии волн, собранных в две группы по четыре штуки. Для накопления выработанной энергии используются аккумуляторные батареи, для ее преобразования – инвертор и трансформатор (рисунок 4.13).

В случае, если генерирующее устройство по каким-то причинам не может снабжать потребителя электроэнергией, будь то отсутствие волнения на море или отказ какой-либо из компонент устройства, потребитель подключается к общей энергосети.

В работе рассматривается семь возможных ситуаций, не приводящих к прекращению подачи электроэнергии потребителю (рисунок 4.14):

А – потребитель питается от генерирующего устройства;

Б – преобразователь энергии волн 1 отказал в момент времени  $\tau$ , аккумуляторная батарея 3-1 отказала в момент времени  $\xi$ , в оставшееся время  $t - \xi$  потребитель питается от общей энергосети;

В – преобразователь энергии волн 2 отказал в момент времени  $\tau$ , аккумуляторная батарея 3-2 отказала в момент времени  $\xi$ , в оставшееся время  $t - \xi$  потребитель питается от общей энергосети;

Г – аккумуляторная батарея 3-1 отказала в момент времени  $\tau$ , в оставшееся время  $t - \tau$  потребитель питается от общей энергосети;

Д – аккумуляторная батарея 3-2 отказала в момент времени  $\tau$ , в оставшееся время  $t - \tau$  потребитель питается от общей энергосети;

Е – инвертор 4 отказал в момент времени  $\tau$ , в оставшееся время  $t - \tau$  потребитель питается от общей энергосети;

Ж – трансформатор 5 отказал в момент времени  $\tau$ , в оставшееся время  $t - \tau$  потребитель питается от общей энергосети.

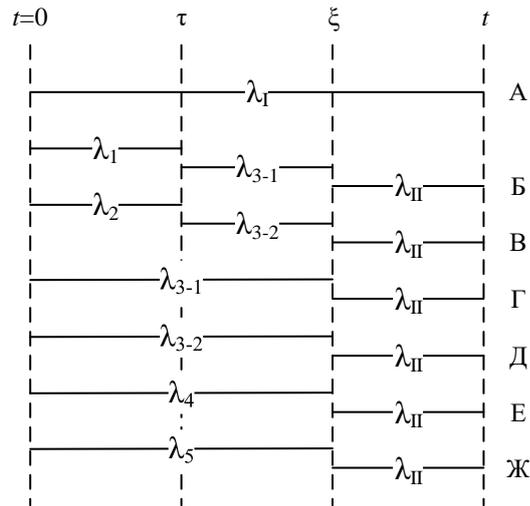


Рисунок 4.14 — График функционирования системы электроснабжения потребителя:

$\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -той компоненты преобразователя энергии волн

Считаем, что закон распределения времени наработки до отказа компонент преобразователя энергии волн экспоненциальный. Вероятность гипотез можно записать в следующем виде:

$$P_A(t) = P_I(t) = e^{-\lambda_I t}; \quad (4.7)$$

$$P_B(t) = \int_0^t f_1(\tau) \int_{\tau}^t f_{3-1}(\xi) P_{II}(t - \xi) d\xi d\tau = \frac{\lambda_1 \lambda_{3-1}}{\lambda_1 + \lambda_{3-1} - \lambda_{II}} \left[ e^{-t(\lambda_1 + \lambda_{3-1})} - 1 \right]; \quad (4.8)$$

$$P_C(t) = \int_0^t f_2(\tau) \int_{\tau}^t f_{3-2}(\xi) P_{II}(t - \xi) d\xi d\tau = \frac{\lambda_2 \lambda_{3-2}}{\lambda_2 + \lambda_{3-2} - \lambda_{II}} \left[ e^{-t(\lambda_2 + \lambda_{3-2})} - 1 \right]; \quad (4.9)$$

$$P_D(t) = \int_0^t f_{3-1}(\tau) P_{II}(t - \xi) d\tau = \frac{\lambda_{3-1}}{\lambda_{II} - \lambda_{3-1}} \left[ e^{-\lambda_{3-1} t} - e^{-\lambda_{II} t} \right]; \quad (4.10)$$

$$P_E(t) = \int_0^t f_{3-2}(\tau) P_{II}(t - \xi) d\tau = \frac{\lambda_{3-2}}{\lambda_{II} - \lambda_{3-2}} \left[ e^{-\lambda_{3-2} t} - e^{-\lambda_{II} t} \right]; \quad (4.11)$$

$$P_F(t) = \int_0^t f_4(\tau) P_{II}(t - \xi) d\tau = \frac{\lambda_4}{\lambda_{II} - \lambda_4} \left[ e^{-\lambda_4 t} - e^{-\lambda_{II} t} \right]; \quad (4.12)$$

$$P_{Ж}(t) = \int_0^t f_5(\tau) P_{II}(t-\xi) d\tau = \frac{\lambda_5}{\lambda_{II} - \lambda_5} [e^{-\lambda_5 t} - e^{-\lambda_{II} t}] \quad (4.13)$$

где  $P_I(t) = e^{-\lambda_1 t}$  – вероятность безотказной работы генерирующего устройства I в момент времени  $t$ ;  $f_1(\tau) = \lambda_1 e^{-\lambda_1 \tau}$ ;  $f_2(\tau) = \lambda_2 e^{-\lambda_2 \tau}$ ;  $f_{3-1}(\tau) = \lambda_{3-1} e^{-\lambda_{3-1} \tau}$ ;  $f_{3-2}(\tau) = \lambda_{3-2} e^{-\lambda_{3-2} \tau}$ ;  $f_4(\tau) = \lambda_4 e^{-\lambda_4 \tau}$ ;  $f_5(\tau) = \lambda_5 e^{-\lambda_5 \tau}$  – частота отказов преобразователя энергии волн 1 и 2, аккумуляторной батареи 3-1 и 3-2, инвертора 4, трансформатора 5, соответственно, в момент времени  $\tau$ ;  $f_{3-1}(\xi) = \lambda_{3-1} e^{-\lambda_{3-1} \xi}$ ;  $f_{3-2}(\xi) = \lambda_{3-2} e^{-\lambda_{3-2} \xi}$  – частота отказов аккумуляторной батареи 3-1 и 3-2, соответственно, в момент времени  $\xi$ ;  $P_{II}(t-\xi) = e^{-\lambda_{II}(t-\xi)}$  – вероятность безотказной работы общей энергосистемы на промежутке времени  $t-\xi$ .

Значения интенсивностей отказов компонент преобразователя энергии волн были взяты на основании статистических данных, представленных в опубликованных ранее работах, и равны:

$$\lambda_{турбина} = 0,5248 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч [83];}$$

$$\lambda_{редуктор} = 0,5818 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч [83];}$$

$$\lambda_{генератор} = 0,132 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч (электрическая машина постоянного тока) [80];}$$

$$\lambda_{аккумулятор} = \lambda_{3-1} = \lambda_{3-2} = 0,00754 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч (свинцово-кислотный аккумулятор) [80];}$$

$$\lambda_{инвертор} = \lambda_4 = 7,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч [81];}$$

$$\lambda_{трансформатор} = \lambda_5 = 0,014 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч (трансформатор питания) [80].}$$

Как известно, надежность электроснабжения потребителей оценивается по показателям SAIDI и SAIFI, где SAIDI – это показатель, равный средней продолжительности перерывов в электроснабжении на одного потребителя в год или отношению общей продолжительности ежегодных перерывов в работе

системы к общему количеству потребителей, а SAIFI – это показатель, равный среднему количеству перерывов в электроснабжении на одного потребителя в год или отношению количества ежегодных перерывов в работе системы к общему количеству потребителей. По состоянию на 2020 год эти показатели у ПАО «Россети» составили 0,61 часа и 0,41 шт, соответственно [82]. Ввиду отсутствия данных об интенсивности отказов общей энергосистемы для определения этого параметра были взяты статистические данные для синхронной электрической машины переменного тока [80]:

$$\lambda_{\text{энергосистемы}} = \lambda_{\text{II}} = 0,0004632 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}.$$

### Результаты и их обсуждение

На основании приведенных выше значений, были найдены следующие интенсивности отказов компонент для промежутков времени  $t=8760; 26280; 43800; 87600$  часов, что составляет 1, 3, 5 и 10 лет, соответственно:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 1,5482 \cdot 10^{-12}; 4,0032 \cdot 10^{-11}; 1,7752 \cdot 10^{-10}; 1,2761 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{ч}};$$

$$\lambda_{\text{I}} = 7,614 \cdot 10^{-6}; 7,6140015 \cdot 10^{-6}; 7,6140026 \cdot 10^{-6}; 7,6140068 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}.$$

Вероятность непрерывного электроснабжения потребителя составит:

$$P(t) = P_A(t) + P_B(t) + P_B(t) + P_G(t) + P_D(t) + P_E(t) + P_{\text{Ж}}(t). \quad (4.14)$$

Вероятность  $P(t)$  практически равна 1 независимо от рассматриваемого промежутка времени, что связано с высокой надежностью общей энергосистемы как резервного источника питания для потребителя.

Интерес представляет рассмотрение каждой гипотезы по отдельности с целью выявления наиболее вероятной причины прекращения электроснабжения потребителя с последующим составлением рекомендаций по повышению надежности. Зависимости вероятностей гипотез от времени представлены на рисунок 4.15. Дополнительная вертикальная ось добавлена для построения зависимостей вероятности гипотез Г, Д, Ж от времени.

Анализ результатов моделирования для рассматриваемых промежутков времени показывает, что на надежность электроснабжения потребителя от генерирующего устройства значительное влияние оказывает инвертор. Это является следствием того, что интенсивность его отказов максимальна среди компонент устройства. С увеличением срока эксплуатации устройства именно рост вероятности отказа инвертора негативно влияет на показатели надежности работы всего генерирующего устройства.

Для рассматриваемых промежутков времени вероятность отказа компонент 1 и 2, состоящих из 4 блоков Турбина-Редуктор-Генератор каждый, с последующим отказом аккумуляторной батареи равна 0. Вероятность отказа аккумуляторных батарей и трансформатора незначительна.

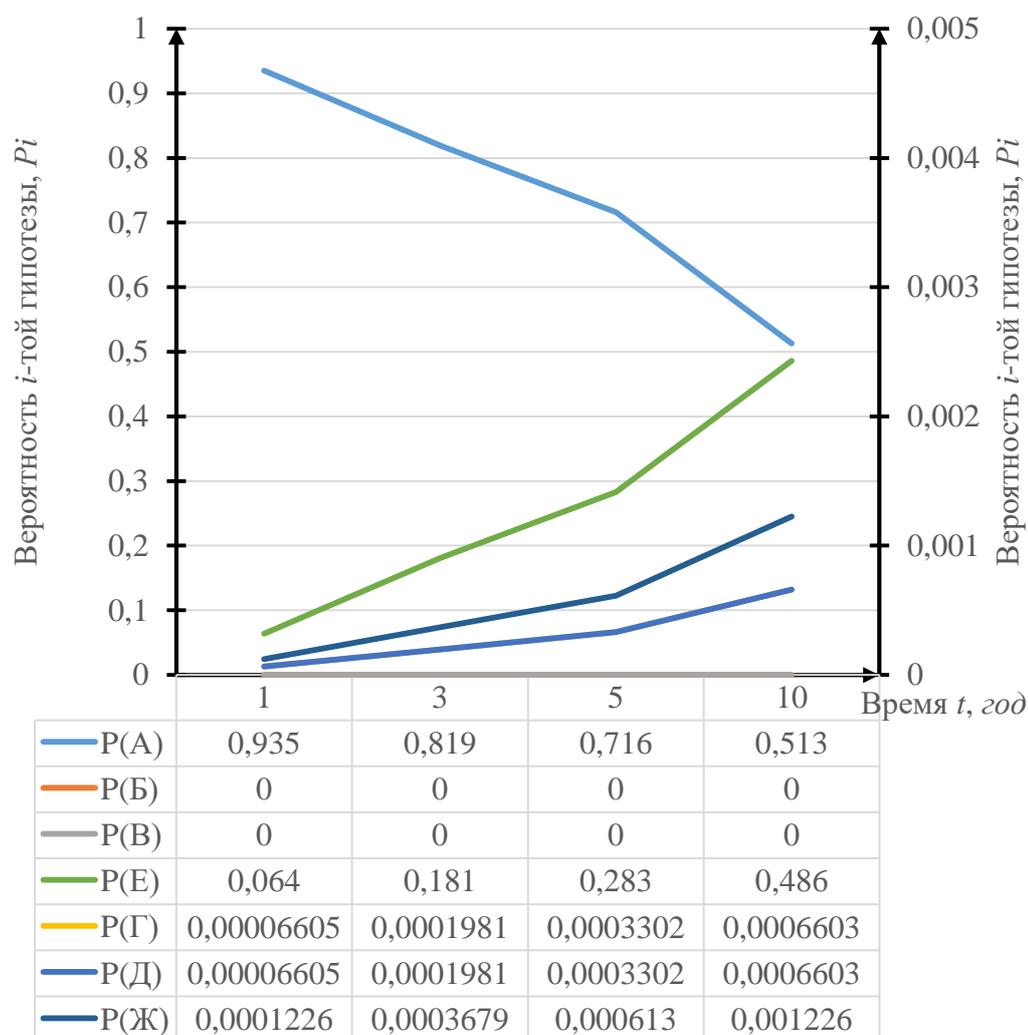


Рисунок 4.15 — Зависимости вероятностей гипотез от времени

#### 4.6 Выбор контроллера заряда

Для данного случая подходит контроллер заряда фирмы Hefei Win Power.

Производитель — Hefei Win Power контроллер модели WWS10A-48-E.

Контроллер для генератора и солнечных панелей, мощностью 1,5 кВт, 48 В. На корпусе предусмотрены ушки (4 шт.) для навесного исполнения.

Контроллер подходит для генераторов любого производителя мощностью от 1 кВт до 3 кВт, с трёхфазным выходом на контроллер и напряжением на фазах генератора от 10В до 120В.

Производитель: Hefei Win Power (Китай);

Торговое название: WWS10A-48-E;

Номинальное напряжение: 48 В;

Номинальная мощность: 1500 ватт - для генератора;

Максимальная мощность: 2000 ватт - для генератора;

Рабочая мощность: 300 ватт - для солнечных модулей;

Технология: PWM (ШИМ);

Максимальный ток от генератора: 40А;

Максимальный ток от СБ: 10А (СБ - солнечные батареи);

КПД – 95 %;

Гарантия: 1 год.

#### 4.7 Расчет и выбор аккумуляторных батарей

Определим число ампер-часов в неделю, требуемое для покрытия нагрузки переменного тока:

$$q_{\text{нед}}^{\text{пер}} = \frac{W_{\text{тр}}}{U_{\text{инв}}}, \quad (4.15)$$

где  $U_{\text{инв}}$  — выбранный инвертор имеет входное напряжение 24В;

$W_{\text{тр}}=1223$  кВт·ч/неделя — потребление электроэнергии.

$$q_{\text{нед}}^{\text{пер}} = \frac{1223 \cdot 10^3}{24} = 49000 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Суточное значение потребляемых А·ч

$$q_N = q_{\text{сут}} \cdot N_{\text{бс}}, \quad (4.16)$$

$$q_n = 7000 \cdot 1 = 7000 \text{ А} \cdot \text{ч.}$$

Задаемся величиной глубины допустимого разряда аккумуляторной батареи. Так как будут использоваться тяговые панцирные аккумуляторы глубокого разряда, глубину разряда можно принять 70%. Соответственно коэффициент использования  $y = 0,7$ .

Заряд аккумуляторных батарей с учетом глубины разряда:

$$q_y = \frac{q_n}{y}, \quad (4.17)$$

$$q_y = \frac{7000}{0,7} = 10000 \text{ А} \cdot \text{ч.}$$

Задаемся величиной глубины допустимого разряда аккумуляторной батареи. Так как будут использоваться тяговые панцирные аккумуляторы глубокого разряда, глубину разряда можно принять 70%. Соответственно коэффициент использования  $y = 0,7$ .

Выбираем аккумуляторную батарею Микроарт с номинальным напряжением  $U_{\text{ном}} = 2 \text{ В}$ , емкостью  $q_{\text{ном}} = 960 \text{ А} \cdot \text{ч}$  (таблица 4.4).

Аккумуляторы по 2 В, имеющие ёмкость до 1000 А·ч, что позволяет снижать их общее количество, а, следовательно, повышать надёжность.

Таблица 4.4 – Основные характеристики аккумуляторной батареи

Наименование	Аккумулятор тяговый панцирный 2 В 960 А·ч (глубокого разряда) АКБ Микроарт
Категория товара	АКБ тяговые, для автономных и резервных систем
U, В	2,0
Ёмкость, А·ч	960
Габариты [В×Г×Ш], см	66×16×20
Цена, руб.	16200,00

Количество батарей, соединенных параллельно:

$$N_{\text{пар}}^{\text{АКБ}} = \frac{q_{\text{общ}}}{q_{\text{ном}}}, \quad (4.18)$$

$$N_{\text{пар}}^{\text{АКБ}} = \frac{11100}{960} = 11,56. \text{ Принимаем } 12 \text{ штук.}$$

Количество батарей, соединенных последовательно:

$$N_{\text{пос}}^{\text{АКБ}} = \frac{U_{\text{инв}}}{U_{\text{ном}}}, \quad (4.19)$$

$$N_{\text{пос}}^{\text{АКБ}} = \frac{48}{2} = 24 \text{ штуки.}$$

Общее количество требуемых аккумуляторных батарей:

$$N^{\text{АКБ}} = N_{\text{пар}}^{\text{АКБ}} \cdot N_{\text{пос}}^{\text{АКБ}}, \quad (4.20)$$

$$N^{\text{АКБ}} = 12 \cdot 24 = 228 \text{ штук.}$$

#### 4.8 Расчет и выбор инвертора тока

Энергии постоянного тока с учетом потерь на инверторе требуется

$$W_{\text{тр}} = W_{\text{мр}} \cdot k, \quad (4.21)$$

где  $W_{\text{мр}} = 168$  кВт — суточное потребление электроэнергии.

В качестве  $W_{\text{мр}}$  примем недельное потребление электроэнергии:

$$W_{\text{мр}} = 7 \cdot 7 \cdot 24 = 1176 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{неделя.}$$

$k$  — коэффициент полезного действия на инверторе, 0,96;

$$W_{\text{тр}} = 1176 \cdot 0,96 = 1129 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{неделя}.$$

$$P_{\text{инв}} = \frac{W_{\text{мр}}}{n \cdot t_i}, \quad (4.22)$$

где  $n$  — число дней в неделе;

$t_i$  — число часов в сутки,

$$P_{\text{инв}} = \frac{W_{\text{мр}}}{7 \cdot 24},$$

$$P_{\text{инв}} = \frac{1223 \cdot 10^3}{7 \cdot 24} = 7,28 \text{ кВт.}$$

Выбираем инвертор фирмы МАП «Энергия» (табл. 4.5).

Таблица 4.5 – Характеристики инвертора

Категория товара	МАП Pro 24В
Мощность, кВт	6,00
КПД, %	96
U, В	24,0
U <sub>вых</sub> , В	220,00
~Частота, Гц	50
Пиковая мощность, кВт	8,00
Максимальная мощность, кВт	6,00
Номинальная мощность, кВт	4,00
Собственное потребление на хх, Вт	9,6 – 14,4
Встроенный	нет
Встроенная сетевая плата	нет
Реле управления генератором или др.	нет
Рабочий температурный диапазон, °С	-25...50
Габариты [В×Г×Ш], см	18×37×51
Масса без упаковки, кг	31,60
Цена, руб.	105000,00

Функции инвертора:

- отображение напряжений, токов, режимов работы и др. на ЖК экране;
- регулируемая четырёхступенчатая система заряда любых аккумуляторов, с термокомпенсацией;
- наличие байпаса (автоматическая трансляция 220 В);
- точная подстройка значения выходного напряжения, с возможностью установки его величины по желанию пользователя (в режиме генерации напряжения от МАП);
- возможность, по желанию пользователя, менять пороги напряжений начала/конца заряда;

- расчёт падения напряжения на проводах к АКБ в зависимости от тока и соответствующая корректировка напряжения;
- возможность связи с другими устройствами по шине I2C для их корректной совместной работы (солнечные контроллеры КЭС, BMS для литий-железофосфатных АКБ и др.).

#### 4.9 Экономическое обоснование

##### 4.9.1 Исходные данные

Проведем экономический расчет для волновой электростанции, включающей 7 участков, на каждом из которых расположено по 8 поплавков с генераторами постоянного тока. Мощность одного генератора составляет 3 кВт.

Предельный максимальный уровень тарифов на услуги по передаче электрической энергии для населения и приравненных к нему категорий потребителей  $T_T=2,05365$  руб./кВт·ч.

##### 4.9.2 Расчет стоимости инвестиционного проекта

Первоначальные затраты, необходимые для реализации проекта по генерации электроэнергии с помощью волновой электростанции приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Стоимость инвестиционного проекта

№ п/п	Наименование	Количество	Цена за единицу, руб	Стоимость, руб
1	Поплавков	8× 7	76850	4303600
2	Генератор постоянного тока	8× 7	23400	1310400
3	Аккумуляторная батарея 960 Ач	226	14200	3209200
4	Контроллер заряда	84	38101	3200484
5	Соединительный кабель	2000 м	157	314000
6	Кабельная линия стороны высокого напряжения	100 м	1 242	124200
7	Трансформатор 250/10/0,4	1	220 000	220 000
8	Инвертор	28	105000	2940000
			Итого $\sum K_i$	15 621 884

Стоимость инвестиционного проекта определяем по формуле:

$$K = \sum K_i + K_{\text{раб}}, \quad (4.23)$$

где  $\sum K_i$  – капитальные затраты на оборудование, которые находятся по формуле

$$\sum K_i = \sum_{i=1}^n C_i \cdot n_i, \quad (4.24)$$

где  $C_i$  – стоимость единицы  $i$ -оборудования;

$n_i$  – количество  $i$ -оборудования.

$K_{\text{раб}}$  – стоимость монтажа и пуско-наладочных работ системы. Обычно она составляет 10 – 20% от стоимости оборудования. Примем в расчете 15%. Тогда  $K_{\text{раб}} = 2\,343\,282,6$  руб.

Расчет ведем для каждой  $i$  строки таблицы 4.6.

В соответствии с формулой (4.13) стоимость инвестиционного проекта составляет

$$K = 18\,551\,740 + 2\,343\,282,6 = 20\,895\,022,6 \text{ руб.}$$

#### 4.9.3 Расчет издержек на обслуживание и ремонт оборудования

Капитальные вложения в последующие годы работы проекта для осуществления плановых ремонтов определяем по формулам:

$$K_T = \sum K_i \cdot k_T, \quad (4.25)$$

$$K_K = \sum K_i \cdot k_K, \quad (4.26)$$

где  $k_T = 0,005$  – коэффициент, учитывающий издержки для текущего ремонта;

$k_K = 0,01$  – коэффициент, учитывающий издержки для капитального ремонта.

Капитальный ремонт проводим каждый 10 год работы проекта. Текущий ремонт – каждый год.

В соответствии с формулами (4.24) и (4.55) капитальные вложения для проведения ремонтов:

$$K_T = \sum K_i \cdot 0,005 = 20\,895\,022,6 \cdot 0,005 = 104\,475,113 \text{ руб.}$$

$$K_k = \sum K_i \cdot 0,01 = 20\,895\,022,6 \cdot 0,01 = 208\,950,226 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления за год определяем для оборудования в сумме:

$$A = 0,005 \cdot \sum K_i = 20\,895\,022,6 \cdot 0,005 = 104\,475,113 \text{ руб.}$$

Таким образом, общие издержки за первый год работы:

$$И = K_T + A = 104\,475,113 + 104\,475,113 = 208\,950,226 \text{ руб.}$$

#### 4.9.4 Расчет дохода от продажи электроэнергии за год

Для начала необходимо определить энергию  $W$ , генерируемую волновой электростанцией. Ее номинальная мощность составляет 168 кВт. Генерация с номинальной мощностью осуществляется при высоте волн от 0,75 до 1,5 м. При меньших высотах волн, например, летом, генерируются меньшие мощности. Принимаем, что генерация будет происходить не круглогодично и могут наблюдаться штили, соответственно  $W=981120$  кВт·ч.

При закупочной цене на электроэнергию (без сбытовых надбавок)  $T_T = 2,05365$  руб./кВт·ч доходы от продажи электроэнергии составят:

$$Д = T_T \cdot W = 981120 \cdot 2,05365 = 2\,014\,877,088 \text{ руб.}$$

#### 4.9.5 Составление финансового плана

Для расчета срока окупаемости проекта и наглядного представления движения денежных средств составляем финансовый план. Для этого рассчитываем значение денежных потоков для каждого года работы рассматриваемого объекта.

Денежный поток рассчитывается по формуле:

$$F_t = D_t - И_t - K_t, \quad (4.27)$$

где индекс  $t$  – номер года;

$K$  – стоимость инвестиционного проекта;

$D$  – доход от продажи электроэнергии за год, руб.;

$И$  – издержки на обслуживание и ремонт оборудования в течение года, руб.

За первый год полностью выполняется монтаж оборудования.

При расчетах по формуле (4.16) учитывается уровень инфляции, который на начало 2022 года составляет 5%.

Чистая стоимость проекта дает возможность оценить финансовое состояние объекта для каждого года. В момент, когда чистая стоимость пересекает ось времени (становится положительной), наступает срок окупаемости.

Чистая стоимость проекта рассчитывается по формуле:

$$Q_t = \sum_{i=1}^t F_i. \quad (4.28)$$

Данные о затратах, доходах, денежных потоках и чистой стоимости проекта сводим в таблицу 4.7.

По значениям  $Q$  из таблицы 4.17 строим график зависимости чистой приведенной стоимости от времени эксплуатации (рисунок 4.16).

Таблица 4.7. Денежные потоки и чистая стоимость

Год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
К	17965167	0	0	0	0	0	0	0	0	156218,84
И	156218,84	164029,782	172231,271	180842,8	189885	199379,2	209348,2	219815,6	230806,4	242346,69
Д	2014877,1	2115620,94	2221401,99	2332472	2449096	2571550	2700128	2835134	2976891	3125735,7
F	-16106508	1951591,16	2049170,72	2151629	2259211	2372171	2490780	2615319	2746085	2727170,1
Q	-16106508	-14154917	-12105746,5	-9954117	-7694907	-5322735	-2831955	-216637	2529448	5256618,3

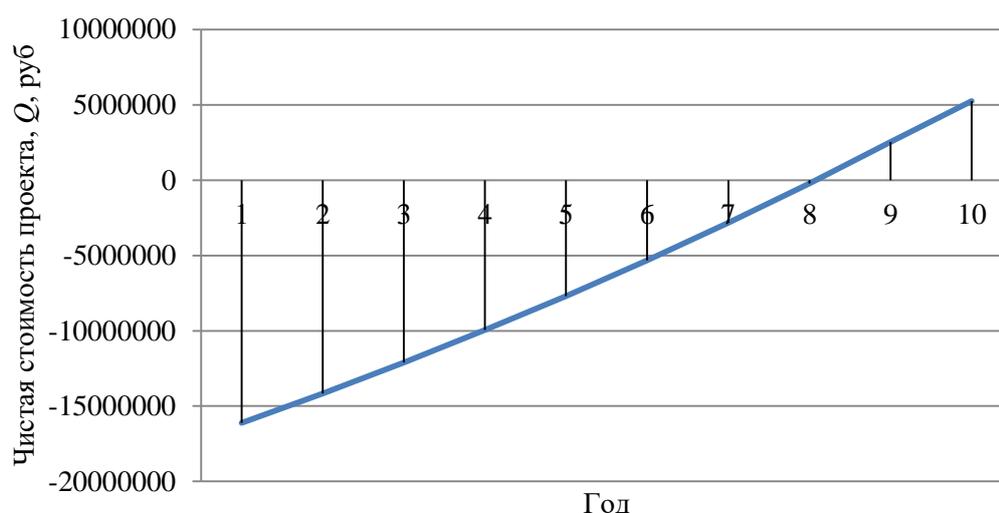


Рисунок 4.16 — График чистой стоимости проекта

Таким образом, срок окупаемости проекта составит 8 лет.

Срок окупаемости проекта должен быть сравним со сроками окупаемости альтернативных проектов, чтобы обеспечить конкурентоспособность и «выживаемость» в рыночных условиях.

#### 4.10 Выводы по главе

1. Разработан энергоагрегат для волновой электростанции. Изготовлена модель устройства. Проведены экспериментальные исследования опытной модели энергоагрегата. По полученным данным построен график. В результате испытаний были получены значения мощности.

2. Получены уравнения для оценки надежности работы системы электрогенерации с использованием 8 энергоагрегатов волновой электростанции (ВлЭС). Энергоагрегат состоит из турбины, редуктора, электрического генератора постоянного тока, аккумуляторной батареи, инвертора.

3. Проведен экономический расчет инвестиционного проекта для волновой электростанции, включающей 7 участков, на каждом из которых расположено по 8 энергоагрегатов поплавкового типа с генератором постоянного тока. Определен срок окупаемости проекта, который составит 8

лет с учетом ежегодной инфляции. Окупаемость может быть ниже при увеличении мощности энергоагрегатов, уменьшении стоимости основных элементов энергоагрегата. Для энергообеспечения хозяйств, расположенных на островах или в труднодоступных местах, такой тип электрогенерации может быть основным.

4. Разработанная на основе результатов исследования волновая электроустановка рекомендована к внедрению в прибрежной зоне г. Судака для электроснабжения потребителей сельскохозяйственного назначения и электроосвещения набережной (Приложение А).

5. Эксперты СО ФГБУ "Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова" подтвердили актуальность полученных в диссертационной работе результатов (Приложение Б).

## Заключение

1. Полученное в параметрическом виде уравнение трохoidalной волны позволяет определить кинетическую энергию морской волны, а, следовательно, оценить потенциал использования энергии волн Черного и Азовского морей при различных условиях, обусловленных климатическими факторами. Полученная суммарная энергия морской волны высотой 1,5 м, скоростью 3 м/с, массой 1594 кг составила 43961 Дж, при этом 7173 Дж – кинетическая энергия и 36788 Дж - потенциальная.

2. Разработанное электронное устройство для измерения параметров морских волн позволяет хранить и передавать измеренную информацию и может быть установлено как в прибрежной зоне, так и на значительном удалении от береговой полосы. Повышение точности измерений удается добиться за счёт упрощения схемотехнического решения устройства и применения современных электронных блоков и микроконтроллера. Погрешность измерения скорости волны составляет 1,4%. Описанный алгоритм работы измерителя параметров волн позволяет установить порядок срабатывания и определения параметров волны.

3. Разработанный преобразователь энергии волн поплавкового типа в виде герметичного сосуда, внутри которого под действием колебаний морской поверхности поршень перекачивает газ, приводя в движение турбину и генератор, обладает высокой надежностью из-за наличия небольшого количества составных элементов и отсутствия непосредственного контакта внутренней полости, где расположен генератор, с морской водой. Была разработана методика экспериментального исследования преобразователя поплавкового типа, которая включала замену воздуха в экспериментальном образце на углекислый газ и изменение высоты колебаний, что позволило оценить основные электрические параметры, такие как ток, напряжение и мощность в разных условиях с целью выявления наиболее эффективной рабочей среды. При выполнении эксперимента, с перекачиванием воздуха

внутри буя, выходная мощность с генератора составила 4,4 Вт, при высоте колебания 0,25 метра, а также при замене воздуха углекислым газом большой плотности выходная мощность генератора составила 7,2 Вт.

4. Составленная математическая модель преобразователя энергии волн в электрическую энергию описывает его работу при заданных характеристиках волн и параметрах самого преобразователя. При высоте и периоде морской волны, которые равны до 2 м и 1,79 с, соответственно, что характерно для прибрежных вод Черноморского побережья Крыма, выработка разработанного преобразователя составила 72 кВт·ч / сутки.

5. Перспективой дальнейших исследований является изготовление опытных образцов преобразователей энергии волн с генераторами различного типа и мощности, проведение натурных испытаний с целью определения оптимальных характеристик преобразователей на основе сравнения полученных в результате проведенных экспериментов параметров.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

- ВЭУ – ветроэнергетическая установка;
- СЭУ – солнечная энергетическая установка;
- ВлЭУ – волновая энергетическая установка;
- К – контроллер;
- ВВП – валового внутреннего продукта
- ВИЭ – возобновляемых источников энергии
- МГЭС – микро-ГЭС
- ГЭС – гидроэлектростанция
- ГЭУ – гидроэлектрическая установка
- СПГ – сжижения природного газа
- ИНЭ – инерционный накопитель энергии
- ГАЭС – гидроаккумулирующая электростанция
- В – выпрямители;
- $\Sigma$  – сумматор напряжений и токов;
- АБ – аккумуляторная батарея;
- И – инвертор трехфазный;
- ТН – трансформатор.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roman A. Vorontsov., Nina M. Pestereva. The Basic Principles of Energy Conservation Policy in Russia at the Present Stage. *European Researcher*, 2013, Vol.(39), № 1-2.
2. Государственное управление Российской Федерации: вызовы и перспективы // Материалы 15-й Международной конференции Государственное управление в XXI веке: сборник, электронное издание сетевого распространения / Коллектив авторов. – М.: «КДУ», «Университетская книга», 2018. – 856 с.
3. Tianyu Zhang, Xinyu You. Application of wave power generation technology. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 242 (2019) 022006.
4. Per Holmberg, Magnus Andersson, Bjorn Bolund, Kerstin Strandanger. *Wave Power. Surveillance study of the development*, Elforsk, 2011. P. 47.
5. James R Joubert, Johannes L van Niekerk, Josh Reinecke, Imke Meyer. *Wave Energy Converters (WECs)*. Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, 2013. P. 95.
6. Rafael Waters, 2008. *Energy from Ocean Waves. Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter*. Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 580. 130 pp. Uppsala.
7. Peter Meisen, Alexandre Loiseau, 2009. *Ocean Energy Technologies For Renewable Energy Generation*. Global Energy Network Institute. 27 p.
8. António F. O. Falcão, 2014. *Modelling of Wave Energy Conversion*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 38 p.
9. Markel Penalba and John V. Ringwood, 2016. A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters. *Energies*. doi:10.3390/en9070506.
10. B Drew, A R Plummer, and M N Sahinkaya (2016) "A review of wave energy converter technologies" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. Vol 223, Issue 8, pp. 887 - 902.

11. Lafsah M, Ibrahim M, & Albani A, "The Development of Wave Energy Conversion Device to Generate Electricity", AMM, Vol.773-774, (2015), pp:460-464.
12. Muetze, J.G. Vining. Ocean Wave Energy Conversion - A Survey. IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2006. Vol. 3: 1410 – 1417.
13. Shun Okamoto, Toshiaki Kanemoto, Bin Huang, Toshihiko Umekage. Counter-Rotating Type Wells Runners for Floating Wave Power Station. Conference: AFORE 2014, At Yeosu, 2014.
14. Rahmat Saptono. Selection of Materials for the Aerofoil Blades of a Wells Turbine Operated in an Oscillating Water Column (OWC) Wave Power Station. The 7th International Conference Quality in Research (QIR) 2004, At Depok
15. Shun Okamoto, Tatsuya Kinoshita, Toshiaki Kanemoto. Floating Type Ocean Wave Power Station At Various Wave Circumstances. The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, 17-22 June, Rhodes, Greece, 2012.
16. Janis Berins. Technical analysis of the economic viability of sea wave power stations. 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2016.
17. Kanchana Amarasekara, Gayan Abeynayake, Manjula Fernando, Atputharajah Arulampalam. A prefeasibility study on ocean wave power generation for the southern coast of Sri Lanka: Electrical feasibility. International Journal of Distributed Energy Resources and Smart Grids. Volume 10 Number 2 (2014). Pages 79 – 93.
18. Md. Mahbubur Rahman , Nirupom Paul , Md. Saiful Islam, Md.Sa fi Rashed, Shahr ior Ahmed, 2013. Power Generation from Sea Wave: An Approach to Create Renewable Energy. Global Journal of Researches in Engineering. General Engineering, Volume 13 Issue 1. P. 12-17.
19. F. Danang Wijaya and B. Azhari, "Analytical design and optimization of flat-quasi linear generator for sea wave power plant in South Java Ocean," 2016 8th Int.

Conf. on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Yogyakarta, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863276

20. John Kaldellis, Theodoris Chrysikos. Wave energy exploitation in the Ionian Sea Hellenic coasts: spatial planning of potential wave power stations. *International Journal of Sustainable Energy*, 2018. 38(4):1-21.

21. Raymond Alcorn, W.C. Beattie. Power quality assessment from a wave-power station. Conference: Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482) , 2001, Volume: 4.

22. Безруков, Ю.Ф. Динамические явления и процессы в океане Часть II // Министерство науки и образования Украины Таврический национальный университет им. В.И.Вернадского Географический факультет Кафедра физической географии и океанологии. Симферополь 2006г.

23. Энергия морских волн. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://userospu/odessa.ua/~shev/emd\\_m/nie/1\\_2\\_9/htm](http://userospu/odessa.ua/~shev/emd_m/nie/1_2_9/htm)

24. Каратунова Н.Г., Никитина Т.А. Чрезвычайные ситуации в водоохранных зонах водных объектов Ейского района Краснодарского края. Экономика. Право. Печать. Вестник КСЭИ. 2018. № 2 (78). С. 123-128.

25. Поверхностные течения Черного моря [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://blacksea7.com/o-chernom-more/155-poverhnostnye-techenija-v-chernogo-morja.html>

26. Сичкарев В. И., Акуличев В. А. Волновые энергетические станции в океане. – Л.: Наука, 1989. 134 с.

27. Соболев В.Ю., Городничев Р.М. Волновые электрические станции // Малая энергетика. 2014. №1/2. С. 20-31.

28. Федоров Д. В. Лизинг – новое экономическое направление развития малой и нетрадиционной энергетики: дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н.: Спец. 08.00.05, 05.14.04. М., 2003. 158 с.

29. Ocean Energy Technology: Overview Prepared for the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy // Federal Energy Management Program. 2009. July. 32 p.

30. Родионов, В.Г. Энергетика: Проблемы настоящего и возможности будущего / В. Г. Родионов. — Москва: ЭНАС, 2010. — 352 с. — ISBN 978-5-4248-0002-3.

31. Альтернативные источники энергии: морские волны и течения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.mining-portal.ru/publish/alternativnyie-istochniki-energii--morskie-volnyi-i-techeniya/>

32. Yanis Berins. Ternical analysis of the economic viability of sea wave power stations. 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2016.

33. Pelamis Wave Power Publicado el 26 de enero de 2012 por juncal903087 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://kresalaenergia.wordpress.com/2012/01/26/pelamis-wave-power/>

34. Великанов, Н. Л. Гидросиловые установки и возобновляемые источники энергии : учеб. / Н. Л. Великанов; КГТУ. - Калининград: КГТУ, 2006. - 200 с. – ISBN 5-94826-131-X.

35. Типы волновых электростанций: плюсы и минусы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://altenergiya.ru/gidro/typy-volnovyx-elektrostancij.html>.

36. Жильцов С.А., Карпушин А.А. Опыт и перспективы развития волновой энергетики. Международные научные исследования. 2017. № 3 (32). С. 28-35.

37. Yanis Berins. Ternical analysis of the economic viability of sea wave power stations. 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2016.

38. Shun Okamoto, Tatsya Kinoshita, Toshiaki Kanemoto. Floating Type Ocean Wave Power Station At Various Wave Circumstances. The twenty-second

International Offshore and polar Engineering Conference, 17-22 Yune, Rhodes, Greece, 2012.

39. Jogn. Kaldellis, Theodoris Chrysiros. Wave energy exploitation in the Ionian Sea Hellenic coasts: spatial planning of potential Wave power stations. International yourhal of sustainable Energy, 2018.38 (4): 1-21

40. Raymond Alcorn, W.C. Beattie. Power guality assessment from a wave – power station. Conference: Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED/ 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ N0.482), 2001, Volume: 4

41. Rahmat Saptono. Selection of Materials for the Aerofoil Blades of a Wells Turbine. Operated in an Oscillating Water Column (OWC) Wave Power Station The 7th International Conference Quality in Research (QIR) 2004, At Depor <https://www/researchgate.net./publection/317379536> Selection of Materials for the A erofoil Blades of a wells Turbine Operated in an Oscillating Water Column OWC Wave Power Station

42. Kanchana Amarasekara, Gayan Abeymayake, Manjula Fernando, Atputharajah Arulampalam . A prefeasibility study on ocean wave power generation for the southern coast of Sri Lanka: Electrical feasibility. International Yornal of Distributed Energy Resources and Smart Crids. Volume 10 Number 2 (2014), Pafes 79-93. <https://www/researchgate.net/publication/262639763> A perfeasibility study on ocean wave power generation for the southern coast of sri Lanka Electrical feasibility.

43. Tianyu Zhang, Xinyu You. Application of wave power generation technology. IOP Conf Series: Earth and Environmental Science 242 (2019) 022006

44. Sami Salama Hussen Hajjaj, A.F.B.A. Nasri. Simulated analysis and review of ocean wave power generators/ International Yournal of Engineering & Technologe, 7(4.35) (2018) 1-4 <http://www/researchgate.net/publication/330193377> Simulated analysis and review of ocean wave power generators/

45. Per Holmberg, Magnus Andersson, Bjorn Bolund, Kerstin Strandanger. Wave Power. Surveillance study of the development. Elforsk, 2011. P47 приложенный

файл «wave-power-surveillance-study-of-the-development-elforskrappporter-2011-02»

46. James R Joubert, L van Niekerk, Josh Reinecke, Imke Meyer. Wave Energy Converters (WECs). Center for Renewable and Sustainable Energy Studies, 2013. P.95. Приложенный файл «WECs\_2013\_list»

47. Md. Mahbubur Rahman, Nirupom Paul, Md. Saiful Islam, Md.Sa fi Rasged, Shahr ior Ahmed, 2013. Power Generation from Sea Wave: An Approach to Create Renewable Energy. Global Journal of Researches in Engineering. General Engineering, Volume 13 Issue 1. P.1 12-17 Приложенный файл «3-Power-Generation-from-Sea-Wave-An»

48. Peter Meisen, Alexandre Loiseau, 2009. Ocean Energy Technologies For Renewable Energy Generation. Global Energy Network Institute. 27 p. Приложенный файл «Ocean Energy Technologies»

49. Rafael Waters, 2008. Energy from Ocean Waves. Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter. Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 580. 130pp. Uppsala. Приложенный файл «FULLTEXT01»

50. Antonio F.O. Falcao. 2014 Modelling of Wave Energy Conversion. Instituto Superior Tecnico, Iniversidade Tecnica de Lisboa. 38 p. Приложенный файл «Chapter1 (2014)».

51. Markel Penalba and John V. Ringwood, 2016. A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters. Energies 9, 506.9070506. 45 p. Приложенный файл «energies-09-00506».

52. Волновая электрическая установка. Патент на полезную модель РФ. Сеньков А.П., Колмыков А.Н., Сеньков А.А. RU 158924 U1, Бюл. №2, 2016.

53. Патент РФ RU 2578615 C1 «П оплавковая волновая электростанция плавучего завода сжижения природного газе (СПГ)» Беллендир Е.Н., Петрашкевич А.В., Петрашкевич В.В., Собкалов А.Ф., Собкалов Ф.П. Бюл №9, 2016г.

54. Патент SU 1321902 A1 Волновая энергетическая установка F03B 13/12 1987

55. Патент РФ Ru 2538989 Поплавковая электростанция. Кастюкевич С.М. Бюл №1, 2015

56. Патент № 2513070 Российской Федерации. Поплавковая волновая электростанция. Сеньков Андрей А.А., Сеньков А. П., Калмыков А. Н.

57. Патент № 2 037 642 Российской Федерации. МПК F03b13/16 Поплавковая волновая электростанция: № 93043446/29, заявл. 31.08.1993. Опубликовано: 19.06.1995. Преобразование энергии волн. М.: Энергоатом издат, 1985 с. 102 – 103.

58. Гидроаккумулирующая электростанция на энергии морских волн. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.facte.eu/energiya-vody/gidroakkumuliruyushchaya-elektrostantsiya-energii-voln>

59. Патент Украины №56481 Волновая Электростанция Конструкции Овсянкина [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://krok-1.com/en/tema/>

60. Росс Дэвид. ЭНЕРГИЯ ВОЛН / Д. Росс. ENERGY FROM THE WAVES THE FIRST-EVER BOOK ON A REVOLUTION IN TECHNOLOGY By David Ross Pergamon Press Oxford New York Toronto Sydney Paris Frankfurt — ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1981. P76 112 с. с илл.

61. Альтернативные источники энергии: энергия волн. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://works.doklad.ru/view/zDFHGfbJ-zY.html>

62. Д.В. Ивонин, С.А. Мысленков, П.В. Чернышов, В.С. Архипкин, В.А. Телегин, С.Б. Куклев, А.Ю. Чернышова, А.И.Пономарев, З.А. Халиков. Система мониторинга ветрового волнения в прибрежной зоне черного моря на основе радиолокации, прямых наблюдений и моделирования: первые результаты.

63. Матушевский, Г.В. Теоретические и прикладные аспекты применения спектральных моделей ветрового волнения / Г.В. Матушевский, И.М.

Кабатченко // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 3. – С. 47-54. – EDN PNQAYL.

64. Сичкарев В.И., Шпак А.С. Анализ и классификация технических средств преобразования волновой энергии // Использование энергии приливных и ветровых волн в океане. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 33-40.

65. Возобновляемые и вторичные источники энергии. Энергетические ресурсы океана. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://msd.com.ua/vozobnovlyaemye-i-vtorichnye-istochniki-energii/energiya-okeana/>

66. Безруков Ю.Ф. Колебания уровня и волны в Мировом океане Учебное пособие. - Симферополь: Таврический национальный университет им.В.И. Вернадского, 2001.–50с.

67. Ба Поидэ С., Гусейнов Ч.С. Влияние волн на подводное плавучее сооружение. Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2014. № 1 (274). С. 76-85.

68. Теоретические основы волновой энергетики [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://ship.ee/wave\\_energy/theoretical-foundations/](https://ship.ee/wave_energy/theoretical-foundations/)

69. Акустика Кинематика волнового движения. Уравнение волны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://rud.exdat.com/docs/index-778668.html>

70. Gippius, K. P. Koltermann, and G. V. Surkova Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study V. S. Arkhipkin, F. N. Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia Received: 16 December 2013 – Published in Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.: 6 February 2014 Revised: 29 August 2014 – Accepted: 6 September 2014 – Published: 5 November 2014

71. Ванаев А.П., Чернявец В.А. «Определение параметров волнения совмещенной системой измерения скорости судна и высоты волны» – Судостроение № 8-9, 1993, с. 6-8.

72. Чернявец В.В., Ванаев А.П., Небылов А.В. «Устройство измерения параметров волнения» Патент РФ № 2137153, 1999.

73. Добровольский Д.Д., Путьшев Н.Н., Якубовский Е.Г. «Радиационный способ определения параметров морской поверхности и устройство для его осуществления» Патент РФ № 2024034, 1994.

74. В.Д. Андреев. Теория инерциальной навигации. М., Наука, 1966, 580 с.

75. Ю.М. Смирнов, Г.И. Воробьев. Специализированные ЭВМ. М., Высшая школа, 1989. – 144 с.

76. Комплект БИС К 1804 в процессорах и контроллерах. В.М. Мещеряков, И.Е. Лобов, С.С. Глебов и др. – Под ред. В.Б. Смолова / М., Радио и связь, 1990, - 256 с.

77. Волосов П.С., Дубинко Ю.С. и др. Судовые комплексы спутниковой навигации. – Л., Судостроение, 1983 г. – 272с.

78. Ривкин С.С. Определение линейных скоростей и ускорений качки корабля интернациональным методом. – Л.; ЦНИИ «Рубин», 1980. – 180 с.

79. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. В.С. Шибшевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др. – М.; Радио и связь, 1982, 272 с.

80. Бортовые устройства спутниковой радионавигации / Н.В. Кудрявцев, И.И. Мищенко, А.И. Волынкин и др. – М.; транспорт. 1988 – 201 с.

81. Патент № 2689539 Российская Федерация, МПК G01S 15/88 (2006.01), Устройства для измерения параметров морской волны: № 2017141849: заявл. 30.11.2017; опубликовано 29.05.2019 Бюл. № 16 Бекиров Э.А., Муртазаев Э.Р., Алькатаа Ахмед М.М

82. Головки С.В., Кононенко С.В., Романенко Н.Г. Технологическая схема экспериментальной установки отслеживания положения судна на базе микропроцессорных устройств. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 4. С. 7-16.

83. Arduino.ru [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://arduino.ru/forum/apparatnye-voprosy/kak-proshit-16u2-na-mega-2560>
84. Муртазаев, Э.Р. Экспериментальное исследование устройства преобразования энергии волн / Э.Р. Муртазаев, Л.Н. Циперко // Агротехника и энергообеспечение – 2021. - № 4 (33). – С. 42-48.
85. Прытков С.Ф., Горбачева В.М., Борисов А.А. и др. Справочник. Надежность электрорадиоизделий. – М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2002. – 574 с.
86. Sayed A., El-Shimy M., El-Metwally M. and Elshahed M. Reliability, Availability and Maintainability Analysis for Grid-Connected Solar Photovoltaic Systems // Energies. – 2019. – 12. – 1213.
87. «Россети» третий год подряд улучшают показатели надежности – итоги ОЗП 2019-2020. URL: [https://rossetimr.ru/press/company\\_news/item198288.php](https://rossetimr.ru/press/company_news/item198288.php) (Дата доступа 18.02.2022).
88. Шкурченко И. З. Механика Жидкости И Газа, Или Механика Безынертной Массы II.
89. Возобновляемая и альтернативная энергетика: ресурсосбережение и защита окружающей среды. Томск, Издательство “СПБ Графика”, 2011г. – 138с.
90. Topic D., Sljivac D., Stojkov M. Reliability model of different wind power plant configuration using sequential monte carlo simulation // Maintenance and Reliability. – 2016. – 18 (2). – P. 237–244.
91. Германович, В. А. Альтернативные источники энергии. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы / В. А. Германович, А. М. Турилин. - Москва: Научная литература, 2011. - 320 с.
92. Бернштейн Л.Б. Приливные электростанции. Под ред. М.: Энергоатомиздат, 1987. - 296 с.
93. Васильев Ю.С., Виссарионов В.И., Кубышкин Л.И. Решение гидроэнергетических задач на ЭВМ. 1987., 160 стр

94. Виссарионов В.И. и др. Водно-энергетические и водохозяйственные расчёты. Издательство МЭИ, 2001, 56 стр.

95. Al Rahman A., Khan K.A. The Present Situation of the Wave Energy in Some Different Countries of the World. COPYRIGHT, 2011. Pp. 89-95;

96. Blunden L.S., Batten W.M.J., Harrison M.E., Bahaj A.S. Comparison of boundary layer and field models for simulation of flow through multiple-row tidal fences. Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 2009.

97. Falnes J. Ocean Waves and Oscillating Systems. Cambridge University Press, 2002. 288 p.

98. Stefanovich M.A., Fernández Chozas J. Toward Best Practices for Public Acceptability in Wave Energy: Issues Developers Need to Address. - 3rd International Conference on Ocean Energy, 06.10.2010, Bilbao, 2010. Pp. 1-9;

99. Twidell J., Weir A.D., Weir T. Renewable Energy Resources. Taylor and Francis. 2006. 601 p.

100. Шилова Л. А., Соловьев Д. А. Анализ эффективности развития и модернизации в возобновляемой энергетике // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник трудов XVII Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. 23–25 апреля 2014. М. : МГСУ, 2014. С. 479-483.

101. Егоров Н.И. Физическая океанография. 2-ое изд. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 456 с.

## Приложения

### Приложение А – Акт внедрения результатов



АДМІНІСТРАЦІЯ  
МІСТА СУДАК  
РЕСПУБЛІКИ КРИМ



АДМИНИСТРАЦИЯ  
ГОРОДА СУДАКА  
РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

КЪЫРЫМ  
ДЖУМХУРИЕТИНИНЪ  
СУДАКЪ ШЕЭР ИДАРЕСИ

ул. Ленина, 85а, г. Судак, Республика Крым, Российская Федерация, 298000, тел.: +7 (36566) 3-15-03, факс: +7 (36566) 3-47-73  
e-mail: admin@sudakgs.rk.gov.ru

От 05.05.2022 № 01.01-19/1623

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

#### АКТ внедрения результатов исследования

о рекомендации внедрения результатов диссертационного исследования Муртазаева Э.Р. на тему «Разработка энергоэффективных устройств для преобразования энергии морских волн в электрическую энергию в условиях Крыма», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.08 «Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии».

Работа посвящена разработке устройства для преобразования энергии волн в электрическую энергию с перспективой его использования в прибрежных районах Черного моря. Проведено исследование работы волновой электроустановки (ВлЭУ). Разработанная волновая электроустановка рекомендована в прибрежной зоне г. Судак для электроснабжения сельскохозяйственного назначения и электроосвещение набережной.

Заместитель главы  
администрации города Судак

Д.Н. Ткаченко

Приложение Б – СО ФГБУ "Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова"

Председателю ученого совета  
Д 006. 110. 02  
Д.т.н Васильеву А.Н.

**Уважаемый Алексей Николаевич!**

По просьбе Муртазаева Э.Р. работниками СО ФГБУ "Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова" была проведена верификация представленных в диссертационной работе данных. Диссертационное исследование Муртазаева Э.Р. на тему «Разработка энергоэффективных агрегатов для преобразования энергии морских волн в электрическую энергию в условиях Крыма» посвящено анализу параметров морских волн вблизи побережья Республики Крым с последующей разработкой энергоагрегата по преобразованию энергии морских волн в электрическую энергию.

Научный интерес представляют полученное уравнение трохoidalной волны в параметрическом виде и разработанный энергоагрегат поплавкового типа для преобразования энергии волн в электрическую энергию, который может быть использован вблизи побережья Республики Крым, а найденное уравнение трохoidalной волны в параметрическом виде может быть использовано для расчетов оценки эффективности преобразования энергии волн в электрическую энергию.

Считаем после исправления замечаний и пожеланий устно указанных автору целесообразным дальнейшее рассмотрение данной диссертационной работы на предмет возможной защиты в вашем диссертационном совете.

Ведущий научный сотрудник лаборатории гидромеханики  
СО ФГБУ "Государственный  
океанографический институт имени Н.Н.Зубова"

Сафонов В.А.

Старший научный сотрудник лаборатории гидромеханики  
СО ФГБУ "Государственный  
океанографический институт имени Н.Н.Зубова"

Липченко А.Е.

Директор. СО ФГБУ "Государственный  
океанографический институт имени Н.Н.Зубова"  
Канд. географ. наук, чл.-корр. Крымской Академии Наук  
Главный специалист-эксперт ГАУ  
"Государственная экспертиза г. Севастополя"  
Член Общественного совета при Департаменте  
Росгидромета по ЮФО и СКФО



Дьяков Н.Н.