

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СОЧИНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Вялый Елисей Александрович

**МЕТОДИКА НАУЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ИСКУССТВЕННЫХ ОСТРОВОВ**

2.1.6 – «Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная
гидрология»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Макаров Константин Николаевич

Сочи – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. Проблемы и перспективы строительства искусственных островных комплексов.....	13
1.1 Российский и зарубежный опыт строительства искусственных островов.....	13
1.2. Экспериментальные исследования на этапе проектирования островных сооружений.....	23
Выводы по главе и постановка задач дальнейших исследований.....	40
Глава 2. Классификация типов конструкций искусственных островов.....	44
2.1. Обзор типов конструкций островных сооружений.....	44
2.2. Классификация и условия применимости типов конструкций искусственных островов.....	59
Выводы по главе.....	63
Глава 3. Теоретические исследования сквозных волногасителей.....	64
Выводы по главе.....	77
Глава 4. Экспериментальные исследования сквозных волногасителей.....	79
4.1. Постановка задач физического моделирования.....	79
4.2. Первая серия опытов. Сопоставление эффективности работы различных конструкций.....	85
4.3. Вторая серия опытов. Откосно-ступенчатая конструкция – изменение параметров ветровых волн.....	91
4.4. Третья серия опытов. Откосно-ступенчатая конструкция – изменение сквозности.....	101
4.5. Четвертая серия опытов. Откосно-ступенчатая конструкция – изменение объема волновой камеры.....	106
Выводы по главе.....	113
Глава 5. Методические рекомендации по научному обоснованию конструкций гидротехнических сооружений искусственных островов.....	120

5.1. Общие указания.....	120
5.2. Сооружения откосного профиля.....	126
5.3. Вертикальные сооружения.....	128
5.4. Некоторые специальные типы сооружений.....	133
5.5. Сквозные откосно-ступенчатые конструкции искусственных островов.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	140
Список литературы.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Создание новых и эксплуатация существующих прибрежных рекреационных зон требует сохранения уникальных береговых ландшафтов и дефицитных прибрежных земельных ресурсов, а также существующих или вновь образуемых пляжей. Создание таких зон должно по возможности обеспечивать создание дополнительных особо ценных территорий в курортных зонах, обеспечивать снижение плотности расположения отдыхающих и снизить, таким образом, рекреационную нагрузку на существующие курорты и повысить их эстетические и рекреационные показатели.

Одним из путей решения возникшей проблемы и потому перспективным направлением развития гидротехнического строительства в прибрежных зонах является строительство искусственных островных комплексов – рукотворных сооружений обычно каменно-набросной конструкции гравитационного типа в морских акваториях. В советское время особое внимание гидротехников страны уделялось совмещению берегозащитной и рекреационной функций таких комплексов. Это было вызвано, с одной стороны, стремлением к повышению экономической целесообразности подобного рода проектов, а с другой – ухудшением экологической обстановки [1] в условиях дефицита площадей пляжевой полосы и возрастающей антропогенной нагрузки на эти площади [2]. Современная архитектура сталкивается с вызовами выбора и внедрения новых стратегий, обусловленных достижениями науки и техники [3]. Выполнено большое количество масштабных научно-исследовательских работ (далее – НИР) по совершенствованию имевшихся и созданию новых технологий строительства островов, выбору оптимальных типов оградительных конструкций, разработаны технические требования на проектирование экологически чистых комплексов. Немаловажным условием при проектировании являлось приемлемое ландшафтно-архитектурное оформление комплексов сооружений.

Создание акваториальных рекреационных систем на искусственных сооружениях направлено на решение важных проблем архитектурно-планировочной организации крупнейших южных приморских рекреационных зон и при последовательной реализации может обеспечить многосторонний социальный, экономический, градостроительный и экологический эффект [4], [5]. Формирование систем отдыха на искусственных сооружениях позволит радикально расширить возможности развития курортов в наиболее ценных по природным факторам приморских районах.

Безусловно, функционал искусственных островных комплексов не ограничивается лишь целями рекреации и берегозащиты. Искусственные островные комплексы могут также использоваться для добычи полезных ископаемых [6], в том числе для освоения российского арктического континентального шельфа, для образования новой территории и последующего капитального строительства, швартовки судов. Достаточно актуальны вопросы мультидисциплинарных исследований шельфовых и береговых зон морей России, направленных на решение вопросов их освоения и научно обоснованного природопользования.

На сегодняшний день существует ряд инженерных и технико-экономических вызовов, с которыми сталкиваются проектировщики и строители искусственных островов. Среди них – высокие волновые нагрузки, в том числе и на внутренних акваториях России, глубины, превосходящие глубины в местах строительства островов за рубежом, отсутствие методик математического моделирования волнения на акваториях островных сооружений, образованных оградительными сооружениями сложной конфигурации [7–8]. Эти факторы имеют решающее значение при экономической оценке целесообразности строительства сооружений и зачастую предварительной такой оценки достаточно для снижения привлекательности проекта для инвесторов вплоть до отказа от строительства.

Интерес к строительству искусственных островных комплексов возрастает, в том числе, с ростом потребностей топливно-энергетического комплекса государства, необходимостью освоения арктического континентального шельфа в частности, и устойчивого развития экономики страны в целом.

Решение описанных задач невозможно без комплексного, научно обоснованного подхода к архитектурно-строительному проектированию гидротехнических сооружений (далее – ГТС) федерального значения, к которым с уверенностью можно отнести искусственные островные комплексы.

Степень разработанности темы исследования

Проектирование и строительство искусственных островов производится повсеместно и позволяет решать ряд важнейших практических задач [9]. В соответствии с [10], искусственные острова (в том числе установки и сооружения) допускается создавать для любых целей, не противоречащих действующим законам, нормативным правовым актам России и международным договорам.

При этом, согласно требованиям [11], нагрузки и воздействия волн на сооружения первого класса (а искусственные острова согласно [12] в зависимости от глубины в акватории относятся к первому или ко второму классу), а также сооружения других классов при высоте расчетных волн более 5 метров необходимо уточнять на основе результатов лабораторных исследований, порядок проведения которых на сегодняшний день для искусственных островов не регламентирован. Однако, на сегодняшний день не существует единого подхода к выбору конструкций ГТС искусственного острова и выполнению научных исследований в качестве научного обоснования и сопровождения проектирования.

Необходимость выполнения экспериментальных исследований или использования натуральных наблюдений при проектировании принципиально новых конструкций, не прошедших проверку в практике строительства и для которых использованы конструктивные решения, не прошедшие апробирование или для которых надежные методы расчета отсутствуют, предписывается [13]. При этом

важно отметить, что для проектируемых островных сооружений плохо применим метод аналогов, в том числе использование данных натуральных наблюдений на объектах – аналогах, поскольку каждое островное сооружение является уникальным и большинство искусственных островов построено в различных природных условиях. Данные наблюдений за такими сооружениями, как правило, неприменимы, что еще раз говорит о необходимости проведения лабораторных исследований с использованием методов физического моделирования [14–17].

Таким образом, существует необходимость обобщения, дополнения существующих методов научного обоснования проектирования искусственных островов, создания обобщенной методики выбора оптимальной конфигурации и конструкции ГТС искусственных островных комплексов применительно к конкретным гидрологическим, гидрометеорологическим, геологическим и геоморфологическим условиям строительства. Необходимо разработать методические рекомендации для определения порядка, средств и методов выполнения научных исследований для обоснования проектных решений островных сооружений.

Цель и задачи исследования

Основная цель работы - создание методики научного обоснования проектирования ГТС искусственных островов.

Задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели:

1. Выполнить обзор традиционных и инновационных типов конструкций искусственных островов.
2. Разработать (уточнить) классификацию ограждающих конструкций искусственных островов.
3. Разработать критерии применимости типов конструкций искусственных островов в зависимости от природных условий площадки строительства.
4. Определить ряд вопросов, требующих научного обоснования при проектировании островных сооружений.

5. Выполнить теоретические и экспериментальные исследования для решения ряда вопросов, возникающих при проектировании искусственных островов.
6. Разработать и закрепить методику научного обоснования проектирования искусственных островов в виде методических рекомендаций.

Объектом исследования является деятельность, связанная с проектированием, строительством и эксплуатацией искусственных островных комплексов – стационарных искусственных ГТС, верх которых возвышается над водной поверхностью при максимальном уровне (с учетом приливов и нагонных явлений).

Предметом исследования является методика научного обоснования проектирования искусственных островных комплексов. Тема исследования соответствует специальности 2.1.6 - Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (п.п. 8, 19 паспорта специальности).

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Предложена новая классификация конструкций искусственных островов.
2. Структурированы факторы, влияющие на выбор типа ГТС искусственного острова и, таким образом, разработаны критерии применимости тех или иных конструкций.
3. Определен круг вопросов, требующих научного обоснования при проектировании островных сооружений.
4. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования для решения ряда вопросов, возникающих при проектировании искусственных островов.
5. Более подробно изучены сквозные откосно-ступенчатые конструкции что позволяет разрабатывать надежное обоснование при их выборе в качестве оградительных сооружений искусственных островов.

6. Разработаны методические рекомендации по порядку научного обоснования проектных решений искусственных островов.

Теоретическая значимость работы

Выбор конструкции и основных параметров островных сооружений рекомендовано выполнять с использованием предложенной классификации и критериев применимости конструкций.

Отмечена важность выполнения научных исследований взаимодействия сооружения с волнением с применением методов физического и математического моделирования, а также указаны случаи, когда такие исследования являются обязательными.

Определен порядок выбора ключевых параметров сооружения для выполнения научных исследований и объем работ при выполнении экспериментов, а также требования, предъявляемые к таким параметрам.

Предложены меры по сокращению стоимости строительства искусственного острова за счет оптимизации конструктивных решений (выбора наиболее надежных, безопасных и в то же время экономичных конструкций), критерии их применимости.

Приведены общие требования к транспортной инфраструктуре искусственных островных комплексов для их связи с берегом.

Рассмотрены особенности расчетов, контролируемые параметры при моделировании, особенности планировочной организации конструкций, основные характеристики откосных, вертикальных и некоторых специальных типов гидротехнических островных сооружений, условия их устойчивости и безопасности.

Отдельно в методических рекомендациях рассмотрены сквозные откосно-ступенчатые конструкции. Приведены рекомендации по выбору контролируемых параметров в процессе моделирования по оптимизации конструкции (в том числе по снижению материалоемкости). Введено понятие относительной проводимости

сквозной конструкции: отношение площади щелей сквозной конструкции к эффективному объему волновой камеры.

Результаты исследований сквозных откосно-ступенчатых конструкций показали их высокую эффективность. На таких конструкциях наблюдаются значительное снижение волновых нагрузок на проницаемую стену в сравнении с вертикальной стеной с сопоставимой сквозностью, высокая асимметрия волновых скоростей (отношение скорости в гребне волны в сторону берега и во впадине волны в сторону моря) и коэффициенты отражения, близкие к оптимальным их значениям.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики определения оптимальных конструкций искусственных островов. В каждом конкретном случае необходимо проведение комплекса исследований для сравнения нескольких вариантов сооружений. Научные исследования, в том числе с применением методов физического моделирования, являются необходимым этапом проектной работы, поскольку в случае с искусственными островами метод аналогов, как правило, неприменим. Любая площадка для строительства проектируемого острова обладает уникальными, присущими только ей природными особенностями, все многообразие которых необходимо учесть при проектировании. Предлагаемые методические рекомендации являются результатом обобщения накопленного опыта и выявления некоторых закономерностей применения тех или иных материалов и конструкций для определенных природных условий участка строительства.

Автором предложен порядок выбора оптимальных конструкций (наиболее надежных, безопасных и в то же время экономичных), критерии их применимости.

Результаты специальных исследований сквозных откосно-ступенчатых конструкций, выполненных автором, позволяют надежно их обосновывать в качестве оградительных сооружений искусственных островов.

Разработанные рекомендации дают возможность:

1. Принимать научно обоснованные решения в части выбора оптимальной конструкции оградительных сооружений, основных технических параметров и планировочной организации искусственных островных комплексов на ранней стадии проектирования.
2. Сократить стоимость строительства искусственного острова за счет оптимизации конструктивных решений (выбор наиболее надежных, безопасных и в то же время экономичных), критерии их применимости.
3. Применение нового, оптимизированного порядка научных исследований при проектировании островных сооружений.
4. Надежное обоснование при выборе сквозных откосно-ступенчатых конструкций в качестве оградительных сооружений искусственного острова, поскольку выполнен комплекс исследований для их более подробного изучения.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач выполнялись исследования с применением экспериментально-аналитических методов, методов физического моделирования взаимодействия волн с ГТС искусственных островов.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в разработке новой классификации искусственных островов. Определены наиболее приемлемые конструкции ГТС искусственных островов в различных природных условиях. Автором выполнены специальные теоретические и экспериментальные исследования сквозных откосно-ступенчатых конструкций оградительных сооружений искусственных островов. Разработаны рекомендации для научного обоснования проектных решений ГТС искусственных островов.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

1. Новая классификация ГТС искусственных островов.

2. Критерии применимости конструкций ГТС искусственных островов.
3. Результаты теоретических исследований сквозных волногасителей, в том числе откосно-ступенчатых конструкций.
4. Результаты экспериментальных исследований сквозных откосно-ступенчатых конструкций.
5. Методические рекомендации для научного обоснования проектных решений ГТС искусственных островов.

Степень достоверности и апробация результатов исследований

Достоверность результатов исследований достигается благодаря использованию современных апробированных методов и методик, соответствию результатов требованиям действующих нормативных документов, в том числе носящих рекомендательный характер, применению кросс-валидации (сопоставление результатов, полученных различными методами), а также проверкой сходимости полученных данных с расчетными, полученными по апробированным эмпирическим зависимостям.

Результаты проведенных исследований докладывались и были одобрены на следующих научных конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Строительство в прибрежных курортных регионах» (г. Сочи, ФГБОУ ВО «СГУ», 2020 г.);
- Всероссийская научная конференция «Моря России: исследования береговой и шельфовой зон» (г. Севастополь, МГИ РАН, 2020 г.);
- IV Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (г. Москва, МГСУ, 2021 г.);
- Всероссийская научная конференция «Моря России: год науки и технологий в РФ – десятилетие наук об океане ООН» (г. Севастополь, МГИ РАН, 2021 г.);

- XIII Международная научно-практическая конференция «Трансформация экономики и социально-культурной сферы курортно-туристских дестинаций России» (г. Сочи, ФГБОУ ВО «СГУ», 2022 г.);
- VI Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (г. Москва, МГСУ, 2023 г.).

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 15 научных работах, из которых 3 работы опубликованы в журналах, включенных в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», 2 работы опубликованы в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus (Гидротехническое строительство, Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, Power Technology and Engineering) и 10 работ опубликованы в других научных журналах и изданиях.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 161 странице машинописного текста. Текст сопровождают 13 таблиц и 44 рисунка. Список литературы включает в себя 130 наименований, из них 27 – на иностранных языках.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СТРОИТЕЛЬСТВА ИСКУССТВЕННЫХ ОСТРОВНЫХ КОМПЛЕКСОВ

1.1. Российский и зарубежный опыт строительства искусственных островов

История строительства искусственных островных сооружений берет свое начало до нашей эры. Примитивные острова небольших размеров сооружались в Шотландии и Ирландии на мелкой воде в местных озёрах и реках еще в каменном веке. Искусственный архипелаг на Каролинских островах в Тихом океане был сооружен, по разным оценкам, в XIII – XV веках древними микронезийцами.

Одним из первых строителей искусственных островов Нового времени стала Япония. Из почти 7 тысяч островов, составляющих территорию государства, на сегодняшний день более десятка – рукотворные. Первым из таких сооружений стал остров Дедзима, который отсыпали у побережья Японии в начале XVII века для торговли с иностранными мореплавателями, в первую очередь – с голландцами.

Самый крупный и наиболее известный среди японских искусственных островов – Одайба, который расположен в Токийском заливе и соединен с центром Токио «Радужным мостом». Остров был отсыпан в XIX веке, а на сегодняшний день здесь расположен парк развлечений с самым высоким на момент строительства колесом обозрения в мире, административные и офисные здания. Территория острова стала одним из самых привлекательных мест в Токио для жилищного и офисного строительства. Примечательно также, что тело острова устроено из переработанных твердых бытовых отходов [18–19]. Такая технология представляется весьма перспективной в условиях нехватки площадей и позволяет помимо образования искусственной территории утилизировать продукты сжигания мусора [20].

Еще один из японских островов устроен в заливе Осака и является основанием Международного аэропорта Кансай [21]. Здесь железобетонные

оградительные сооружения защищают тело острова от волнения. Само тело острова отсыпалось после обустройства песчаного дренажа. Всего было отсыпано более 100 млн. м³ грунта. Расположение аэропорта на искусственном острове позволило использовать взлетно-посадочные полосы в любое время суток, благодаря чему международный аэропорт Кансай стал первым в стране, функционирующим круглосуточно. Результаты недавних исследований говорят о повышении удобоукладываемости и долговечности гидротехнического бетона в жарких странах при добавлении в раствор некоторых продуктов переработки твердых бытовых отходов [22].

К пионерам образования новых территорий в морской акватории также можно уверенно отнести голландцев. Примечательно, что около четверти территории Нидерландов находится на несколько метров ниже уровня моря, и что еще со времён Римской империи голландцы отвоёвывают землю у моря. Многовековая история строительства искусственных островов позволяет голландским инженерам с уверенностью браться за осуществление самых смелых проектных решений. Ярким примером таких решений является проект строительства острова на отмели DoggerBank в Северном море [23]. «Остров ветровой энергии», расположенный в 125 километрах от восточного побережья Англии будет служить центром сети близлежащих ветропарков (рисунок 1.1). При этом в условиях нехватки площадок для размещения ветрогенераторов на суше и отсутствия постоянных мощных ветров на материковой части страны, строительство территории площадью около 6 км² позволит решить экономическую проблему дорогих кабелей. Использование относительно коротких и дешевых кабелей, передающих энергию от морских турбин до острова, а также использование постоянного тока при передаче электроэнергии на большие расстояния позволит существенно уменьшить потери мощности при передаче электроэнергии на материк [24].

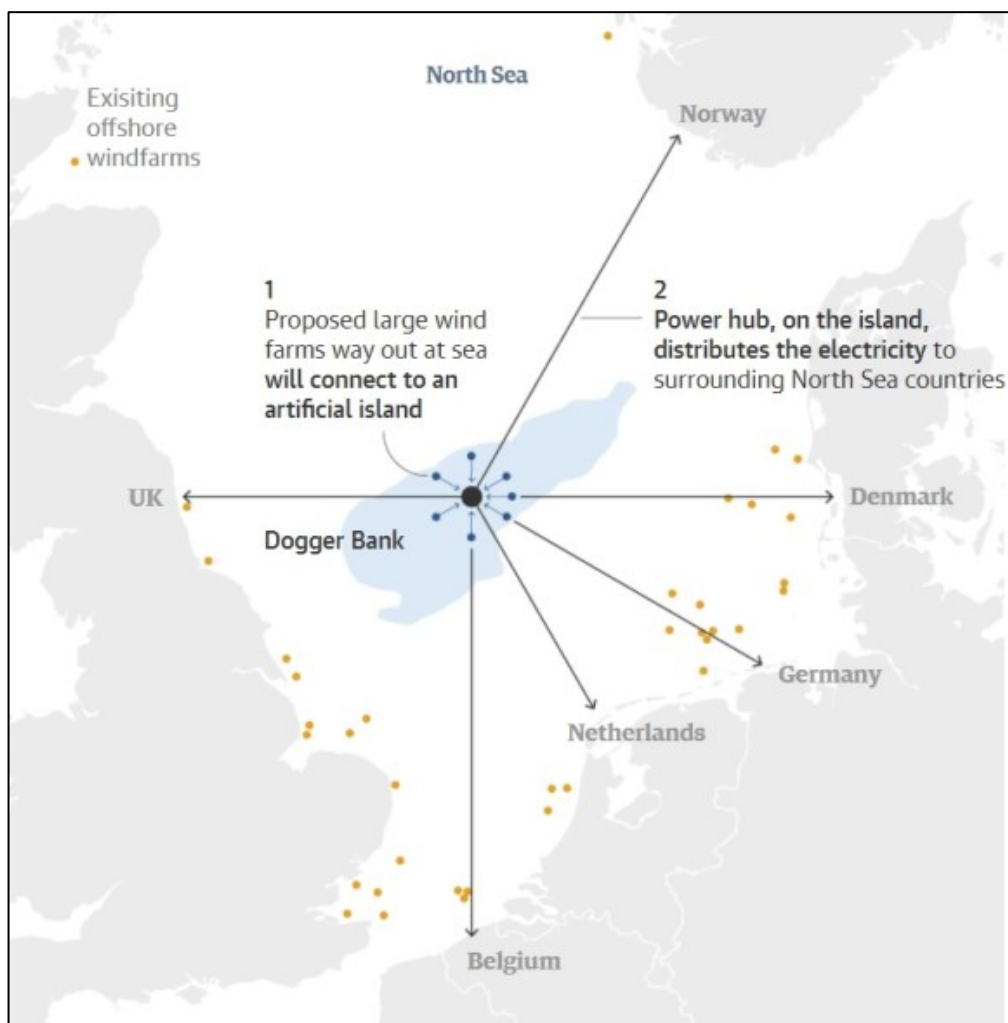


Рисунок 1.1—Проектируемый искусственный остров на отмели DoggerBank в Северном море

На сегодняшний день, пожалуй, самый известный пример рукотворных островов – комплекс искусственных сооружений под общим названием «Пальмовые Острова в Дубае» в Персидском заливе: «Пальма Джумейра», «Пальма Джебель Али» и «Пальма Дейра» [25–26] (рисунок 1.2). Помимо этого, в 2008 году было завершено строительство еще одного архипелага у побережья Арабских Эмиратов под названием «Мир». Комплекс является самым крупным проектом по образованию искусственных островов в мире.

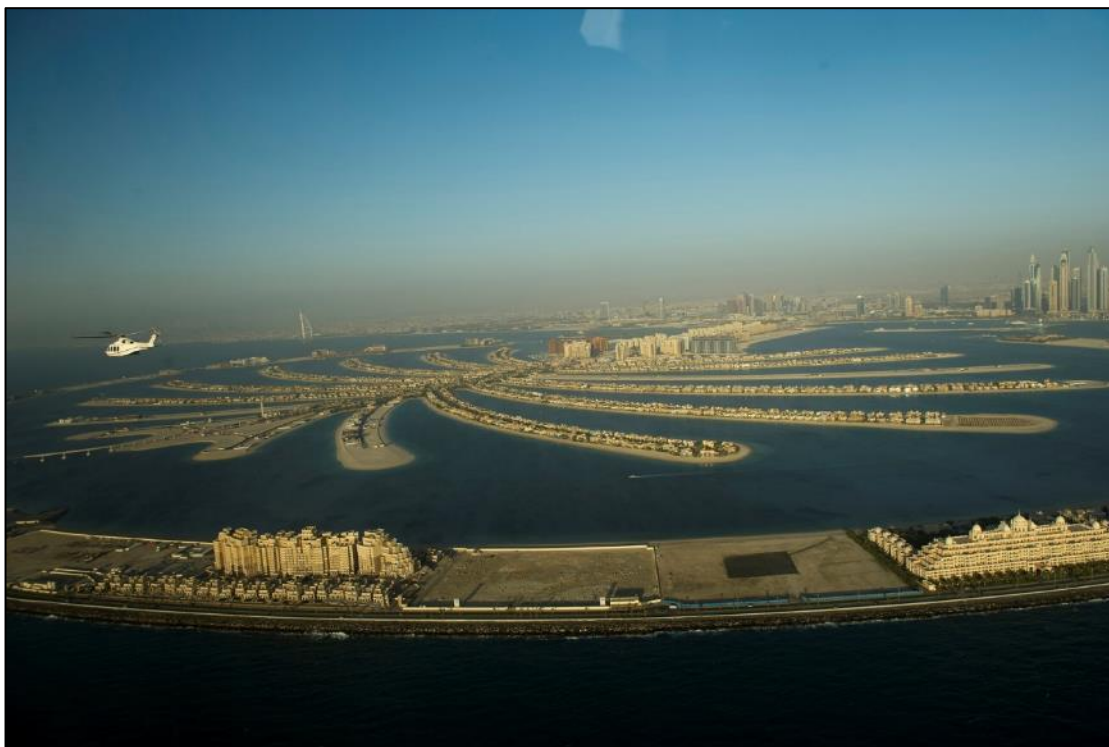


Рисунок 1.2 – «Пальмовые Острова в Дубае» в Персидском заливе [26]

«Пальма Джумейра» состоит из «ствола», «ветвей» и волнолома протяженностью 11 км, охраняющего остров от волнения. На его создание ушло 7 млн. м³ песка, общая площадь острова составляет 25 км². Остров «Пальма Джебель Али» примерно на 50 % крупнее по площади (37 км²), а проектная площадь «Пальмы Дейра» и вовсе составляет 72 км².

Достаточно широко за рубежом применяется концепция обустройства искусственных островов с целью извлечения минерального сырья и размещения промышленных комплексов. Примером таких сооружений является остров Нортстар в Соединенных штатах – искусственное сооружение площадью 2 га в море Бофорта в 7,5 км к северо-западу от залива Прудо-Бэй (штат Аляска) и в 3,7 км к северу от побережья Аляски (Рисунок 1.3). Остров был создан для разработки нефтяного месторождения Northstar (открыто в 1984 году компанией Royal Dutch Shell), продуктивные залежи которого расположены на глубине около 3800 м ниже морского дна [27].

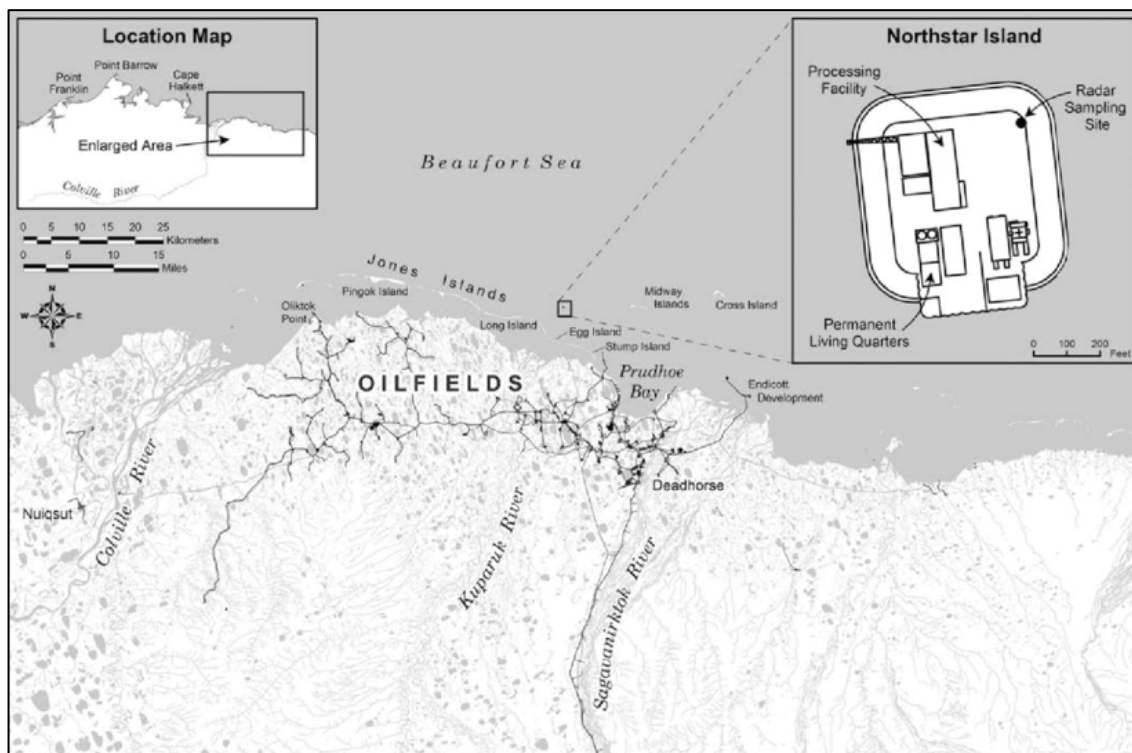


Рисунок 1.3 – Остров Нортстар у побережья Аляски [27]

Остров был построен в связи с тем, что обустройство стандартных платформ для бурения нефтяных скважин, используемых, например, в Мексиканском заливе или Северном море, было невозможно из-за ежегодного образования пакового льда вблизи северного побережья Аляски. Устойчивый искусственный остров круглогодичной эксплуатации был единственным способом обеспечить постоянную работу сооружений и оборудования, необходимых для работы добывающих нефтяных скважин. Защита от разрушающего воздействия ледяных масс обеспечивается путем покрытия берегов острова бетонными матами, которые простираются на 1,2 метра выше и на 5,5 метров ниже среднего уровня моря.

Искусственные острова являются альтернативным вариантом сооружений при разработке стратегии бурения в открытом море по ряду причин: существенная полезная площадь, малое воздействие на окружающую среду, безопасность, стоимость и количество обустраиваемых устьев скважин. Однако эти преимущества ограничены рядом факторов, таких как малая доступная глубина, фильтрационно-емкостные свойства и размер нефтегазовой залежи,

которые ограничивают и будут ограничивать использование островов в будущем [28].

Богатым опытом в вопросах проектирования и строительства искусственных грунтовых островов в полярных условиях шельфа обладает Канада. В период с 1972 по 1982 годы канадскими гидротехниками было построено более двух десятков островов. Конструкции некоторых из них показаны ниже (рисунки 1.4–1.7).

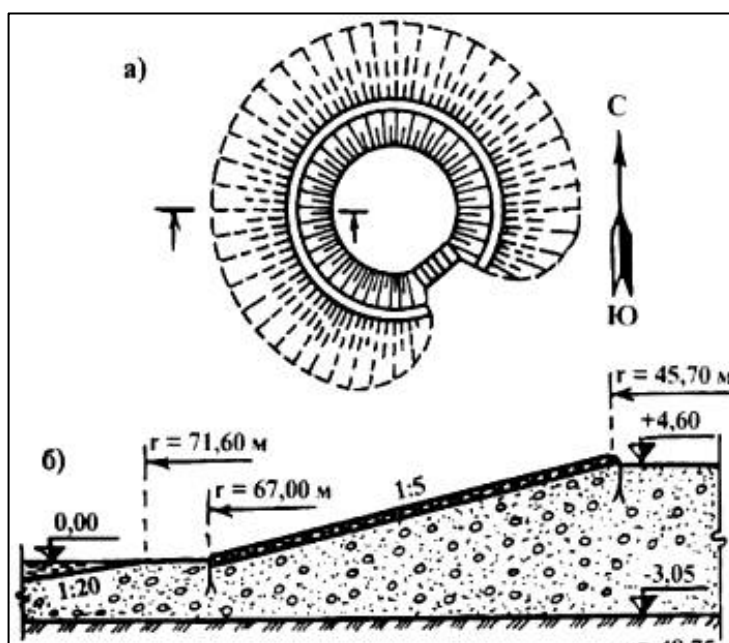


Рисунок 1.4 – Остров Иммерк (В-48) в канадском секторе моря Бофорта: а – план-схема; б – вертикальный разрез откоса намывного острова [27]

При расширении существующих портов при расположении причалов для крупнотоннажных судов необходимо соблюдение основных технологических и строительных требований по сочетаниям нагрузок, скорости подхода судов и др. В случаях, когда такие требования невыполнимы, вместо расположения таких причалов в пределах существующей акватории их выносят за пределы порта. Они представляют собой, как правило, островные причалы, связанные с берегом подводными трубопроводами или эстакадами, по которым проходят конвейерные линии [29].

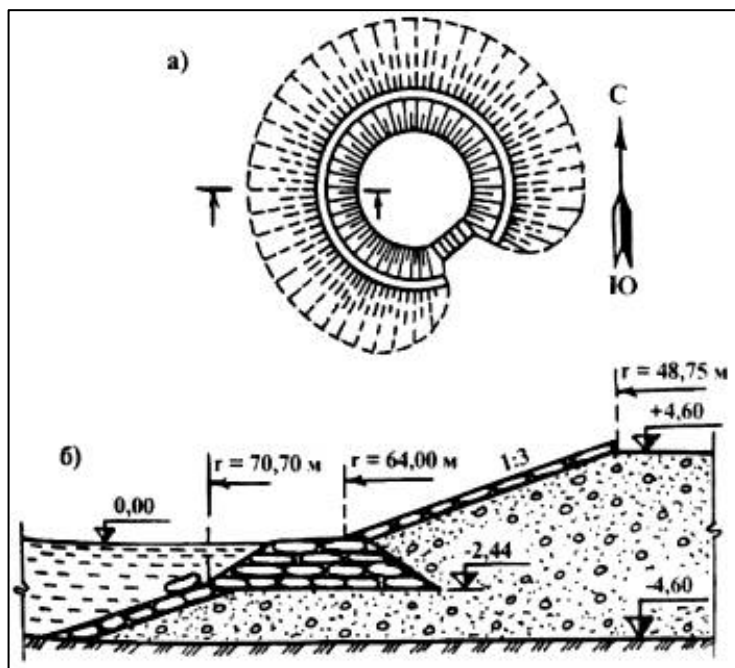


Рисунок 1.5 – Остров Нетсерк (В-44) в канадском секторе моря Бофорта:
а – план – схема; *б* – вертикальный разрез насыпного острова [27]

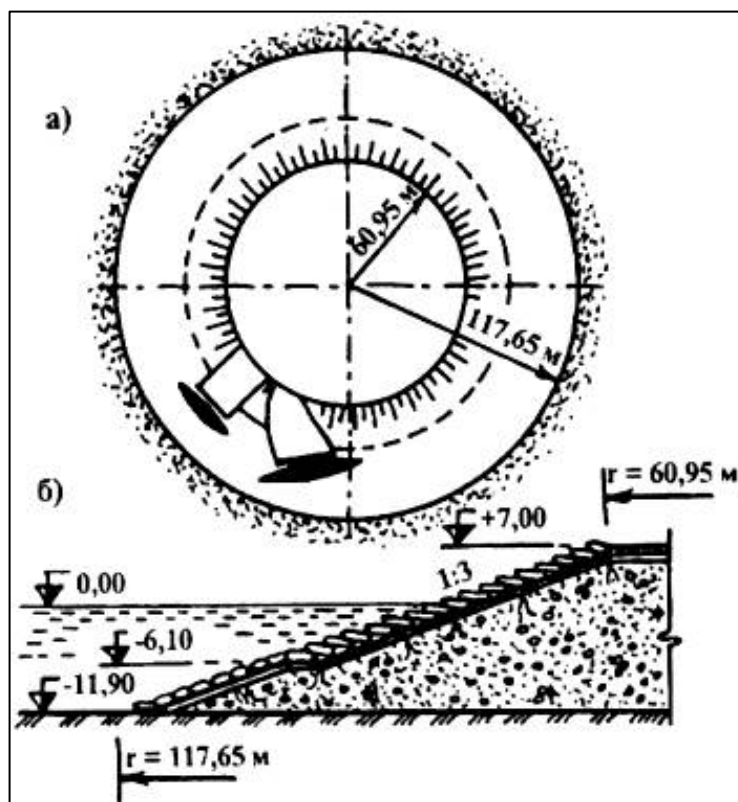


Рисунок 1.6 – Остров Сил в море Бофорта у берегов Аляски:
а – план-схема; *б* – вертикальный разрез насыпного острова [27]

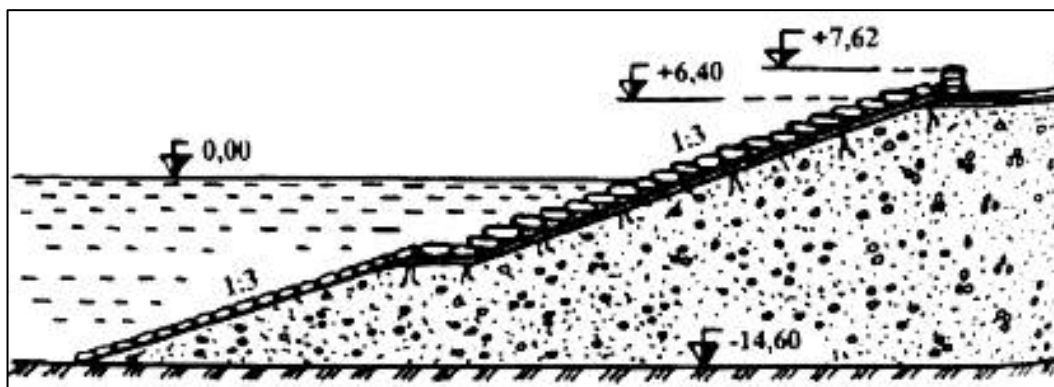


Рисунок 1.7 – Поперечный разрез откоса острова Муклук [27]

На сегодняшний день построено несколько десятков искусственных островов по всему миру [30]. Некоторые специалисты считают, что за историю человечества их было построено по крайней мере на порядок больше и они не поддаются исчислению [31]. Помимо описанных выше отдельного упоминания заслуживают несколько существующих и проектируемых сооружений:

- искусственный островной комплекс Севит на реке Ханган в Сеуле (Южная Корея) [32]. Состоит из трех островов, общая площадь комплекса составляет порядка 10 тыс. м²;
- остров для птиц в городе Кимберли (ЮАР). Выполнен в виде латинской буквы «S» и имеет, таким образом, 2 залива. Длина искусственного сооружения составляет 250 м, ширина – 25 м [33];
- ледовые острова на мелководном шельфе российского Карского моря для разработки газовых и газоконденсатных месторождений [34];
- искусственный архипелаг Дуррат Аль-Бахрейн из 13-ти островов (Durrat Al Bahrain, Бахрейн). Суммарная площадь сооружений составила порядка 20 млн. м² [35];
- остров «Жемчужина Катара» площадью 4 млн. м², расположенный в 350 м от берега в г. Доха (Катар) [36];
- острова в Китае [37], Японии для размещения аэропортов;

- остров Пеберхольм (Дания) расположен в проливе Эресунн. Был создан в качестве части Эресуннского моста, соединяющего Данию и Швецию [38];
- искусственный остров Феникс у берегов острова Хайнань (Китай) [39].

Таким образом, в зарубежной практике гидротехнического строительства имеется множество примеров постройки и успешной эксплуатации искусственных островных сооружений на значительном расстоянии от берега преимущественно для размещения на них неэкологичных производств, портов и аэродромов. Также существуют примеры обустройства островов для размещения на них объектов капитального строительства административного и жилого назначения. Важно отметить, что до последнего десятилетия прошлого века не было примеров постройки искусственных островов для решения задач берегозащиты и их рекреационного использования в прибрежной акватории.

Первым островным сооружением в России считается остров Черепаха, возведенный рядом с гаванью мыса Таганий Рог в 1702 году. Тогда же, в самом начале XVIII века, после освобождения берегов Невы от шведов и заложения Петербурга, Петр I искал способы защиты вновь образованного города со стороны моря [40].

В течение двух следующих столетий оборона столицы обеспечивалась ряжевой, каменной и свайной преградами, кронштадтскими фортами, находившимися как на естественном острове Котлин, так и на искусственных островах, как правило, каменно-набросной конструкции. Форты Санкт-Петербурга до сих пор по праву считаются памятником фортификационного искусства мирового значения.

В СССР первый искусственный остров был сооружен в Каспийском море в Дагестанском городе Каспийск: один из цехов машиностроительного завода Дагдизель был построен в 1934-1938 годах на искусственном каменном основании в Каспийском море.

В 1985 году проектировалась отсыпка острова уже в рекреационных целях на Черноморском побережье Крыма, недалеко от Севастополя, однако к его строительству так и не приступили.

Широко распространена практика строительства искусственных островов под бурение разведочных скважин на нефтегазовых месторождениях в суровых условиях арктических морей России [41]. Интенсивное развитие техники и технологий добычи нефти, газа и газового конденсата на глубоководных и замерзающих акваториях и развитие нефтегазовой отрасли в целом в течение двух последних десятилетий XX века определили необходимость разработки новых типов морских нефтегазопромысловых ГТС, в том числе и искусственных островов. Нынешние технологии бурения горизонтальных скважин позволяют обустраивать буровые вышки на суше и располагать забой скважины под акваторией в нескольких километрах от берега. Однако для средних и, тем более, мелких месторождений, проекты разработки которых находятся на грани рентабельности, бурение протяженных горизонтальных стволов добывающих скважин может крайне негативно сказаться на экономике всего проекта. В таких случаях наряду с ледостойкими стационарными платформами и подводными добычными системами (рассчитанными на безлюдную эксплуатацию в автоматическом режиме) рассматриваются варианты обустройства кустовых площадок для бурения скважин со строительством ледостойких искусственных островных сооружений, возводимых преимущественно из местных строительных материалов. Важно отметить, что в случае слабых грунтов по результатам специальных расчетов зачастую предпочтение отдается конструкциям из стали на свайных фундаментах вместо сооружений гравитационного типа. Кроме того, при выборе конструкции основания площадок для бурения необходимо учитывать доступность производственных мощностей по изготовлению соответствующих элементов.

Несмотря на довольно богатую историю строительства и эксплуатации искусственных островов в России, сегодня имеются значительные трудности,

встающие перед инициаторами их создания. Среди таких трудностей можно выделить сложность определения категории земель вновь образованной территории и недостаточность правового регулирования общественных отношений в сфере создания и эксплуатации таких объектов [42–45], недостаточность нормативной базы в области строительства островов.

1.2. Экспериментальные исследования на этапе проектирования островных сооружений

При подготовке концепции островного комплекса «Залив Островов» в Санкт-Петербурге «Всероссийским НИИ гидротехники имени Б. Е. Веденеева» была проведена НИР, результатом которой стало положительное экспертное заключение о возможности строительства искусственного островного комплекса. В ходе изысканий было выполнено компьютерное моделирование возможных сценариев экологической обстановки при наличии в акватории вновь образованного земельного участка [46].

У аналитиков нет единого мнения касательно экономической целесообразности проекта: его стоимость оценивается порядка 80 миллиардов рублей, в том числе порядка 20 – 30 миллиардов – на подключение к существующим инженерным сетям и объектам транспортной инфраструктуры. Некоторые эксперты придерживаются мнения, что в стране имеются значительные площади неосвоенных земель, которые необходимо использовать вместо образования новых территорий в акваториях внутренних водоемов. Другие считают удачным решением размещение проектируемых сооружений в новом центре города, где наблюдается дефицит площадей под новую застройку, а появление экзотических островных сооружений способно привлечь новых инвесторов. Проект нашел поддержку и со стороны архитектурного сообщества: новый деловой и жилой район в случае положительного решения о строительстве смог бы разгрузить центр города и дать архитекторам творческую свободу для воплощения смелых идей, что было бы невозможным в рамках исторического

центра. При этом Западный скоростной диаметр стал бы новой основной транспортной артерией города.

Коллективом «Научно-исследовательского центра «Морские берега» в г. Сочи в разные годы был выполнен ряд НИР по научному обоснованию проектирования искусственных островов берегозащитного, рекреационного, транспортного и промышленного назначения.

В качестве примера такой работы можно привести НИОКР, включающую гидравлическое моделирование устойчивости берегозащитных сооружений в Темрюкском районе Краснодарского края [47]. Целью работы являлось научное обоснование мероприятий для проекта по защите береговых сооружений и пляжа от воздействия ветровых волн. Среди рассмотренных вариантов конструкции одним из наиболее эффективных оказался искусственный остров откосного профиля, тыльная часть которого выполнена в виде вертикальной грани (рисунок 1.8). По результатам выполненных расчетов, пространственного гидравлического моделирования в волновом бассейне и проведенного анализа полученных результатов выданы рекомендации для разработки рабочего проекта искусственного песчаного пляжа:



Рисунок 1.8 – Пространственная модель искусственного острова

- отсыпка рекреационного песчаного пляжа длиной 120 м;
- возведение пляжеудерживающих сооружений в виде островного комплекса и искусственного мыса с блокирующим элементом;
- размещение вертикальной стены острова на глубине 2,2 – 2,5 м на расстоянии 150 м от подпорной стены на берегу;
- защита острова от волнового воздействия откосным креплением из фасонных блоков массой 3,6 т.

Несколькими годами ранее была выполнена масштабная НИОКР по созданию новых технологий, конструкций и оборудования для строительства искусственных островов судоходного и берегозащитного назначения. В составе работы выполнены модельные исследования искусственного островного комплекса по трем вариантам конструкции (рисунки 1.9–1.11), оценена возможность отстоя в волновой тени комплекса судов маломерного флота. Также был проведен анализ и сравнение вариантов конструкции по волногасящей и пляжеобразующей способности.

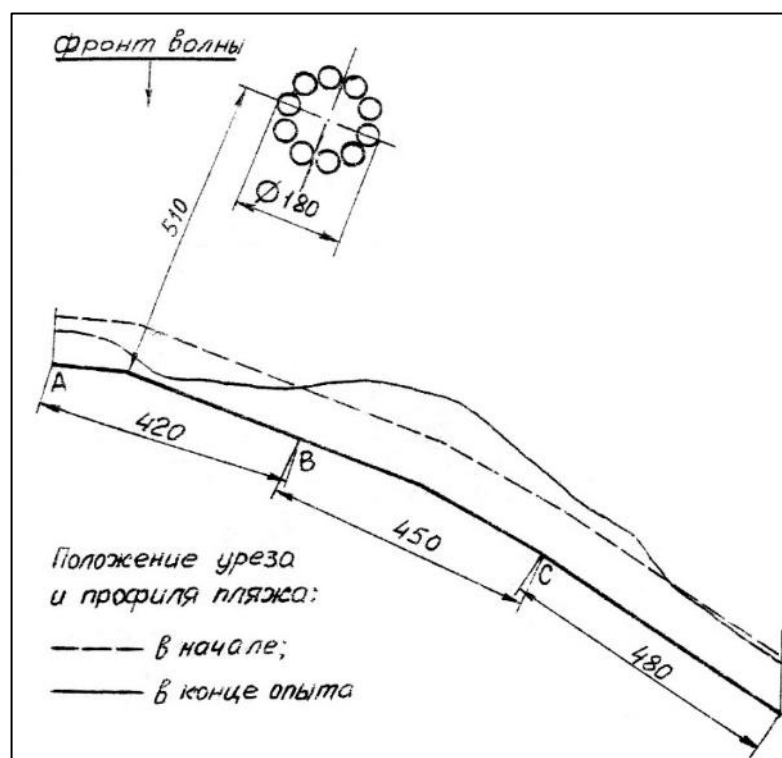


Рисунок 1.9 – Конструкция в опыте №1 – одиночный остров из перфорированных оболочек

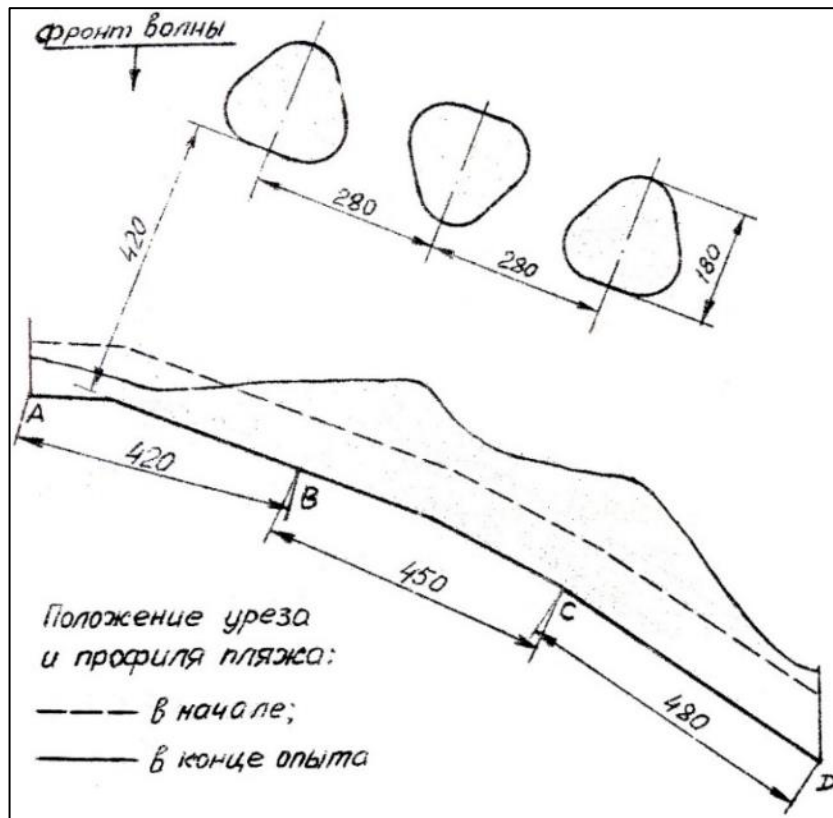


Рисунок 1.10 – Конструкция в опыте №2 – группа из трех островов

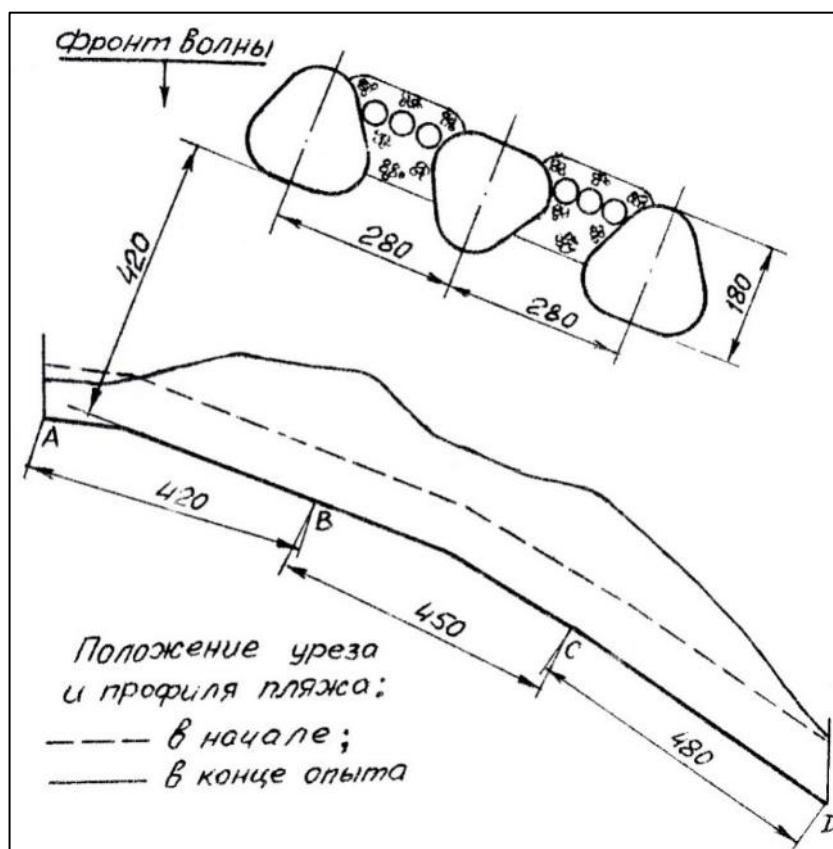


Рисунок 1.11 – Конструкция в опыте №3 – группа из трех островов с перекрытием проветров отсыпкой из камня

На изображениях хорошо видна зона «волновой тени», усиленная дифракцией волн, обусловленной огибанием волнами острова. В этой зоне процессы вдольберегового перемещения пляжевого материала были существенно ослаблены и в результате сформировался пляж в виде аккумулятивного выступа.

Рекомендуемым вариантом конструкции островного комплекса стала конструкция из опыта №3 – группа из трех островов овально – треугольного очертания в плане с перекрытием пролетов между островами отсыпкой из камня (рисунки 1.11–1.12). К концу опыта ширина пляжа в среднем по всему участку дна модели достигла 150 см (37,5 м в натуральных величинах), по участку ВС – 178 см (44,5 м в натуральных величинах). Объем пляжа на модели увеличился до 3325 дм³ (52,0 тыс. м³ в натуральных величинах), что на 276 % больше, чем в случае с открытым берегом. Следует отметить, что увеличение пляжа по объему отложения наносов в волновой тени острова заметно выше в относительных числах, чем увеличение здесь же средней ширины пляжа, что свидетельствует о накоплении значительной части пляжевого материала в подводной части пляжа. Динамика ширины пляжа в ходе опыта по участкам приведена ниже (рисунок 1.13).

В рамках работы составлены технические требования на проектирование и строительство комплексов островных сооружений в прибрежной акватории Черного моря для целей берегозащиты, рекреационного и транспортного использования. Разработаны научно обоснованные положения, критерии и параметры для их использования при проектировании островных комплексов, приведены требования к технологии производства работ при строительстве. Предложены типовые варианты схем размещения в плане комплексов островных сооружений, определены варианты использования таких комплексов в процессе эксплуатации.



Рисунок 1.12 – Пространственная модель сооружений в волновом бассейне по рекомендуемому варианту конструкции (опыт №3)

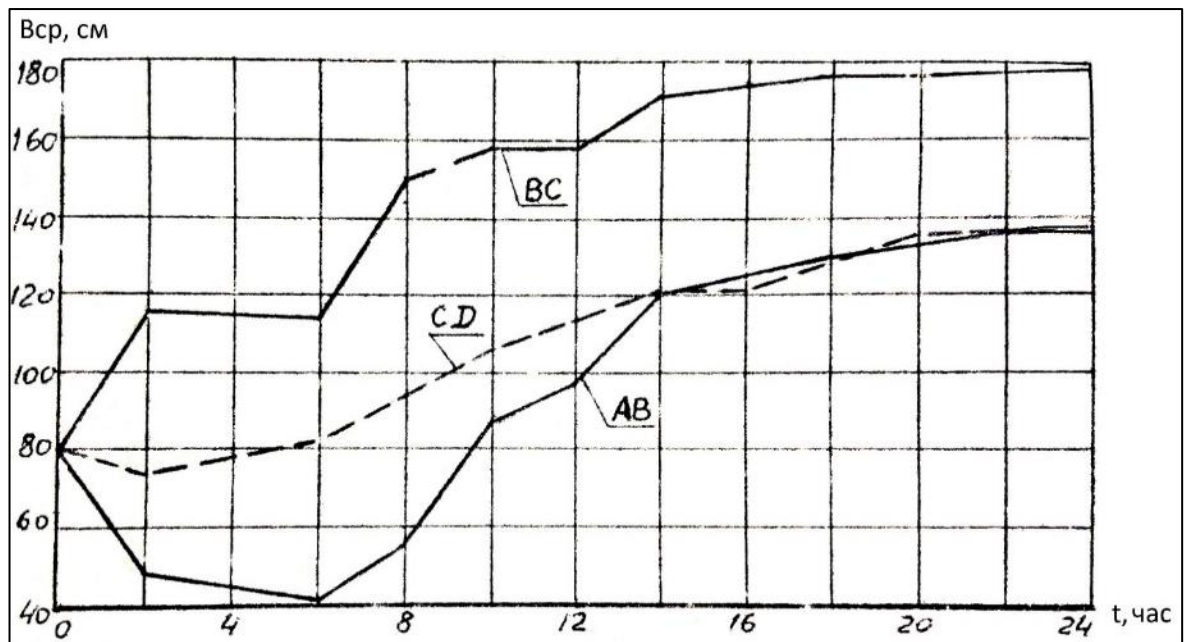


Рисунок 1.13 – График изменения средней ширины надводного пляжа во время опыта №3:

$V_{ср}$ – средняя ширина пляжа на модели в сантиметрах, t – время в часах. Для всех трех участков берега наблюдается аккумуляция пляжевого материала

Важно отметить, что по рекомендуемому варианту конструкции (рисунки 1.11–1.13) результаты гидравлического моделирования волнового воздействия показали устойчивый процесс аккумуляции пляжевого материала (рисунок 1.13).

Существуют и другие примеры искусственного увеличения ширины пляжа за счет создания волновой тени. На участке черноморского побережья Большого Сочи, где наблюдались интенсивные абразионные процессы (рисунок 1.14), была выполнена внешняя блокировка участка берега сборными железобетонными элементами.

После установки блокирующих элементов наблюдалось образование волновой тени и, как следствие – уменьшение емкости вдольберегового потока наносов, выпадение наносов и постепенное образование аккумулятивной формы в виде широкого пляжа (рисунки 1.15–1.18). Опыт подобных наблюдений еще раз подтверждает практическую пользу искусственных островов для целей берегозащиты. Другими словами, строительство острова для любых целей при правильной планировке может сэкономить значительные средства на защиту берега от размыва.

В то же время вероятно неблагоприятное воздействие на береговую полосу в процессе эксплуатации проектируемого острова – возможное изменение динамики соседних участков берегового пляжа и образование конуса выноса материала из рек. Естественная подпитка пляжей происходит за счет переноса галечного материала из устьевого бара вдольбереговым потоком наносов. Поэтому в случае значительной блокировки волн островом может измениться режим питания соседних пляжей. Для проверки такой возможности, как правило, выполняется математическое моделирование динамики руслового бара при наличии острова. Пример такого расчета схематично приведен ниже (рисунок 1.19). Помимо этого, должен выполняться расчет водообмена между прибрежной акваторией за проектируемым островом и открытым морем для недопущения образования застойных зон.

а)



б)



Рисунок 1.14 – Динамика береговой линии на участке размыва пляжа
а) 1977 год; б) 1979 год



Рисунок 1.15 – Вид береговой линии сразу после установки блоков в 1981 г.



Рисунок 1.16 – Вид береговой линии через год после установки блоков в 1982 г.



Рисунок 1.17 – Вид береговой линии в 1984 г.



Рисунок 1.18 – Вид береговой линии в 1987 г.

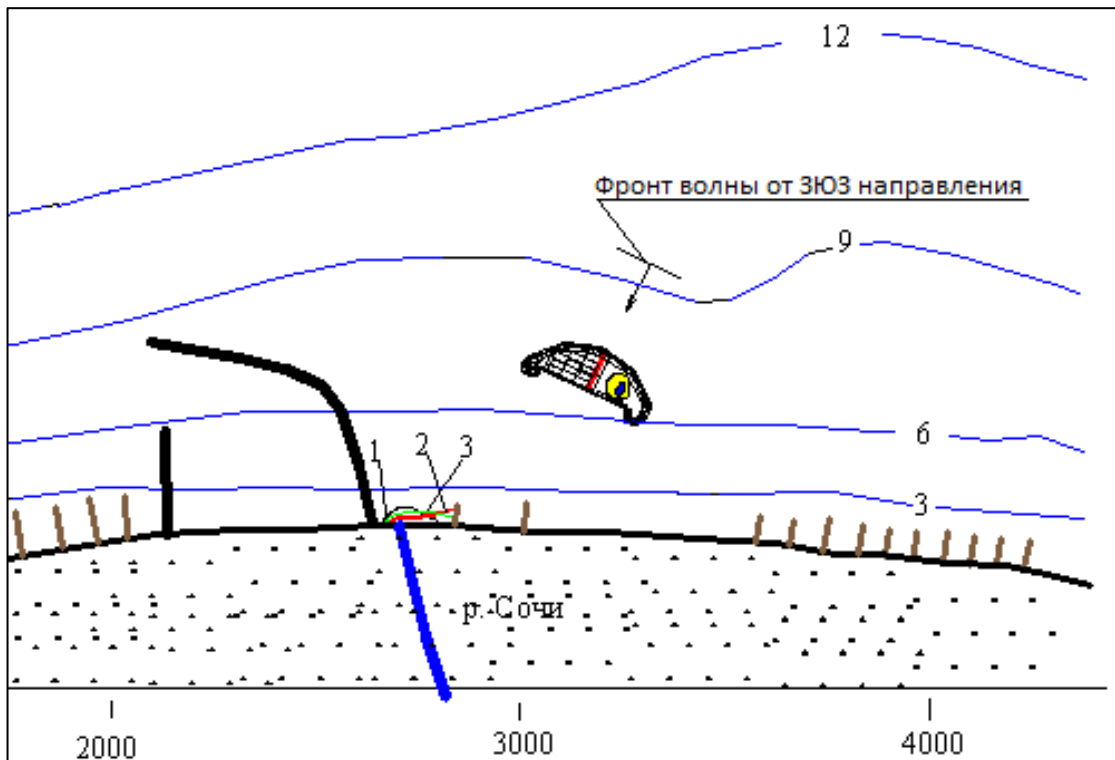


Рисунок 1.19 – Пример расчета устьевого бара при строительстве искусственного острова:

- 1 – исходное положение устьевого бара; 2 – бар после шторма при отсутствии острова; 3 – бар после шторма при наличии острова.

Существуют и другие проекты искусственных островных комплексов рекреационного и берегозащитного назначения. Примером таких сооружений является проект масштабного островного комплекса «Федерация» [48]. Его строительство планировалось на Черноморском побережье в Хостинском районе города Сочи напротив горы Малый Ахун, проектная площадь вновь образованной территории – порядка 75 га, площадь застройки – 700 тыс. м². Площадка строительства характеризуется значительными волновыми и сейсмическими нагрузками: расчетная высота волн составляет от 3,4 до 5,5 метров, сейсмическое воздействие – до 9 баллов. Был выполнен комплекс изыскательских работ, физическое моделирование в волновом лотке и разработана проектная документация, однако строительство островного комплекса не начато до сих пор. Одним из ключевых вопросов являлась принадлежность построенного архипелага: не было ясно, кто станет его владельцем, хотя подразумевалось, что

остров станет собственностью государства, поскольку находится в его территориальных водах, а построенные на нем объекты – собственностью застройщиков.

В данном случае при наличии острова процесс выноса материала из устьевого бара реки Сочи при расчетном шторме от ЗЮЗ направления несколько замедляется, но продолжает оставаться достаточно интенсивным. Пляж в первом межбунном отсеке сохраняет относительно равномерную ширину

Выполнены экспериментальные исследования на математических и двухмерных физических моделях сооружений и акватории проектируемой марины «Хомар» в Хостинском районе г. Сочи [49]. В работе оценивалась устойчивость и волногасящая способность оградительных сооружений марины, а также влияние проектируемых ГТС на волновое поле и на течения в защищаемой акватории, вдольбереговые течения и водообмен (рисунок 1.20).

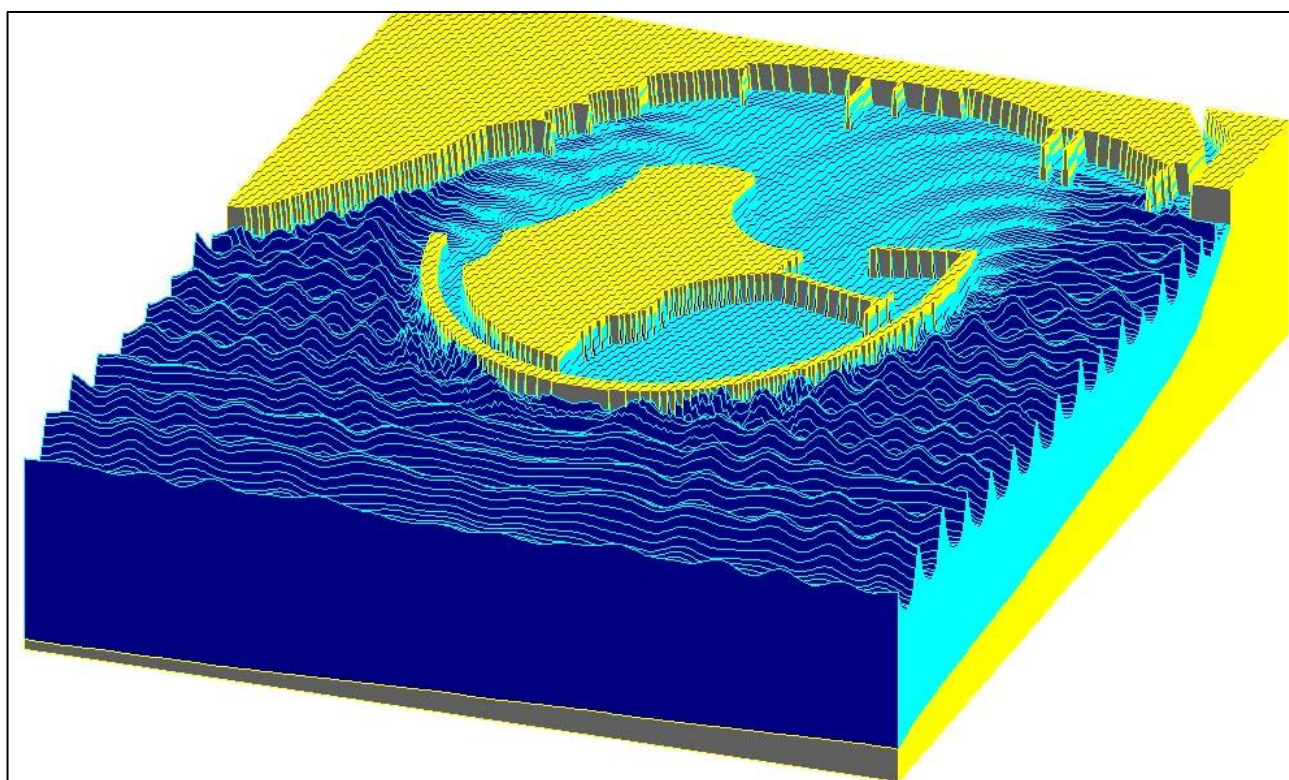


Рисунок 1.20 – Взаимодействие волн с сооружениями проектируемой марины «Хомар» при расчетном юго-западном шторме

По результатам исследований сделан ряд выводов:

- за проектируемой мариной формируется область «волновой тени». Высота волн в защищенной акватории не будет превышать 30 см;
- при принятой компоновке сооружений не будет формирования застойных зон;
- из рассмотренных вариантов конструкции наилучшие результаты показали сооружения, представленные непроницаемой откосно-ступенчатой конструкцией с отметкой верха +3,70 м. Высота одной ступени составляет 0,9 м, ширина – 3,0 м. На сооружении установлен парапет с отметкой верха +4,20 м. Перед сооружением на расстоянии 75 м в качестве гасителя волновой энергии установлено проницаемое сооружение, представленное погруженным в воду стальным каркасом, заполненным камнем массой 3–5 т. Поверху отсыпался камень массой 7–10 т. Отметка верха ГТС составила +1,0 м, а ширина – 14,0 м (рисунок 1.21).



Рисунок 1.21 – Взаимодействие расчетных волн с сооружениями проектируемой марины «Хомар»

По результатам физического моделирования волногасящее сооружение оказалось устойчивым к расчетному волнению, через него наблюдались переливы. При воздействии разрушенных волн на откосно-ступенчатое оградительное сооружение марины, наблюдались незначительные всплески, переливов через верх сооружения не наблюдалось.

Другие примеры применения комбинированных волногасящих сооружений рассмотрены в [50–51]. Предложенная в работе конструкция позволяет использовать выгодные механизмы гашения волн, присущие песчаным и галечным пляжам, в условиях больших глубин акватории. Предложенная конструкция (рисунок 1.22) обеспечивает возможность создания в условиях приглубых абразионных берегов необходимых рекреационных площадей при соблюдении требований экологии, санитарной гигиены и ландшафтной архитектуры.

Конструкция представлена подводной подпорно-волноотбойной стеной 1 с волноломом-козырьком 2, устраиваемой перед островным сооружением вертикального профиля. По укрепленному проектному дну 3 отсыпается галечный пляж 4.

Рассмотренное оградительное сооружение эффективно работает на глубинах от 7 до 15 м. Для создания надводной полосы пляжа шириной не менее 10 м рекомендуется отсыпать за оградительное сооружение гравийно-галечную смесь непосредственно в подводную и надводную части.

Существует проект берегоукрепительных сооружений базы отдыха на мысе Фиолент на Крымском полуострове. Было рассмотрено несколько вариантов конструкции пляжного комплекса, призванные сохранить уникальный природный ландшафт объекта. Одним из таких вариантов стала откосно-ступенчатая конструкция (рисунок 1.23) с углом наклона к горизонту 22° .

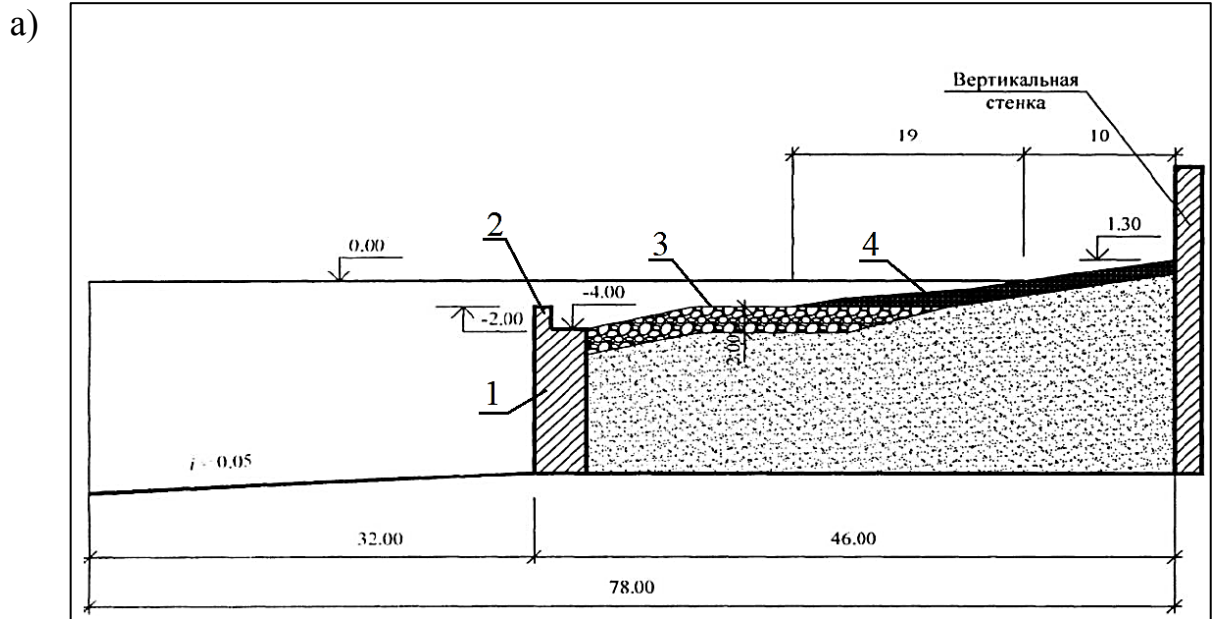


Рисунок 1.22 – Комбинированное сооружение, предложенное для удержания галечного пляжа, образованного на вновь созданной искусственной территории [51]:

а – схема сооружения, б – воздействие волнения на двухмерную модель сооружения

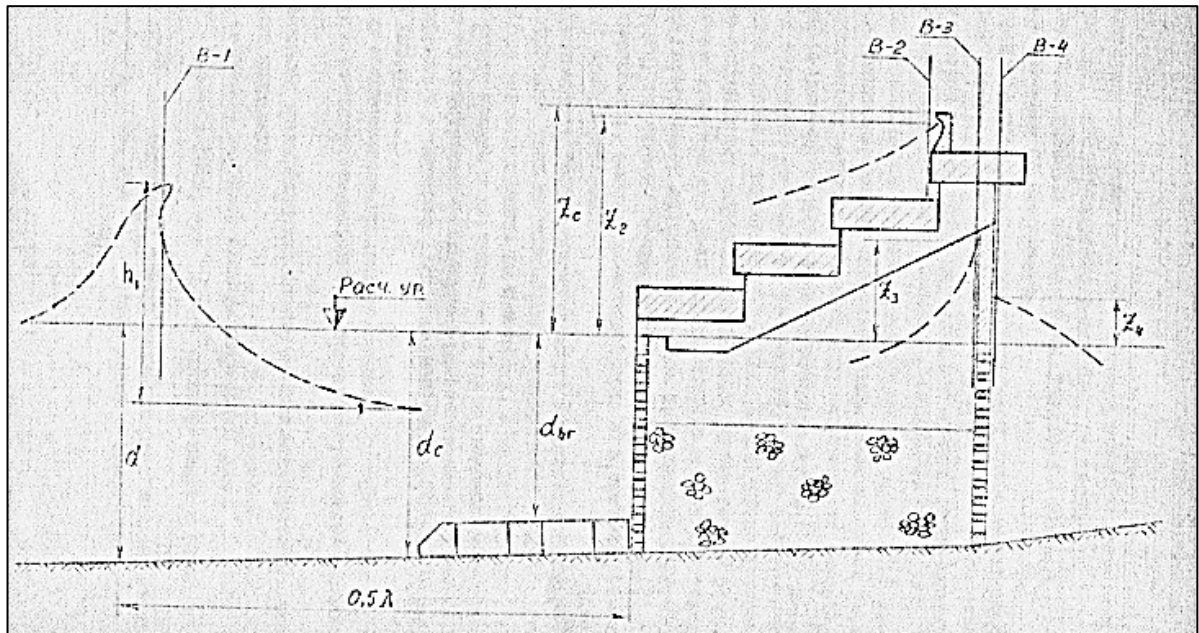


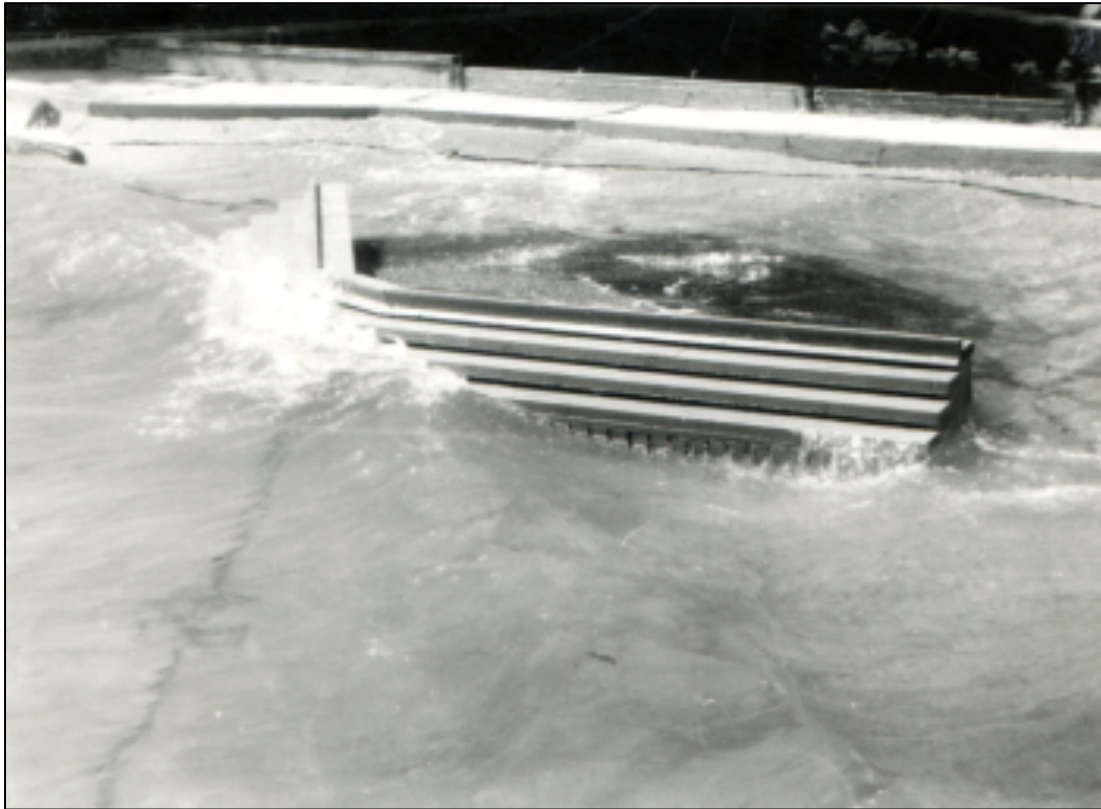
Рисунок 1.23 – Поперечный профиль островного сооружения с ограждением откосно-ступенчатого профиля

По результатам математического моделирования для оценки параметров ограждающего сооружения для защиты искусственного галечного пляжа [52], [53], данный вариант был исследован на пространственной физической модели в волновом бассейне (рисунок 1.24).

Рассмотренный вариант сооружений пляжного комплекса позволил создать необходимые площади для целей рекреации при соблюдении требований экологии, санитарной гигиены и ландшафтной архитектуры при значительном уменьшении материалоемкости, трудоемкости и стоимости строительства. Рассмотренный вариант ограждающего сооружения островного типа обеспечивает приемлемое ландшафтно-архитектурное оформление комплекса.

Одним из наиболее готовых к строительству островов комплексного назначения на сегодняшний день является проект острова «Югра». Размещение сооружения запланировано на побережье Черного моря в Туапсинском районе [54]. При подготовке проекта выполнен ряд специальных исследований, в том числе:

а)



б)



Рисунок 1.24 – Модель искусственного пляжа под защитой оградительных сооружений в волновом бассейне [53]:

а) воздействие расчетных штормовых волн на сооружение; б) общий вид сооружения в конце опыта

- многовариантное гидравлическое моделирование оградительных сооружений острова в волновом бассейне и в волновом лотке в лаборатории НИЦ «Морские берега» в г. Сочи с последующей выдачей рекомендаций по проектированию;
- математическое моделирование взаимодействия сооружения с расчетным ветровым волнением при расчетном уровне моря;
- моделирование динамики искусственного пляжа, находящегося в волновой тени острова;
- получение по результатам моделирования волновой картины в защищенной яхтной гавани.

Выводы по главе и постановка задач дальнейших исследований

В европейских странах на сегодняшний день развитие технологий и методологии физического моделирования при проектировании ГТС связано с явной потребностью в обновлении знаний о схемах и методах защиты берегов (особенно в трехмерных условиях при взаимодействии волн и течений), а также с учетом нарастающей потребности в освоении возобновляемых источников энергии (в данном случае – энергии волн и приливов) [55–56].

В России на данный момент выполнено большое количество экспериментальных исследований островных сооружений. По результатам таких исследований сделаны следующие выводы:

- вопросы использования прибрежной акватории моря для строительства островных сооружений и их использование в различных целях на сегодняшний день имеют актуальное значение;
- при исследованиях на пространственных моделях островных сооружений в волновых бассейнах необходимо:
 - а) для сооружений откосного профиля – определение размеров, компоновки сооружений, обеспечивающих устойчивость проектных откосов, оценка среднегодовых потерь пляжевого материала,

водообмена в акватории между островом и берегом. В случае укрепления откоса фасонными массивами или крупным камнем, должна определяться минимальная масса отдельного элемента крепления;

б) для сооружений вертикального профиля – определение отметок верха сооружения, высоты наката волн на вертикальное сооружение, проверка отсутствия заплесков и переливов через его верх, оценка волновых нагрузок на стену и придонных волновых скоростей;

в) для сквозных конструкций – дополнительно к параметрам, указанным для вертикальных сооружений, следует определять коэффициенты отражения, прохождения волн и волногашения;

– искусственные острова могут проявлять блокирующие свойства и в отдельных случаях могут оказывать значительное влияние на интенсивность и направление береговых процессов;

– как правило, исследователи выражают блокирующие свойства острова через параметр l/b , где l – расстояние от острова до уреза моря, b – длина острова в направлении вдоль берега [57];

– степень блокировки можно также выразить через угол видимости острова с берега (угол, под которым с берега виден остров, образующий волновую тень);

– угол видимости и относительное расстояние связаны зависимостью $53^\circ/\alpha = l/b$;

– в условиях достижения динамического равновесия пляжа для снижения пагубного влияния острова на аккумулятивный берег рекомендуется принимать угол видимости не более 18° ;

– на абразионных участках берега в условиях дефицита или отсутствия потока наносов для достижения динамической устойчивости пляжа рекомендуется применять берегозащитные острова с углом видимости 72° и более;

- в остальных случаях (при угле видимости более 18° и менее 72°) доминирующим фактором, влияющим на формирование берега, является емкость вдольберегового потока наносов, а также относительное расстояние до острова (или угол его видимости) и сквозность островных сооружений;
- при проектировании островных сооружений в прибрежной акватории, в каждом конкретном случае для выбора оптимального варианта целесообразно проведение теоретических и экспериментальных исследований на моделях;
- в условиях приглубых абразионных берегов возможно устройство на островах волногасящих пляжей по конструкции, предложенной «НИЦ «Морские берега». Конструкция показала эффективность при работе на глубинах от 7 до 15 м;
- существует ряд примеров успешного применения специальных, в том числе комбинированных конструкций искусственных островных сооружений;
- с учетом вышесказанного, представляется целесообразным более подробное изучение комбинированных конструкций.

Строительство искусственных островов позволяет решить ряд важнейших задач гидротехники (создание новых рекреационных зон, размещение объектов капитального строительства, обеспечение судоходства и др.) и потому является перспективным направлением развития гидротехники [58–59]. В то же время искусственные островные комплексы – исключительно наукоемкие [60], капиталоемкие и ответственные сооружения. Согласно российскому федеральному законодательству, при строительстве объектов на акватории, находящейся в федеральной собственности, для такого объекта принимается повышенный класс ответственности [61]. В связи с этим, к конструкциям искусственных островных комплексов должны предъявляться самые строгие требования в вопросах изготовления, транспортировки, монтажа, эксплуатации элементов и частей таких конструкций. То же касается и процесса проектирования, который в настоящее время недостаточно обеспечен

нормативной базой и соответствующими рекомендациями для проектирования [62].

С учетом вышесказанного, основная цель работы – разработка методики научного обоснования проектирования и строительства ГТС искусственных островов.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- произвести обзор традиционных и инновационных типов конструкций искусственных островов;
- разработать (уточнить) классификацию ограждающих конструкций искусственных островов;
- разработать критерии применимости типов конструкций искусственных островов в зависимости от природных условий на объекте строительства;
- определить круг вопросов, требующих научного обоснования при проектировании островных сооружений;
- выполнить теоретические и экспериментальные исследования для решения ряда вопросов, возникающих при проектировании искусственных островов;
- разработать методику научного обоснования проектирования искусственных островов в виде методических рекомендаций.

ГЛАВА 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВ КОНСТРУКЦИЙ ИСКУССТВЕННЫХ ОСТРОВОВ

2.1. Обзор типов конструкций островных сооружений

Искусственные островные ГТС в России строятся в большинстве случаев для создания оснований для нефтегазопромысловых объектов на континентальном шельфе. Такие острова обычно представлены насыпными, намывными [63] или намороженными сооружениями, создаваемыми из доступных природных материалов (камня, грунта, льда). Также они могут комбинироваться со стальными и (или) железобетонными конструкциями (рисунок 2.1) [64–65].

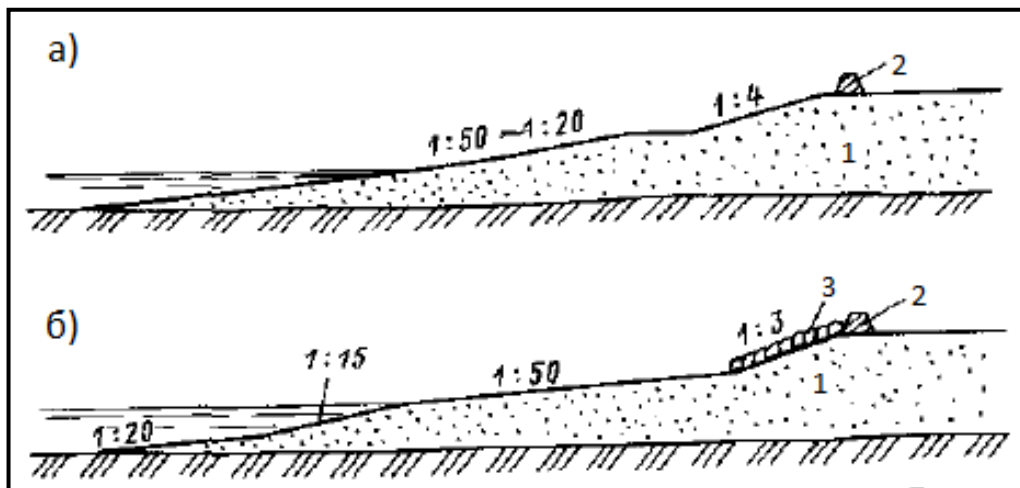


Рисунок 2.1 – Профили береговой части искусственных островов:
 а) намывных из песка с пляжем, бермой и неукрепленными откосами;
 б) намывных или отсыпанных из песка с пляжем и защитой откоса камнем;
 1 – песок; 2 – защитная берма; 3 – сортированный камень

При этом основным фактором, определяющим прочность и устойчивость морских островов, является ветровое волнение [66]. Искусственные острова могут также являться основаниями для различных рекреационных объектов (пляжи, отели, причалы для прогулочных судов и др.) (рисунок 2.2) [67]. В ряде случаев

островные порты показывают большую эффективность в сравнении с береговыми (рисунок 2.3) [68].



Рисунок 2.2 – 3D модель «Острова Югра», запроектированного на побережье Черного моря [68]



Рисунок 2.3 – Островной порт в районе г. Новороссийска [68]

Основные задачи настоящего раздела: выполнить обзор существующих типов конструкций ограждений искусственных островов, сопоставить и

классифицировать их, а также определить природные условия, для которых конкретные конструкции наиболее эффективны.

В [64] дана классификация ограждающих конструкций островов (рисунок 2.4).

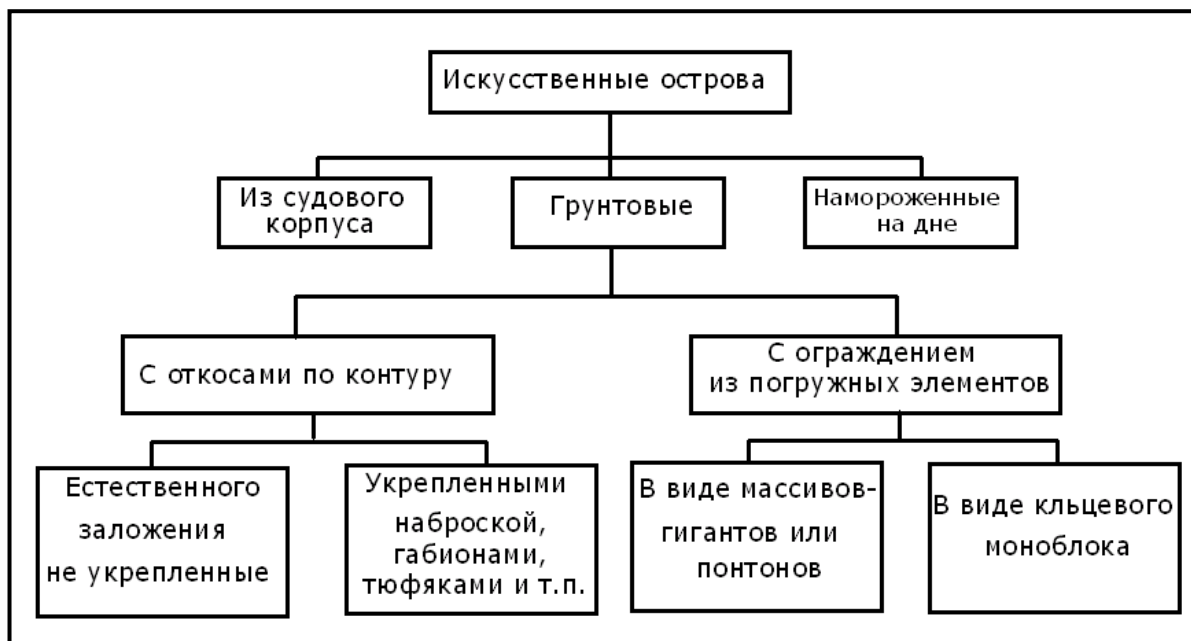


Рисунок 2.4 – Существующая классификация конструкций искусственных островов

Дополнительно к указанным в этой классификации конструкциям рассмотрены вертикальные свайные и шпунтовые ограждения, единая железобетонная оболочка с устройством свай, ограждения с применением геосинтетических оболочек, острова-польдеры, сквозные и некоторые специальные типы конструкций [69]. При разработке новой классификации не рассматривались плавучие или плавающие острова [70–72], поскольку согласно федеральному законодательству искусственными островами считаются стационарные искусственные объекты во внутренних и территориальных морских водах на свайном, насыпном, намывном или другом основании, и которые возвышаются над водной поверхностью при максимальном уровне воды [61, 73–74]. Таким образом, указанные конструкции плавучих и мобильных островов формально нельзя считать искусственными островами. В то же время,

сооружение, размещенное на свайном основании, можно считать искусственным островом.

Наибольшей простотой обладает остров, тело которого образовано намывом или отсыпкой материала с естественными или укрепленными откосами (рисунок 2.1). Стоимость строительства таких островов, как правило, наименьшая из существующих типов сооружений. Однако, это справедливо для акваторий с небольшими глубинами, строительство таких островов требует больших объемов грунтовых материалов, занимает больше времени и подразумевает постоянное пополнение материала для компенсации потерь под действием волн и течений [66].

Доступные местные материалы (грунта, камень и лед) начали использовать для освоения шельфа раньше, чем бетон и сталь [64]. Они сохраняют свое важное значение и на сегодняшний день, когда развитие техники и технологий строительства позволяет осваивать все более труднодоступные или суровые по климату регионы и, кроме того, как правило, обладают высокой экологичностью и рядом других преимуществ [75–76]. Грунтовый материал, как правило, транспортируется при помощи землесосов, саморазгружающимися баржами или самосвалами (при перевозке материала по льду). Для противостояния ледовым нагрузкам обычно применяют широкие пляжи или бермы.

Оптимальные характеристики сооружений откосного профиля должны определяться, в первую очередь, по результатам физического моделирования в лабораторных условиях. В то же время решение данной задачи в первом приближении может осуществляться и расчетным путем – на основе учета гидро- и литодинамических процессов, определяющих формирование штормового профиля откоса. Динамика профиля откоса и гидравлика волнового потока неразрывно связаны и оказывают взаимное влияние друг на друга. Так, гидравлические характеристики волнового потока оказывают влияние на изменение уклона морского откоса, а изменение уклона, в свою очередь, вызывает изменение гидравлических характеристик потока.

Основные закономерности изменения профиля откоса под воздействием волн исследователи связывают со следующими непосредственно наблюдаемыми и измеряемыми в природе физическими параметрами:

- с уклоном подводного берегового склона и морского откоса;
- с высотой и крутизной волны;
- со статистическими характеристиками высоты, периода и направления движения волн;
- с крупностью отсыпаемого материала и неоднородностью его гранулометрического состава;
- с отметкой уровня воды во время расчетного шторма;
- с влиянием берегового уступа и берегозащитных сооружений.

Некоторые из этих параметров в виде безразмерных соотношений косвенно характеризуют следующие одновременно действующие и определяющие основные закономерности изменения штормового профиля откоса физические факторы:

1. Асимметрия геометрических и кинематических элементов обрушающихся на откосе волн – $f(H_0 / h_{обр})$.
2. Подвижность и проницаемость отсыпаемого в откос материала – $f(d_{ср} / h_{обр})$.
3. Удельную энергию обрушающихся волн – $f(h_{обр} / gT^2)$,

где $H_0 / h_{обр}$ – относительная глубина воды перед бермой, защищающей откос;

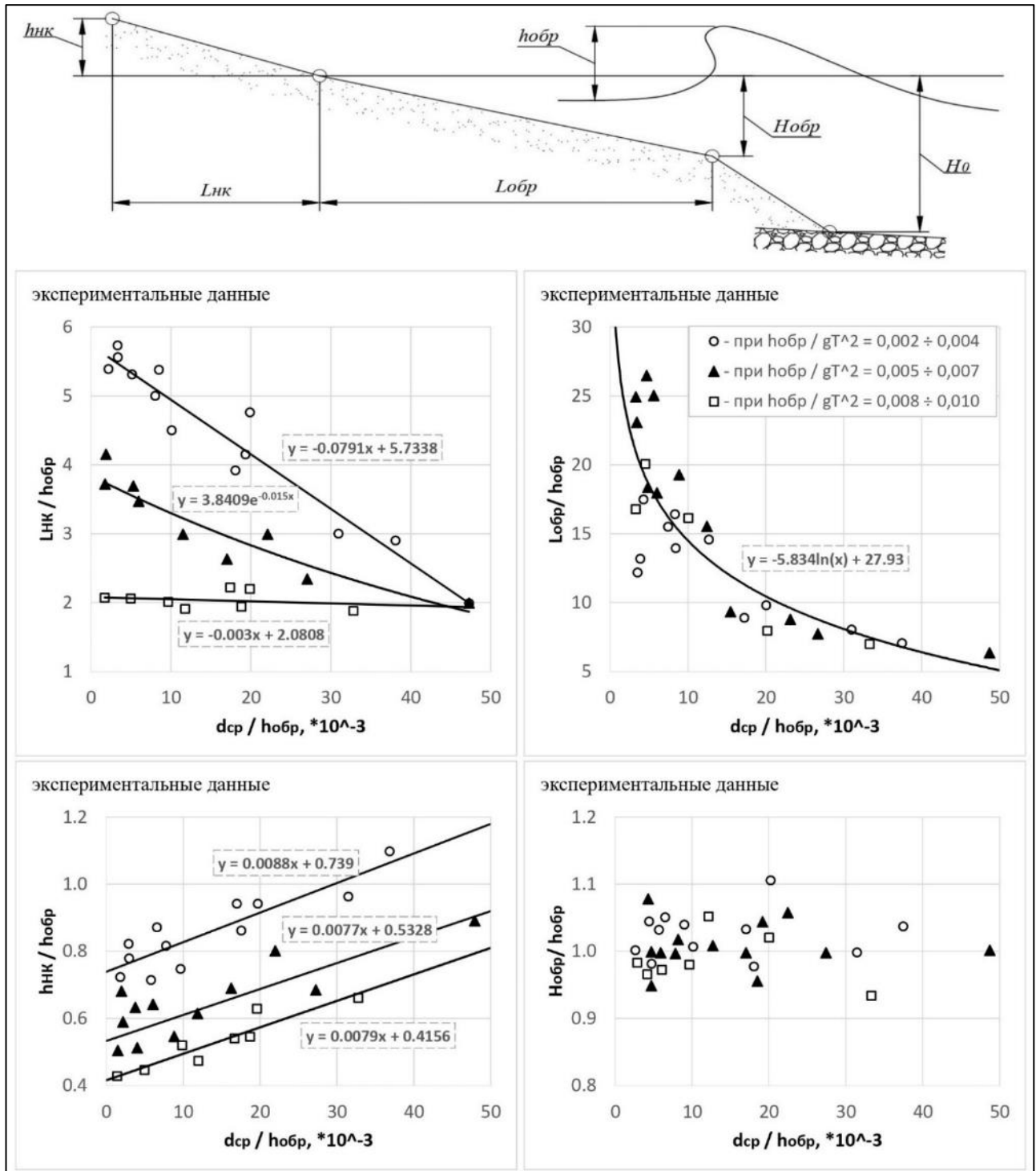
$d_{ср}$ – средний размер частиц отсыпаемого материала;

$h_{обр}$ – высота обрушающихся волн;

g – ускорение свободного падения;

T – период волн.

Для определения штормового профиля откоса в стадии динамического равновесия и составляющих его элементов могут быть использованы экспериментальные данные, приведенные на графиках ниже (рисунок 2.5).



Отметка верха подводного банкета, назначаемая на основе технико-экономических расчетов, не должна быть выше равновесного профиля откоса в условиях естественного берегового склона. Важно отметить, что крепление

откосов галькой, щебнем или крупным камнем необходимой крупности и формы может позволить снизить материалоемкость строительства (за счет увеличения уклона) и устойчивость откоса к размыву штормовыми волнами при условии доступности таких материалов и наличия необходимой строительной техники [77–78]. При этом целесообразность крепления откосов и требуемую крупность материала крепления необходимо определять на основании технико-экономического сравнения вариантов конструкции.

При использовании эмпирических зависимостей (рисунок 2.5) следует учитывать граничные условия их применимости. Для расширения границ применимости данного метода (в сторону уменьшения относительной глубины воды перед бермой пляжа $H_0/h_0 \rightarrow 1$) необходимы дальнейшие исследования.

Таким образом, по результатам экспериментальных лабораторных исследований разработан метод определения основных размеров подводных банкетов по равновесному профилю откоса проектной ширины, получаемому в гидравлической лаборатории на плоских физических моделях в условиях естественного берегового склона или по графикам (рисунок 2.5). При этом подводный банкет рассматривается в качестве составляющего элемента откоса искусственного острова, отсыпаемого из камня в его подводной части.

Экономическое обоснование строительства сооружений откосного типа в первую очередь основано на глубине акватории в месте строительства. При больших глубинах, как правило, более применимыми являются вертикальные или комбинированные сооружения.

Помимо широко применяемых сооружений из массивной кладки применение находят сооружения с ограждением тела острова шпунтовыми или свайными рядами [79], единичными оболочками большого диаметра [80–81] (рисунок 2.6). Возведение островов с вертикальным ограждением таких типов целесообразно при глубинах не более 30 метров.

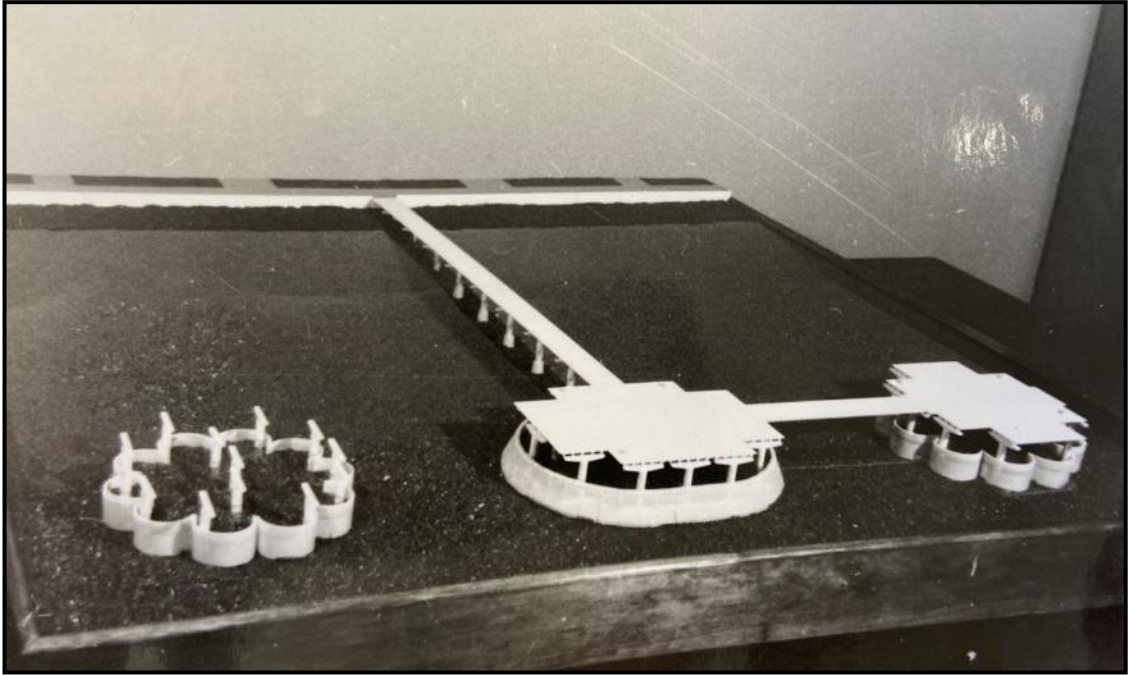


Рисунок 2.6 – Островной комплекс с ограждением из оболочек большого диаметра (крайние острова слева и справа) и из единой оконтуривающей оболочки (в центре) в волновом бассейне. Модель НИЦ «Морские берега» (г. Сочи)

Разработаны патенты на «мобильные искусственные острова» [82–84]. Такие конструкции имеют множество полых модулей или полую оболочку, разделенную на отсеки, которые после доставки на место строительства заполняются жидким и (или) твердым балластом и становятся, таким образом, стационарным сооружением. В качестве твердого балласта, как правило, используют крупногабаритные железобетонные блоки. В отдельных примерах в составе конструкции предусматриваются шахты для забивки свай на месте строительства.

На сегодняшний день на фоне ужесточения экологических требований многие из традиционных методов строительства островов неприемлемы, т.к. наносят значительный ущерб окружающей среде, как в процессе строительства, так и во время эксплуатации островных сооружений [85–87]. В связи с этим технологии строительства островов дополняются и совершенствуются, часто рассматриваются нестандартные конструктивные решения.

Существуют острова, построенные с применением геосинтетических оболочек (рисунок 2.7) [88]. Такие нестандартные конструкции успешно применяются уже несколько десятков лет [89].

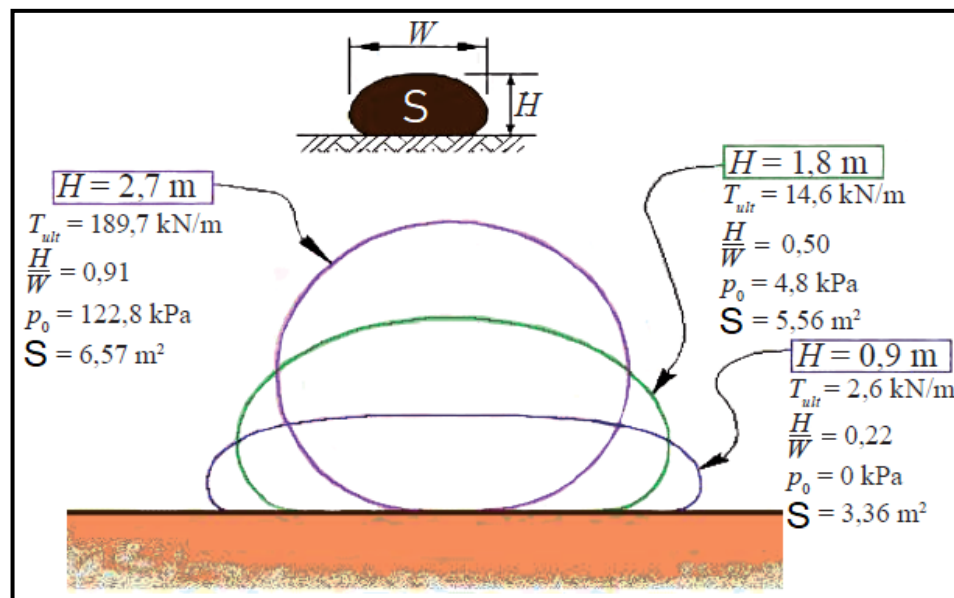


Рисунок 2.7 – Схема изменения поперечного сечения геосинтетической оболочки [88]: H – высота оболочки; W – ширина оболочки; T_{ult} – максимальное растягивающее усилие в материале оболочки; p_0 – создаваемое избыточное давление в оболочке; S – площадь поперечного сечения заполненной оболочки

Эти мягкие оболочки производятся из сшитого полипропилена высокой плотности и прочности. Они рассчитаны на высокие растягивающие напряжения. Оболочки заполняются, как правило, пульпой (осадком, илом, шламом), обезвоженной гравитационным способом.

Данная технология применялась при строительстве острова Амвадж (Amwaj, Бахрейн). Опыт применения геосинтетических оболочек в гидротехнике показал их высокую эффективность, надежность и экономичность при использовании технологии в гидротехническом строительстве [18], [90]. Технология позволяет использовать местные материалы для заполнения, сократить трудоемкость и стоимость строительства, а также отличается быстротой демонтажа при проведении ремонтных и демонтажных работ.

К специальным технологиям также можно отнести острова с ограждением из габионов. Технология имеет длительную историю изучения и обладает высокой экологичностью. Габионы различной конструкции применяются для предотвращения эрозии грунтовых сооружений более сотни лет. Они аккумулируют минеральные частицы грунта, благодаря чему повышают собственную прочность и становятся частью природного ландшафта [91]. Габионы подвергаются нагрузкам от осадок грунта, являясь при этом в некоторой степени свободно деформируемыми, но, при соблюдении технологии производства строительных работ, не разрушаются. Их проницаемая структура придает им выраженные дренажные свойства, а высокая скорость фильтрации защищает от возникновения гидростатических нагрузок. Габионы, как правило, укладывают в один или два слоя по откосу и по дну вокруг острова на мелководье. Однако, при всех преимуществах габионных конструкций, известны случаи значительных поперечных деформаций, нарушения целостности и полного разрушения сооружений из габионов в практике строительства морских ГТС в условиях морского волнения.

Существуют сооружения, запроектированные и построенные по типу нидерландского польдера (дамбы обвалования). По этой технологии участок акватории ограждается дамбами и осушается. Для контроля над уровнем воды внутри контура применяются дренажные системы, в том числе с применением насосных станций. Эта технология на протяжении многих лет позволяет голландским гидротехникам бороться с затоплением и позволяет образовывать новые территории.

Более двадцати лет назад за рубежом начали строить искусственные острова из твердых бытовых отходов. Технология представляется достаточно перспективной для условий ограниченной площади для возведения объектов. При этом наряду с образованием новой территории, возможна утилизация продуктов сжигания мусора. По данной технологии уже построено несколько островов в Японии и Сингапуре.

Другую специальную технологию строительства оградительных сооружений островов представляют ледовые и ледогрунтовые острова [92–93]. Такие сооружения применяют в арктических условиях при бурении нефтяных и газовых скважин на шельфе.

Первое их применение датируется семидесятыми годами двадцатого века. От грунтовых островов они выгодно отличались экологичностью и низкой стоимостью. Ледовые острова образуются намораживанием слоя льда на существующем ледяном покрове. В процессе намораживания вес центральной части сооружения увеличивается, он погружается на дно водоема и становится устойчивым к сдвигу под действием ледового поля [94–95].

Ледовые острова устраиваются на горизонтальном участке ледового поля с выдержанной толщиной ледяного покрова (обычно не менее 0,5 м). На сроки строительства влияют, в первую очередь, темп намораживания, высота сооружения и погодные условия.

Ледовые острова обладают рядом решающих преимуществ в сравнении с другими конструкциями: они дешевле аналогов из грунтовых материалов и погружных установок, обладают большей безопасностью и экологичностью в строительный период, их можно устраивать на бóльших (чем грунтовые ГТС) глубинах. Несколько примеров реализованных проектов ледовых островов приведены ниже (рисунок 2.8). Порядка 79% ледовых островов из числа приведенных примеров возводились на глубинах от 6 до 15 м (рисунок 2.9).

Наименование конструкции	Оператор	Годы реализации	Глубина м
Alerk Island	Esso Resources Ltd	1982	11,6
Kadluk 0-07	Esso Resources Canada Ltd	1983/1984	13,5
Sohlo Rubble Generator	Sohlo	1983/1984	13
Ice Island Experiment	Exxon	1983/1984	13,7
Big Gun Expt	Esso	1983/1984	14
SSDC Kogyuk	Canmar Ltd	1983/1984	28,4
CIDS Antares Barrier	Exxon	1984/1985	14,9
Cape Allson C-47	Panarctic Oils Ltd	1984/1985	7,9
Mars	Amoco	1985/1986	7,6
Angasak L-03	Imperial/Esso Resources	1986/1987	5,6
Nipterk P-32	Imperial	1988/1989	6,9
Karluk	Chevron USA	1988/1989	7,6
Isserk I-15	Imperial Oil Limited	1989/1990	11,5
Natchiq	Pioneer	2002/2003	2,3

Рисунок 2.8 – Примеры реализованных проектов ледовых островов

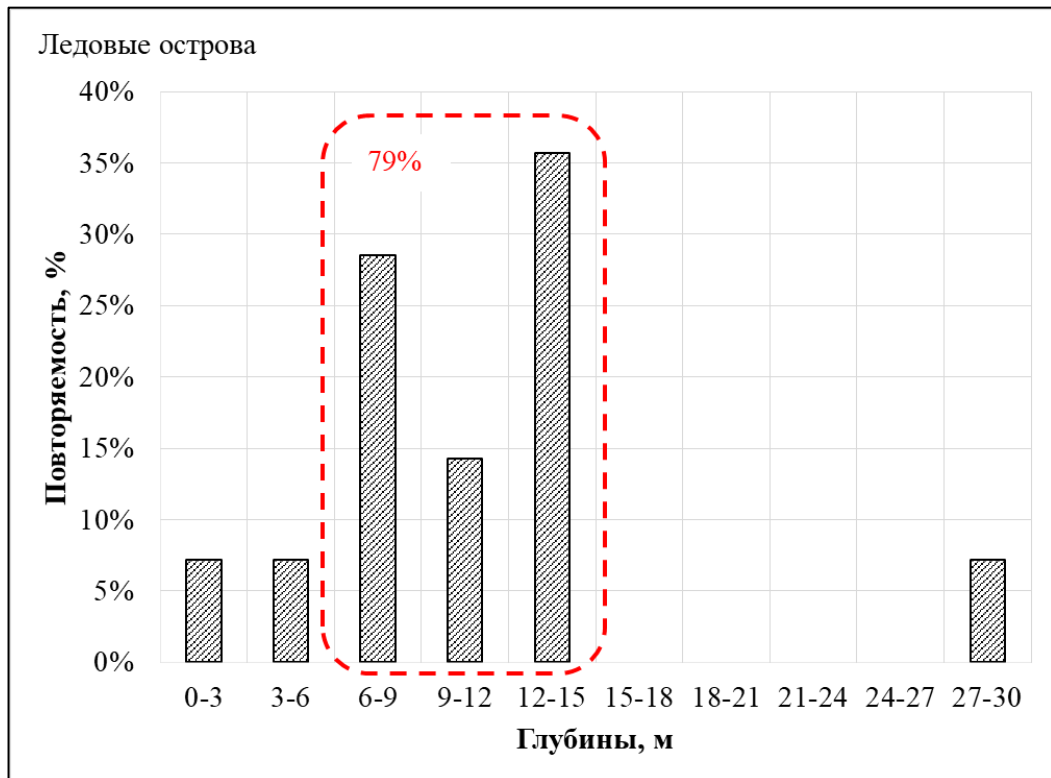


Рисунок 2.9 – Повторяемость глубин в местах строительства ледовых островов

Эффективность работы вертикальной непроницаемой береговой стены в условиях ограничения отметки ее верха зачастую может оказаться недостаточной, поскольку всплеск волн при ее ударе о вертикальную грань такой стены может значительно превышать отметку верха стены, что грозит затоплением защищаемой территории, особенно при штормовом ветре со стороны акватории [96]. Сложное криволинейное очертание передней грани широко применяемых волноотбойных стен, как показали результаты выполненных ранее исследований [97], позволяет заметно снизить, но не исключить отмеченные выше недостатки таких стен. Эффективность волноотбойных стен в условиях отсутствия волногасящей пляжевой полосы обычно повышается устройством волногасящего прикрытия из фасонных массивов [18], [22]. Однако, строительство таких сооружений ограничивает возможность использования защищаемого берега в рекреационных целях. Проницаемые конструкции береговых стен и волногасителей лишены отмеченных выше недостатков.

Отдельную группу оградительных островных ГТС составляют сквозные конструкции [98]. В привычном понимании ГТС пассивного типа могут отражать ветровые волны (сплошные стены) или полностью их гасить (пляжи). Проницаемые сооружения частично отражают, частично гасят и, в некоторых случаях – частично пропускают подходящие волны.

Указанные свойства можно выразить в виде коэффициентов отражения, волногашения и прохождения волновой энергии соответственно. Основные положения по расчету таких конструкций приведены в [12]. Опираясь на опыт проектирования, строительства и эксплуатации таких сооружений можно говорить об их высокой эффективности и при этом – об их более низкой (в сравнении с традиционными сооружениями) материалоемкости [99–100]. Ниже показаны примеры сквозных оградительных островных ГТС (рисунок 2.10).

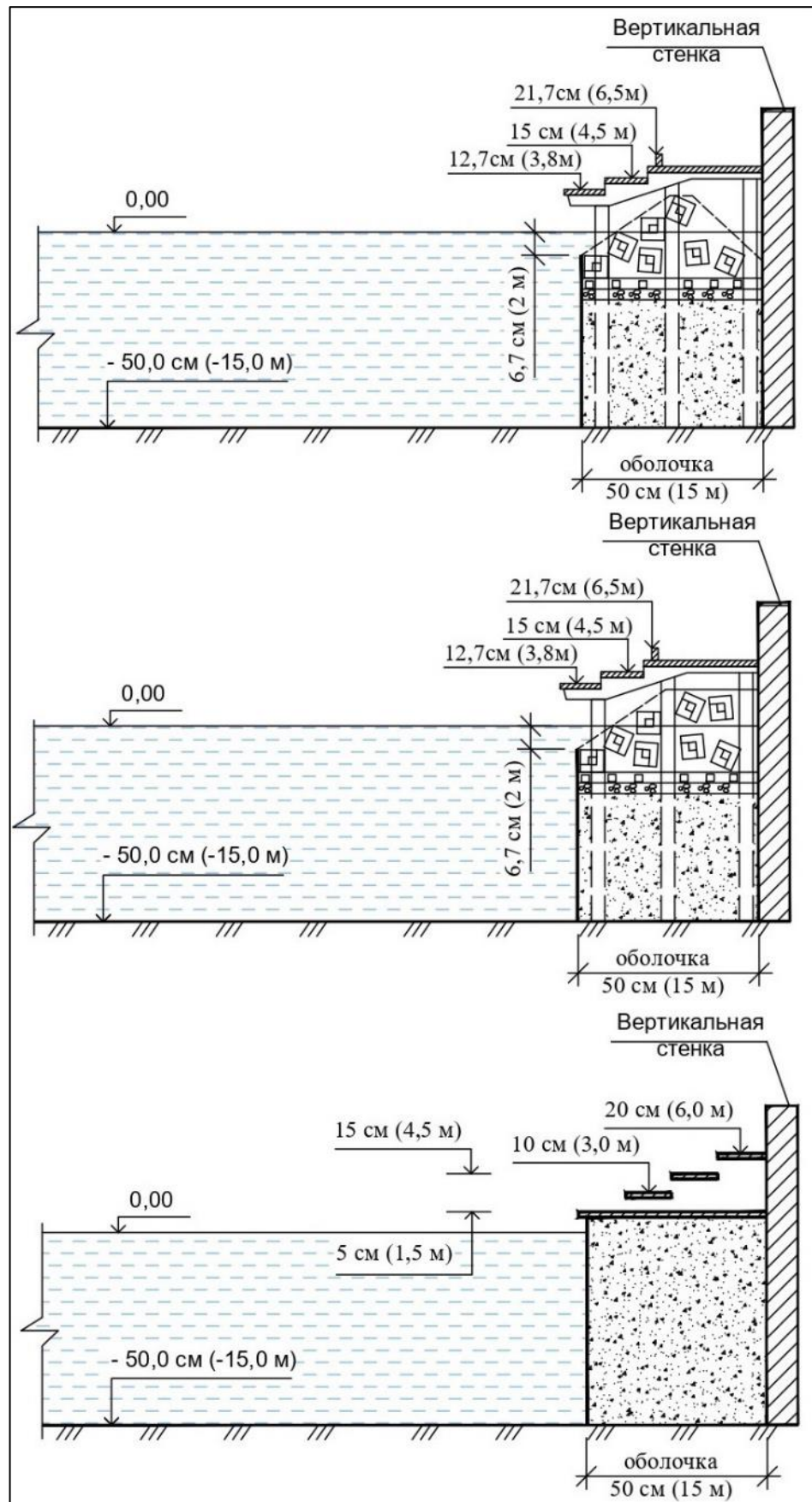


Рисунок 2.10 – Варианты оградительного сооружения «Острова Югра» в виде проницаемых откосно-ступенчатых конструкций, исследованные на гидравлической модели [98]

С целью определения оптимальных параметров волновой камеры сквозных сооружений было выполнено исследование на плоских физических моделях сооружений. Исследования выполнены для волнового режима с высотой обрушающихся волн, равной 3 м и периодом, равным 2 с. Результаты опытов (таблица 2.1) показали, что наибольшее отличие в скоростях волн, отраженных от проницаемой морской стены и от непроницаемой береговой, имеет место при ширине волновой камеры, равной:

$$b = 0,09\lambda_{br}, \quad (2.1)$$

где λ_{br} – длина разрушающейся на береговом откосе волны.

Таблица 2.1 – Влияние ширины волновой камеры на эффективность работы проницаемого берегозащитного сооружения

Ширина камеры								
б, м	0	0,5	2,5	5,0	7,5	10,0	13,8	17,5
б / λ_{br}	0	0,01	0,05	0,09	0,14	0,18	0,25	0,32
Расстояние до пучности волн								
от прониц. стены а, м	-	33,8	30,0	28,8	27,5	27,5	27,5	27,5
от непрониц. стены а', м	35,0	33,8	26,2	25,0	27,5	28,8	31,2	35,0
Скорость отраженных волн								
от прониц. стены С, м	-	6,8	6,0	5,8	5,5	5,5	5,5	5,5
от непрониц. стены С', м	7,0	6,8	5,2	5,0	5,5	5,8	6,2	7,0
Относит. скорость отраженных волн								
$C / (gdbr)^{0,5}$	-	1,26	1,11	1,07	1,02	1,02	1,02	1,02
C / C'	-	1,00	1,15	1,16	1,00	0,95	0,89	0,79
Высота всплесков волн								
перед прониц. стеной η , м	-	4,25	3,19	2,96	3,04	3,74	3,15	3,36
перед непрониц. стеной η' , м	8,07	-	4,42	3,82	3,89	4,08	2,95	2,40
Высота отраженных волн								
от прониц. стены h _{ref} , м	-	2,26	1,79	1,40	1,20	0,95	0,82	0,75
от непрониц. стены h' _{ref} , м	2,50	-	0,52	0,38	1,25	0,17	0,14	0,12
Эффективность работы сооружения по высоте всплесков								
η / h_{br}	-	1,42	1,06	0,99	1,01	1,24	1,05	1,12
η' / h_{br}	2,69	-	1,47	1,28	1,30	1,36	0,98	0,80
η / η'	-	-	0,72	0,77	0,78	0,92	1,07	1,40
Эффективность работы сооружения по отражению волн								
h _{ref} / h	-	0,95	0,75	0,59	0,50	0,40	0,34	0,32
h' _{ref} / h	1,00	-	0,22	0,16	0,52	0,07	0,06	0,05
h _{ref} / h' _{ref}	-	-	3,44	3,68	0,96	5,59	5,86	6,25

При конструировании проницаемых стен рекомендуется расстояние между морской и береговой стенами в первом приближении назначать с учетом зависимости (2.1).

В условиях, при которых скорости отраженных волн от морской и береговой стен отличаются в наибольшей мере, эффективность работы берегозащитного сооружения достигает наивысших показателей. Объясняется это повышением роли взаимодействия, а соответственно, и рассеивания (диссипации) энергии при встрече прямой и отраженной от стены волн.

Таким образом, на этапе предварительной оценки применимости проницаемых стен, рекомендуется в дополнение к расчету нагрузок на обтекаемые преграды [11] оценивать также эффективность работы сквозной стены с использованием приведенных выше результатов исследований, а если это невозможно – выполнять физическое моделирование.

При проектировании оградительных сооружений рекомендуется рассматривать целесообразность применения дополнительных волнозащитных конструкций с учетом области их применения, например, гидравлических, пневматических, плавучих волноломов и других. Важно учитывать, что плавучие волноломы теряют эффективность при воздействии длинных (пологих) волн [101]. Как правило, область применения таких конструкций ограничивается высотой волн 4 м, крутизной волн порядка 1:20, глубиной не менее четырех высот волн.

2.2. Классификация и условия применимости типов конструкций искусственных островов

Рассмотренные в настоящей главе типы островных ГТС послужили дополнением к существующей классификации островных сооружений и легли в основу предложенной новой классификации, приведенной ниже (рисунок 2.11).

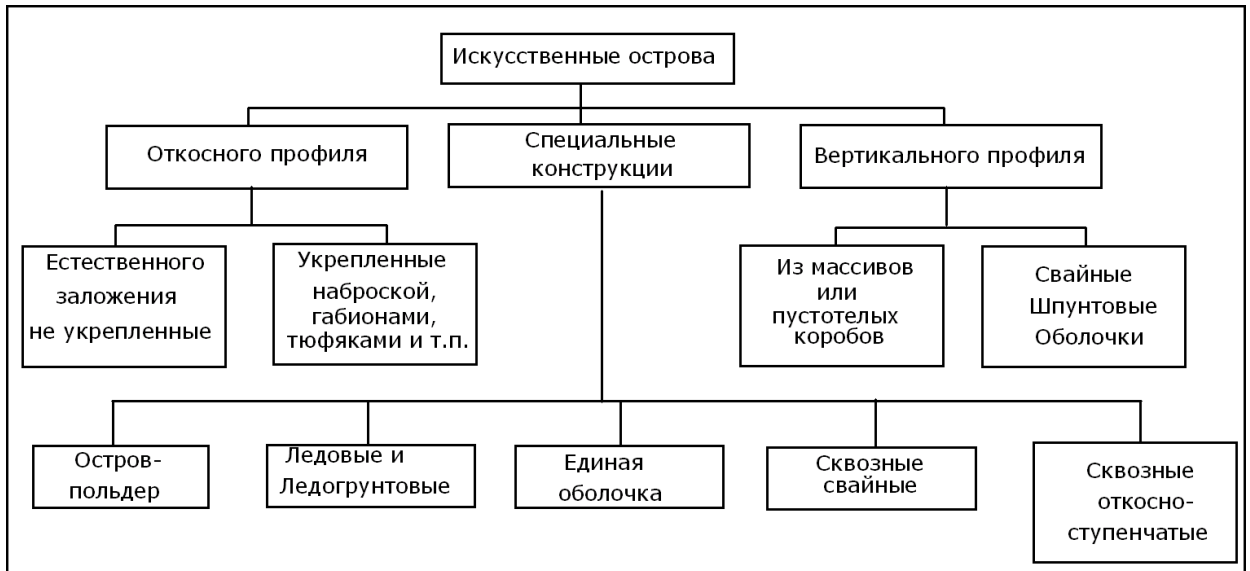


Рисунок 2.11 – Предлагаемая классификация оградительных сооружений искусственных островов

Был выполнен анализ накопленного опыта эксплуатации различных типов оградительных ГТС и определены условия применимости тех или иных конструкций. Также был использован большой объем данных лабораторных исследований.

Критерии применимости различных типов островных оградительных ГТС приведены ниже (таблица 2.2). Рекомендации, касающиеся глубин акватории в месте устройства острова приведены с учетом положений действующих строительных нормативов [12].

Таким образом, предложены полученные критерии (качественные и количественные) применимости различных типов оградительных островных сооружений.

В дополнение к приведенным требованиям необходимо учитывать дополнительные требования к островам рекреационного назначения, возводимых в курортных регионах [67]:

- рекреационные объекты, размещаемые на искусственных островах должны быть общедоступными;
- высотные отметки возводимых на островах объектов должны быть не более 10–15 м над уровнем моря;

- расстояние от уреза моря до острова должно быть 200 – 300 м или более;
- расстояние между смежными островами должно составлять не менее 0,5–1,0 км.

Таблица 2.2 – Условия применения конструкций искусственных островов

Тип сооружения	Показания по условиям применения и рекомендации
Сооружения откосного профиля, остров-польдер	<p>Намывные и насыпные острова допускается возводить на скальных, песчаных, крупнообломочных и глинистых в твердом и полутвердом состоянии грунтах основания.</p> <p>Насыпные острова допускается возводить также на глинистых грунтах в водонасыщенном пластичном состоянии.</p> <p>Для островов – польдеров в основании не должно быть слабых илистых грунтов*.</p> <p>Для строительства необходим доступный источник значительных объемов грунтовых строительных материалов.</p> <p>Необходимо предусматривать периодические мероприятия по восполнению потерь пляжевого материала по результатам расчетов и (или) моделирования.</p> <p>Рекомендуется крепление откосов галькой, щебнем или крупным камнем в соответствии с требованиями [2, 25] по результатам технико-экономического обоснования.</p> <p>Целесообразность применения упорных элементов подводного банкета определяется уменьшением объема отсыпаемого в тело банкета камня**.</p> <p>Расчетная высота волн – до 3 м.</p>
Бетонные массивы или пустотелые короба	<p>Глубина акватории – до 30 м, при расчетном обосновании – до 50 м.</p> <p>Грунты основания: скальные, песчаные, крупнообломочные, глинистые (твердые или полутвердые).</p> <p>Расчетная высота волн – до 10 м.</p> <p>Предпочтительное назначение островов – образование новой территории для размещения промышленных и рекреационных объектов.</p>

Тип сооружения	Показания по условиям применения и рекомендации
Шпунт, сваи	<p>Глубина акватории – до 30м. Скальные, песчаные, крупнообломочные и глинистые в твердом и полутвердом состоянии грунты основания. Расчетная высота волны – до 10 м.</p>
Оболочки большого диаметра	<p>Глубина акватории – до 15 м, при расчетном обосновании – до 25 м. Грунты основания: то же, что для бетонных массивов или пустотелых коробов. Расчетная высота волны – до 8 м.</p>
Ледовые и ледогрунтовые острова	<p>На акваториях с ледовым периодом 7 месяцев и более. Глубина акватории – до 10 метров. Толщина льда в момент начала намораживания – не менее 0,5 м. Грунты основания: то же, что для шпунтовых и свайных сооружений, а также глинистые водонасыщенные в пластичном состоянии. Строятся, как правило, для разведочного бурения, сезонного размещения технологических и транспортных объектов. Расчетная высота волн – до 6 м.</p>
Проницаемые конструкции (свайные или откосно-ступенчатые)	<p>Глубина акватории – до 30 м. Скальные, песчаные, крупнообломочные и глинистые в твердом и полутвердом состоянии грунты основания. Расчетная высота волны – до 10 м. Обеспечивается значительное уменьшение высоты всплесков волн и степени их отражения от сооружения. Могут применяться как самостоятельное оградительное сооружение или в комбинации с другими сооружениями откосного и вертикального профиля. В первом приближении оптимальной по соотношению коэффициентов отражения и прохождения волн является сквозность проницаемых волногасителей, равная 0,20. Равенство коэффициентов отражения и прохождения волн достигается при соотношении $b / \lambda = 0,08 - 0,10^{***},$ где b – ширина волновой камеры. λ – длина волны. Низ проницаемой части береговой стены целесообразно устраивать не глубже половины расчетной высоты волны****.</p>

Тип сооружения	Показания по условиям применения и рекомендации
<p>Примечания:</p> <p>* – при обнаружении слабых грунтов основания необходимо разработать мероприятия по их замене и (или) укреплению или заменить тип конструкции острова;</p> <p>** – наибольшие воздействия расчетных штормовых волн воспринимаются не упорным рядом подводного банкета, а искусственно создаваемым над ним дном, поэтому наброска, выполняемая в качестве упорного элемента, претерпевает минимальные деформации;</p> <p>*** – по результатам теоретических, экспериментальных исследований и данных наблюдений за работой сооружений в процессе эксплуатации;</p> <p>**** – в ряде теоретических исследований отмечается, что волногашение выполняется той частью сооружения, которая находится не глубже половины высоты расчетной волны, то есть гашению подлежит в основном гребень волны.</p>	

Представляется целесообразным выполнение комплекса специальных научных исследований для решения конкретной инженерной задачи с целью обоснования конструкций оградительных сооружений искусственных островов.

Выводы по главе

По результатам работы, описанной в данной главе сделаны следующие выводы:

- выполнен обзор традиционных и инновационных типов конструкций островных сооружений;
- разработана новая уточненная и дополненная классификация ограждающих конструкций искусственных островов, предложены критерии применимости типов конструкций [102–104];
- наиболее перспективными представляются волногасители искусственных островов в виде сквозных конструкций с волновой камерой;
- представляется целесообразным более подробное изучение таких волногасителей, в том числе в откосно-ступенчатом исполнении.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВОЗНЫХ ВОЛНОГАСИТЕЛЕЙ

Проницаемые берегозащитные ГТС находят широкое применение на берегах морей, озер, водохранилищ, подверженных разрушающему действию штормового волнения. Проницаемые конструкции встречаются во всех типах берегозащитных сооружений: стенах, бунах, волноломах, бермах, банкетах и др. Тело таких сооружений имеет либо множество отверстий и пустот, либо волновые камеры, в которых происходит преобразование упорядоченного волнового движения в турбулентное и хаотичное.

На сегодняшний день сквозные конструкции интенсивно разрабатываются при решении гидротехнических задач, однако многие вопросы относительно эффективности их работы в зависимости от характеристик ГТС, местных природных условий и параметров подходящих волн определены недостаточно. Как правило, такие оценки получают по результатам комплексных лабораторных исследований на физических моделях сооружений для конкретных условий строительства. Ниже приводятся результаты обобщения накопленного опыта проектирования сооружений по типу проницаемых стен в целом и сквозных откосно-ступенчатых конструкций в частности, в том числе, опыт научных исследований по данной теме на физических моделях.

По характеру взаимодействия с волнами ГТС сквозной конструкции занимают особое место, поскольку частично отражают, частично гасят и, в ряде случаев, в некоторой степени пропускают воздействующие волны. Указанные свойства обычно выражаются через коэффициенты отражения, гашения и прохождения волн соответственно.

В применяемых формулах основными параметрами сооружений с волновой камерой являются сквозность, наклон сквозной части, ширина волновой камеры, коэффициент отражения от тыльной части сооружения, отношение объема гребня волны к эффективному объему волновой камеры с учетом конструктивных

решений (плиты перекрытия, причальные ростверки и др.), а также глубина до низа сквозной части сооружения.

В ряде исследований отмечается, что эффективное волногашение обеспечивается частью сооружения до глубины, равной половине высоты воздействующих волны. Таким образом, при достаточном обосновании те части сооружений, которые расположены на большей глубине, могут выполняться сплошными.

В Черноморском отделении ЦНИИС (сегодня – ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега») в г. Сочи выполнен ряд исследований по взаимодействию волн с сооружениями сквозной конструкции.

Методика гидравлического моделирования при этом основывается на главных положениях теории подобия, которые позволяют судить о степени соответствия модельных процессов натурным [105–109]. При рассмотрении физического подобия в гидравлических задачах можно выделить геометрическое, кинематическое и динамическое подобие. В общем случае модель подобна натуре, если в обоих случаях воздействия одинаковой природы и характера вызывают пропорциональные реакции. При физическом подобии изучаемые процессы на модели и в натуральных условиях описываются одинаковыми физическими законами, а решения могут быть определены для одинаковых краевых условий. Поэтому безразмерные величины для модели и для натурального объекта равны.

В лаборатории сочинского филиала ЦНИИС по теме взаимодействия сквозных волногасящих ГТС в виде вертикальных и откосных конструкций с ветровым волнением выполнен ряд специальных исследований [110]. При этом контролировались волновые нагрузки на сооружения, высота заплесков по линии кордона, высота стоячих волн перед сооружением и их сравнение с показателями в случае открытого (незащищенного) берега. Эти измерения позволили определить коэффициенты отражения волн от сооружений разных типов. Эксперименты в работе [110] проводились при периоде волн $T = 3,2$ с. Модели

конструкций устанавливались на неразмываемом откосе с уклоном 1:10. Расположение сооружений в различных зонах откоса воспроизводилось изменением наполнения волнового лотка (до, на линии обрушения и в приурезовой зоне). Типы рассмотренных модельных конструкций и их ключевые параметры приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Модели испытанных конструкций

№ серии опытов	Тип конструкции	Сквозность	Ширина отверстий в свету, м	Ширина подвижного фрагмента конструкции, м	Составной конструктивный элемент	Форма отверстий
1	сплошная вертикальная стена	0,0	0,0	0,15	плита	-
2	проницаемая свайная	0,2	0,013	0,25	свая	конусная
3	проницаемая свайная	0,4	0,034	0,25	свая	конусная
4	проницаемая откосно-ступенчатая	0,2	0,01	0,71	балка, свая	прямоугольная

По результатам опытов можно судить о том, что наибольшие нагрузки и высоты заплесков волн на модели наблюдаются, когда сооружение расположено вблизи линии обрушения волн (режим 2 – для вертикальных сооружений и режим 3 – для откосного сооружения, таблица 3.2). При этом высоты заплесков составляют порядка 1,2 – 1,4 от высоты волн при их обрушении. Коэффициенты отражения волн в мелководной зоне и на линии обрушения остаются примерно одинаковыми.

С 1989 по 1993 год в Черноморском отделении ЦНИИС проводились исследования ГТС для защиты Каспийского побережья в условиях повышения уровня моря. Например, в одной из работ [111] исследовалось взаимодействие волн со сквозными сооружениями, расположенными на линии обрушения. Эксперименты проводились на двухмерной модели в масштабе 1:10, результаты показаны в таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Результаты экспериментов

№	Тип сооружения	Сквозность	№ волнов. реж.	К-т отражения	Высота заплеска, м	Погонная нагрузка, н/м	Вид нагрузки
1	Сплошная вертикальная стена (ширина сооружения 0,15 м)	0,0	1	1	0,23	466,9	Удар
			2	1	0,33	343,9	Навал
			3	1	0,28	1968,7	Удар
			4	1	0,10	404,0	Навал
2	Свайная стена (ширина сооружения 0,25 м)	0,2	1	0,61	0,18	342,7	Удар
			2	0,61	0,27	178,5	Навал
			3	-	0,27	129,5	Удар
			4	-	0,13	81,6	Навал
3	Свайная стена (ширина сооружения 0,25 м)	0,4	1	0,58	0,15	768,0	Удар
			2	0,58	0,30	244,0	Навал
			3	-	0,22	1084,5	Удар
			4	-	0,09	266,2	Навал
4	Откосно-ступенчатый волногаситель (ширина сооружения 0,71 м)	0,2	1	0,60	0,17	477,5	Удар
			2	0,62	0,16	162,8	Навал
			3	-	0,24	159,7	Удар
			4	-	0,06	11,2	Навал

Таблица 3.3 – Волновые нагрузки на модели сооружений, расположенные на линии обрушения волн

№	Тип сооружения	Сквозность	№ волн. режима	Погонная нагрузка, н/м	Вид нагрузки
1	Сплошная вертикальная стена, ширина сооружения 0,15 м	0,0	1	990,7 590,0	Удар Навал
2	Свайно-решетчатая стена, ширина сооружения 0,22 м	0,30	1	369,5 106,4	Удар Навал
3	Свайно-решетчатая стена, ширина сооружения 0,25 м	0,22	1	406,8 126,4	Удар Навал
4	Свайно-решетчатая стена, ширина сооружения 0,22 м	0,10	1	750,0 326,4	Удар Навал
5	Свайная стена из круглых свай, ширина сооружения 0,16 м	0,25	1	261,2 94,4	Удар Навал
6	Проницаемая решетка из покрышек на сваях (внахлест), ширина сооружения 0,21 м	0,26	1	375,7 134,8	Удар Навал
7	Проницаемая решетка из покрышек на сваях (встык), ширина сооружения 0,20 м	0,12	1	530,5 218,0	Удар Навал
8	Откосно-ступенчатая конструкция, ширина сооружения 0,76 м	0,20	1	329,5 155,4	Удар Навал
9	Откосно-ступенчатая конструкция, ширина сооружения 0,76 м	0,31	1	164,2 70,3	Удар Навал

В работе [112] определялись коэффициенты отражения расчетных волн, а также скорости в придонной области. Моделирование выполнялось в масштабе 1:25, модели сооружений также располагались на линии обрушения волн. По полученным на моделях данным оценивались асимметрии скоростей (отношение скорости в гребне волны, направленной в сторону берега и во впадине волны, направленной в противоположную сторону). Результаты обработки полученных данных, приведенные в таблице 3.4 и на рисунке 3.1, показывают, что все сквозные сооружения с устройством волновых камер обладают гидродинамическими характеристиками, сопоставимыми с характеристиками

проницаемого откоса (свободного пляжа). При этом увеличение количества устанавливаемых рядов свай, а соответственно и волновых камер между ними не привели к значительному приросту эффективности ГТС, а уменьшение сквозности проницаемого гасителя ниже некоторой оптимальной величины (в данной работе – 0,2) увеличивает гидравлическое сопротивление конструкции и снижает ее эффективность (таблица 3.4, рисунок 3.1).

Таблица 3.4 – Коэффициенты отражения волн, асимметрия волновых скоростей и высоты максимальных заплесков на модели сооружений

№	Тип сооружения	Сквозность (пористость)	Высота волны, м	Асимметрия скорости V_6/V_M	К-т отражения	Высота заплеска, м
1	Проницаемый откос (пляж)	-	2,50	1,91	0,05	1,18
			3,00	1,60	0,10	1,50
2	Сплошная вертикальная стена	0,00	2,50	0,93	1,00	3,75
			3,00	0,86	1,00	4,00
3	Сквозная из трех рядов свай	0,21	2,50	1,43	0,40	2,25
			3,00	1,39	0,50	2,88
4	Сквозная откосно-ступенчатая	0,20	2,50	1,41	0,30	2,25
			3,00	1,41	0,50	3,12
5	Берма из наброски камня	0,40	2,50	1,50	0,50	2,62
			3,00	1,21	0,75	3,50

В работах [111–112] применение сквозных конструкций откосно-ступенчатого профиля показало их высокую эффективность: наблюдались значительное снижение нагрузок на сооружение при сопоставимой сквозности конструкции, высокая асимметрия скоростей и коэффициенты отражения, близкие к оптимальным 0,5.

Специалистами НИЦ «Морские берега» также был разработан проект ГТС «Острова Югра» неподалеку от г. Туапсе Краснодарского края [113–114].

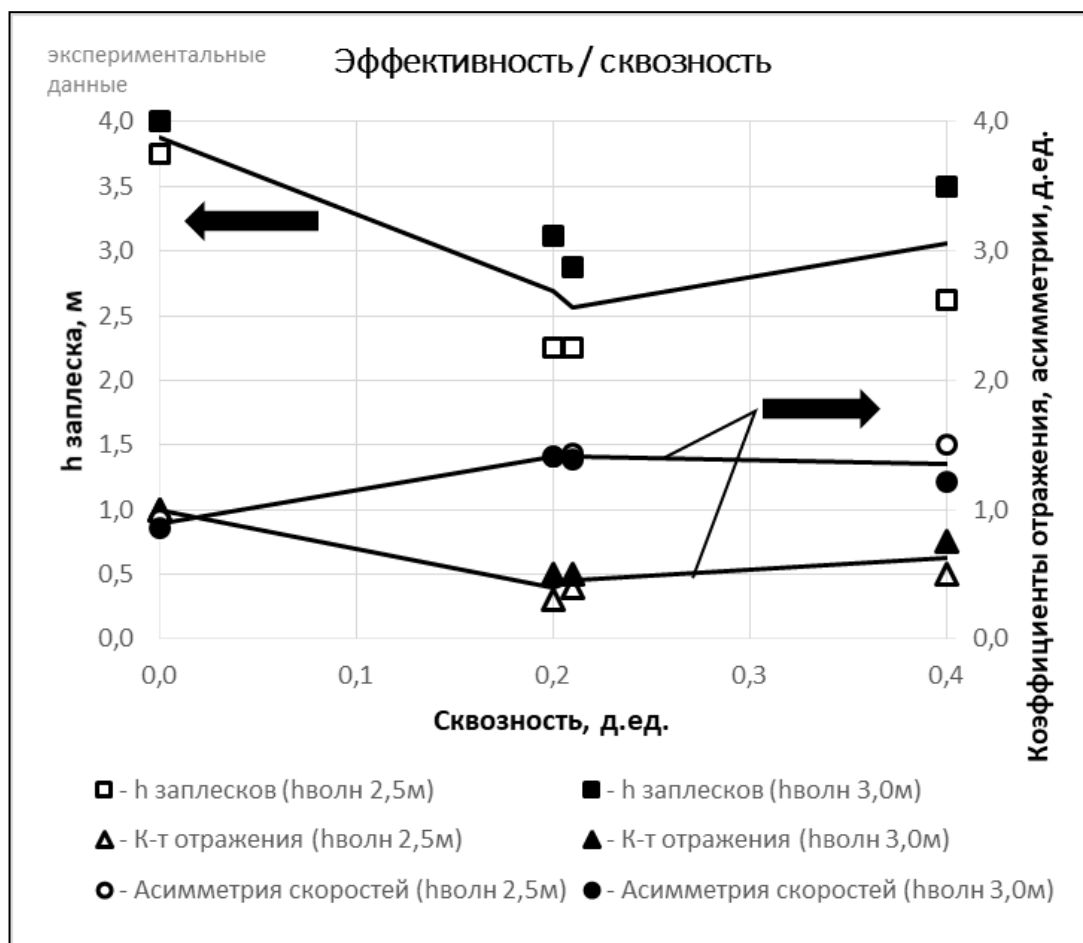


Рисунок 3.1 – Результаты обработки экспериментальных данных [112]

Выполнялось гидравлическое моделирование оградительных островных сооружений в нескольких вариантах для защиты территории острова от волновых переливов и заплесков при волнении в системе расчетного шторма. Рассмотренные двухмерные модели имели масштаб 1:30. Варианты конструкций оградительных островных сооружений, а также результаты экспериментов представлены в таблице 3.5. По результатам опытов установлено, что наибольшей эффективностью обладает конструкция № 6 – проницаемая, откосно-ступенчатого профиля со свободной (незаполненной) волновой камерой (рисунок 3.2).

Таблица 3.5 – Результаты экспериментальных исследований различных вариантов конструкции оградительного сооружения «Острова Югра»

№	Тип сооружения	К-т отражения	Высота макс. заплеска на тыльную стену, м
1	Откос с укладкой тетраподов	0,20	7,0
2	Откос с укладкой гексабитов	0,24	6,3
3	Вертикальная стенка с подводным волноломом	0,34	6,9
4	Откосно-ступенчатая с заполнением волновой камеры гексабитами	0,47	6,3
5	Откосно-ступенчатая с частичным заполнением волновой камеры гексабитами	0,43	6,3
6	Откосно-ступенчатая без заполнения волновой камеры	0,71	5,5



Рисунок 3.2 – Откосно-ступенчатый волногаситель (вариант №6), проект «Острова Югра» [113]

Одной из последних научно-исследовательских работ по теме являются экспериментальные исследования, направленные на изучение эффективности работы сооружений с волновой камерой [115]. На первом этапе работы

выполнено пять серий экспериментов по 16 опытов. Исследовались ГТС с волновой камерой с различной сквозностью морской стенки (0,1–0,5 с шагом 0,1) при различных волновых режимах. Испытательное оборудование в волновом лотке перед его наполнением показано ниже (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Испытательное оборудование, установленное в волновом лотке.
Сквозность стены в опыте – 0,3

Для оценки волногасящей способности исследуемых конструкций по результатам измерений определялся коэффициент отражения волн по формуле:

$$k_{ref} = (h_{int} - h)/h, \quad (3.1)$$

где: h_{int} – высота стоячих волн в пучности; h – высота расчетных волн.

Из закона сохранения волновой энергии следует равенство:

$$k_{ref}^2 + k_{tr}^2 + k_{dis}^2 = 1 \quad (3.2)$$

где $k_{tr} = h_{tr} / h$ – коэффициент прохождения волн,

k_{dis} – коэффициент волногашения,

h_{tr} – высота волн, прошедших через сквозное сооружение.

Отсюда получаем зависимость для оценки коэффициента волногашения:

$$k_{dis} = (1 - k_{ref}^2 - k_{tr}^2)^{0,5} \quad (3.3)$$

С целью точного определения коэффициента прохождения волн в начале каждой серии проводились опыты без волновой камеры. Результаты экспериментов приведены ниже (рисунок 3.4).

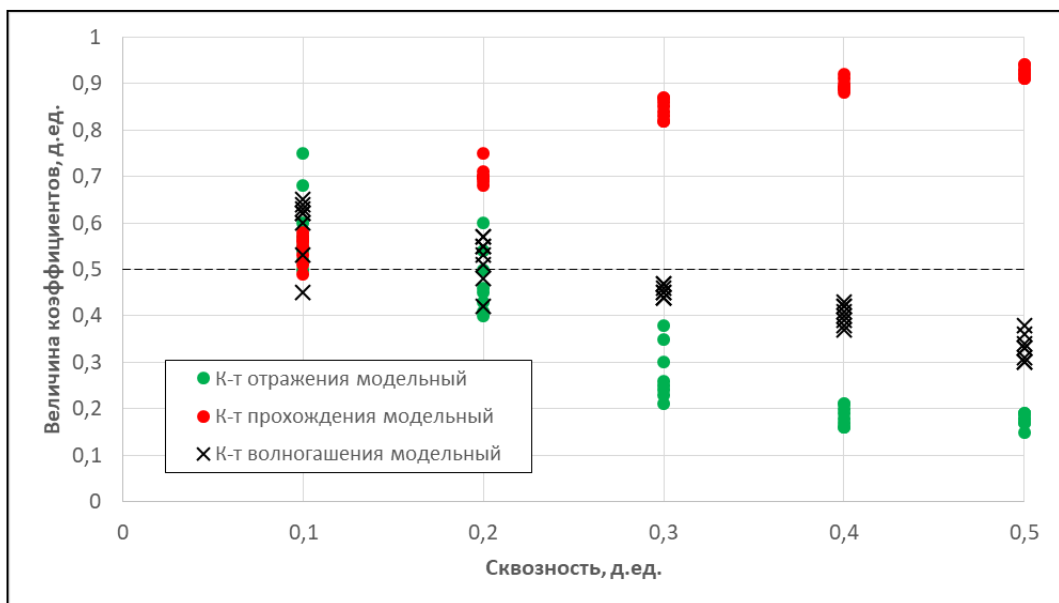


Рисунок 3.4 – Результаты опытов по определению коэффициентов работы проницаемой стены

На следующем, втором этапе было проведено четыре серии экспериментов. Определялись волновые нагрузки на сквозные ГТС с волновой камерой шириной 0,3 м со сквозностью передней стенки 0,1–0,4. Также измерялись волновые нагрузки на стену при накате и при откате волн. Результаты опытов показаны на рисунке 3.5.

Помимо физического проводилось численное моделирование с целью оценки влияния нескольких факторов на отражающие и волногасящие свойства сквозных стен:

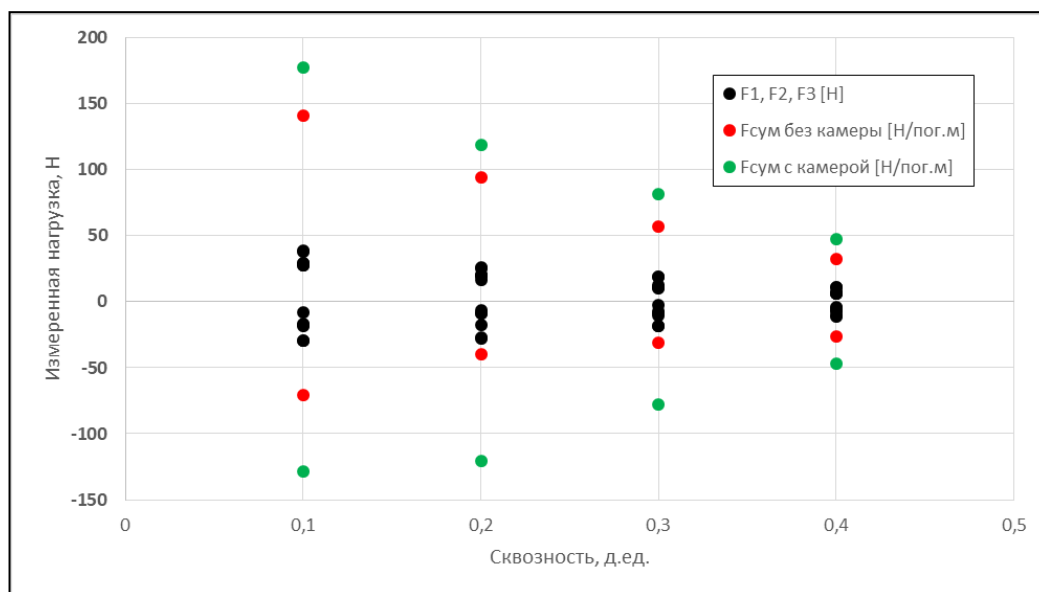


Рисунок 3.5 – Результаты опытов по оценке волновых нагрузок на сооружения: F1, F2 и F3 – измеренные нагрузки, F_{сум} – полная погонная нагрузка на стену. Положительные значения нагрузок соответствуют накату волн на сооружение, отрицательные – их откату

– изменение коэффициентов работы стены в зависимости от ее сквозности и высоты волн при отсутствии береговой границы, влияние угла наклона стены и места ее расположения: на глубине 6,0 м в мелководной зоне и на глубине 0,2 м (в зоне наката волн), а также в зависимости от ширины волновой камеры при разной сквозности;

– зависимость горизонтальных волновых нагрузок, воспринимаемых стеной от ее сквозности.

Некоторые результаты указанных численных экспериментов приведены на рисунках 3.6–3.7. На рисунках видно, что при равной сквозности стен более крутые волны отражаются сильнее (кривые 1, 2 на рисунке 3.6). При отсутствии волновой камеры при воздействии волн с относительной высотой, равной 0,875, равенство коэффициентов отражения и прохождения волн фиксируется при сквозности, равной 0,22 (рисунок 3.7). Сравнение результатов моделирования на физических и численных моделях показано ниже (рисунок 3.8).

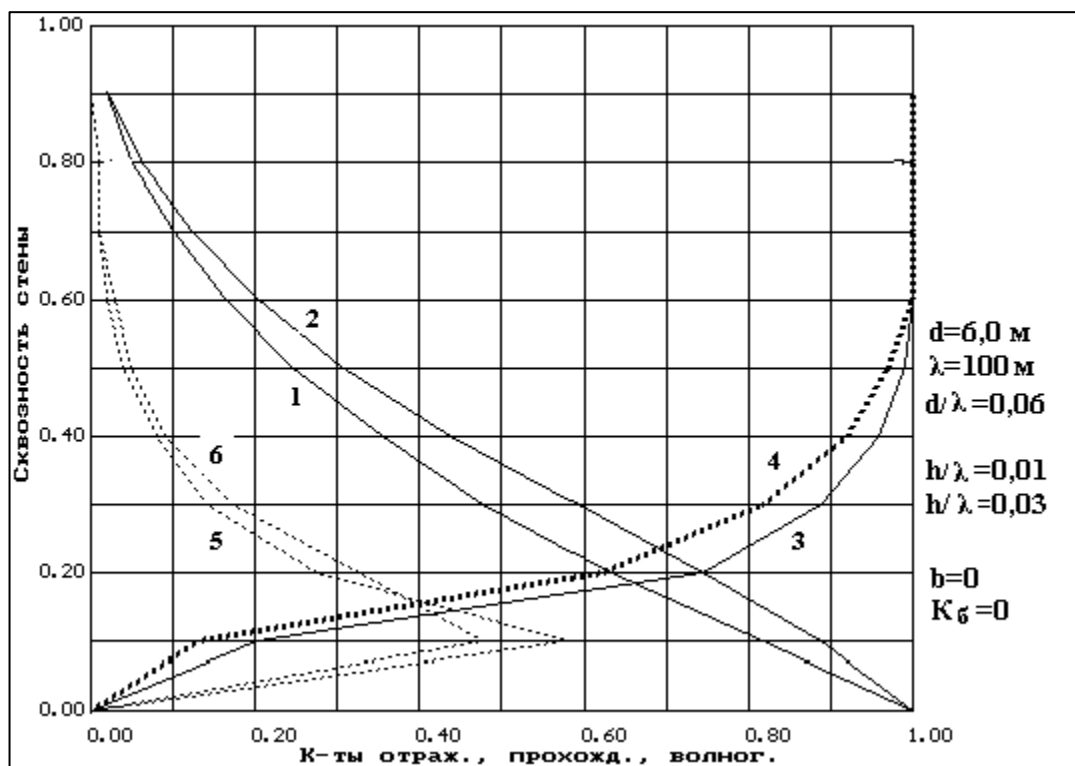


Рисунок 3.6 – Коэффициенты отражения, прохождения волн и волногашения при изменении сквозности стены и высоты волн:

- 1 – коэф-т отражения k_{ref} при $h=1 \text{ м}$, 2 – k_{ref} при $h=3 \text{ м}$,
 3 – коэф-т прохождения k_{tr} при $h=1 \text{ м}$, 4 – k_{tr} при $h=3 \text{ м}$,
 5 – коэф-т волногашения k_{dis} при $h=1 \text{ м}$, 6 – k_{dis} при $h=3 \text{ м}$

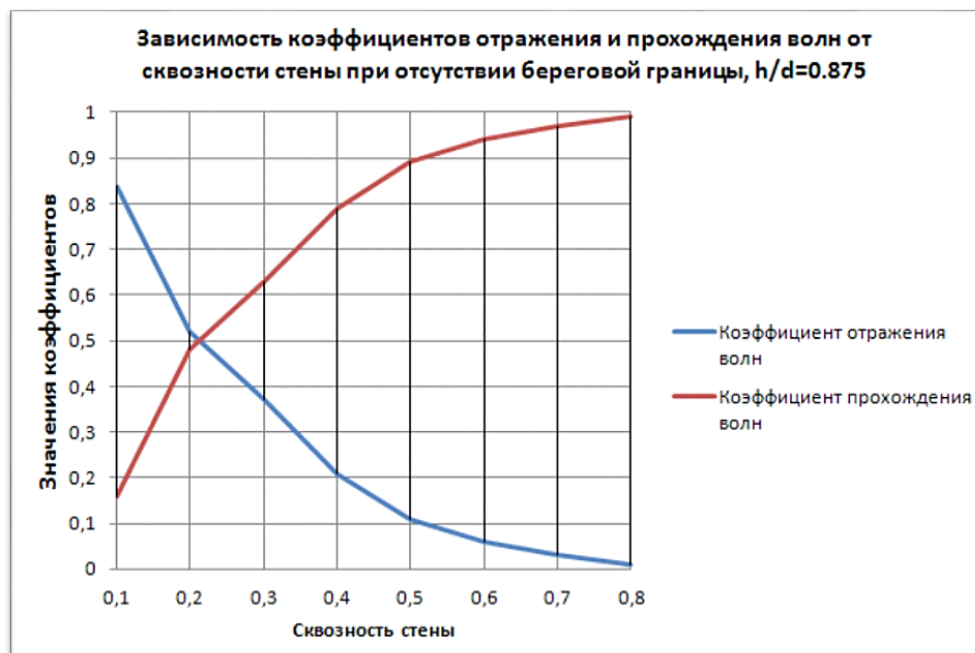


Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициентов отражения и прохождения волн от сквозности стены для сооружения без волновой камеры

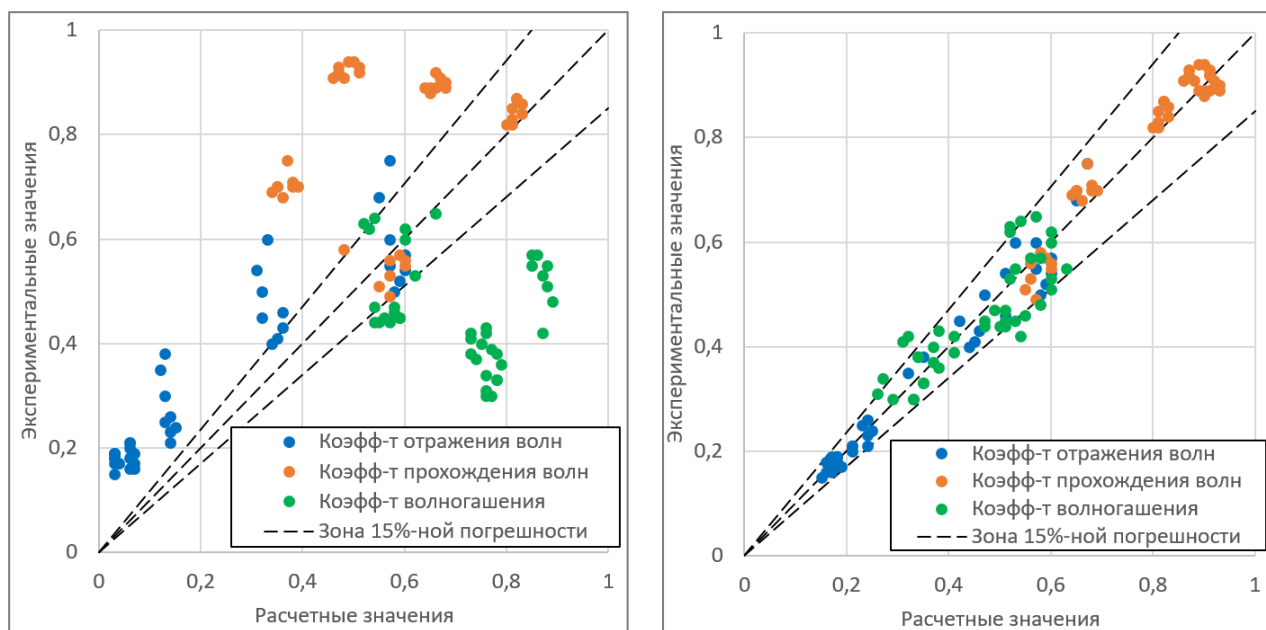


Рисунок 3.8 – Сравнение эмпирических и расчетных значений коэффициентов отражения, прохождения волн и волногашения: слева – до калибровки, справа – по откалиброванным формулам

Как видно на графиках, примененная методика расчета коэффициентов отражения и прохождения волн дает существенные расхождения с данными экспериментов. Была выполнена калибровка расчетных формул посредством введения калибровочных коэффициентов. В формулу определения коэффициента отражения введен коэффициент 0,14:

$$|k_{ref}| = \frac{\beta}{(2+\beta)} + 0,14 \quad (3.4)$$

В формулу определения k_{tr} введен коэффициент 0,16:

$$k_{tr} = \frac{2}{(2+\beta)} + 0,16 \quad (3.5)$$

Сопоставление результатов расчетов по откалиброванным формулам с данными экспериментов приведено выше (рисунок 3.8). Расхождения расчетных и

экспериментальных данных по коэффициентам отражения и прохождения волн в большинстве случаев не превышают 15%.

Выводы по главе

1. Выполнен обзор экспериментальных исследований сквозных волногасителей на гидравлических моделях.
2. Выполненные исследования показали, что сооружения по типу сквозных волногасителей показывают большую эффективность по сравнению с другими конструкциями со схожими характеристиками.
3. При равной сквозности стены от нее сильнее отражаются более крутые волны.
4. Если в качестве оптимальных условий работы сквозных стен считать равенство коэффициентов k_{ref} и k_{tr} , то наилучшим можно считать отношение ширины волновой камеры к длине волн порядка 0,08–0,10.
5. Для случая с относительной высотой волн 0,875, при отсутствии граничных условий со стороны берега, равенство коэффициентов прохождения и отражения волн наблюдается при сквозности 0,22.
6. Уменьшение эффективного объема волновой камеры приводит к увеличению коэффициента отражения и в целом – к значительному снижению волногасящих свойств сооружения и, соответственно, эффективности его работы. При недостаточном объеме волновой камеры отраженная волна всегда будет выше прошедшей.
7. Уточненные по результатам физического моделирования формулы (3.4–3.5) могут быть рекомендованы для определения коэффициентов k_{tr} и k_{ref} для сооружений без волновой камеры (при отсутствии береговой границы).
8. Необходимо более подробное изучение конструкций по типу сквозного откосно-ступенчатого волногасителя на физических моделях. Указанные конструкции, по результатам анализа выполненных ранее экспериментальных исследований, показали высокую эффективность и

выглядят перспективными для использования в оградительных сооружениях искусственных островов.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВОЗНЫХ ВОЛНОГАСИТЕЛЕЙ

4.1. Постановка задач физического моделирования

Физические гидравлические модели, как правило, используются на этапе проектирования для оптимизации параметров конструкции и обеспечения ее безопасной эксплуатации. Такие модели помогают в процессе принятия ответственных конструктивных решений. Гидравлическая модель позволяет визуализировать процесс взаимодействия ГТС с волнами до выбора подходящей конструкции [116]. Физические модели – инструменты, которые используются для (а) улучшения понимания физики прибрежных процессов, (б) проверки и оптимизации проектных решений и (в) предоставления наборов данных для улучшения численных моделей [117].

С учетом сделанных в главе 3 настоящей работы выводов, сооружения по типу сквозных конструкций в ряде случаев могут показывать бóльшую эффективность по сравнению с другими конструкциями со схожими характеристиками.

Поэтому необходимо их более подробное изучение. Это позволит, во-первых, получить более полное представление об основных их преимуществах и методике выбора основных параметров. Во-вторых – на основе выполненной работы (выполнив, таким образом, научное обоснование принятия конструктивных решений островного сооружения) дать рекомендации по проведению научного обоснования конструкций искусственных островов.

Таким образом, необходимо провести исследования на физических моделях указанных сооружений в волновом лотке в качестве примера обоснования проекта искусственного острова. В соответствии с задачами диссертационного исследования, эксперименты должны быть выполнены в объеме, достаточном для решения вопросов, возникающих при проектировании ГТС искусственных островов.

Для достижения указанных целей в первой серии опытов рассматривались различные конструкции при одинаковых волновых условиях. Для последующих серий в качестве исходной схемы сооружения выбрана конструкция, рассмотренная в [49] с последующей ее доработкой. Таким образом, сквозная откосно-ступенчатая конструкция рассмотрена, в том числе, как альтернативный вариант оградительных сооружений марины «Хомар», при проектировании которой выполнялся ряд исследований на физических моделях. Схема сооружения, рассмотренная в [49], а также схема сооружения при моделировании в рамках настоящего исследования показаны ниже (рисунки 4.1–4.2).

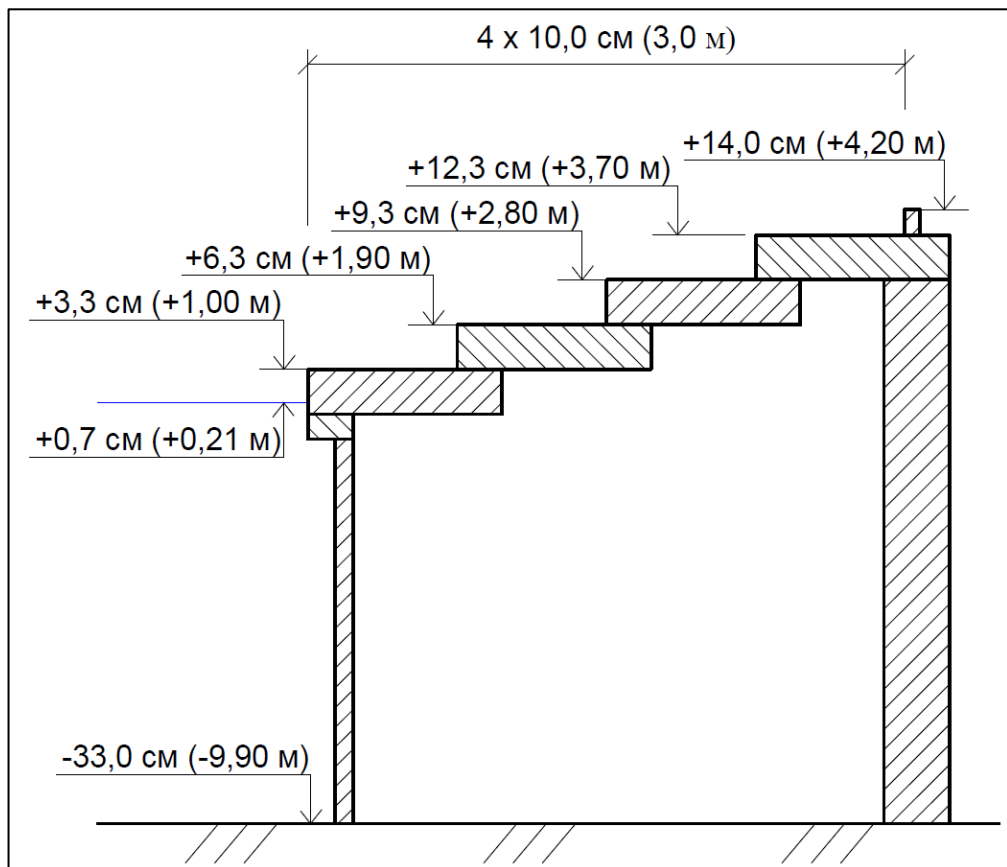


Рисунок 4.1 – Профиль оградительного сооружения марины «Хомар» в [49]

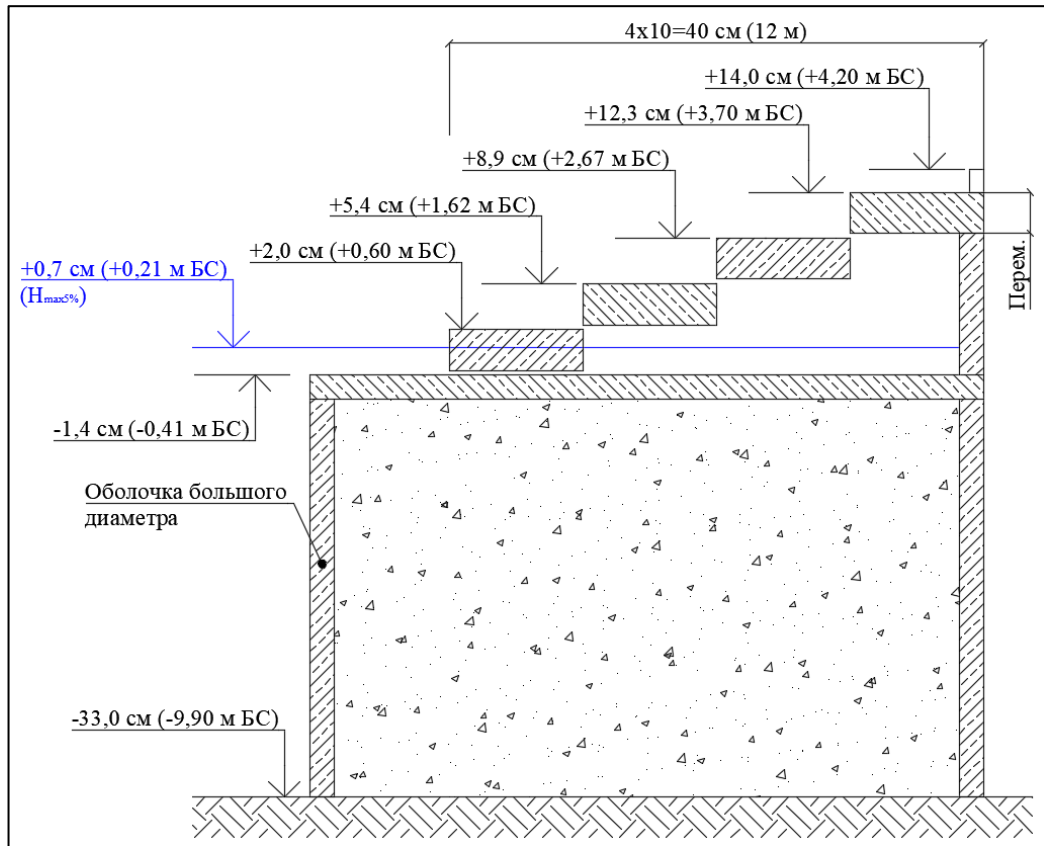


Рисунок 4.2 – Схема модели сооружения, исследуемого в волновом лотке в сериях опытов 2–4

С целью сокращения объемов работ при исследованиях на физической модели по данным [110–115] была выполнена оценка вклада различных параметров сооружения на горизонтальные волновые нагрузки P_h и на высоты волновых заплесков $h_{от}$ (рисунок 4.3).

Как видно на рисунке 4.3, наибольший вклад в эффективность работы сооружения вносят его расположение относительно линии обрушения волн, затем по убыванию – сквозность конструкции n , объем волновой камеры $V_{вк}$ и наличие дополнительного гасителя в волновой камере. Выбор положения линии кордона и уклона откосно-ступенчатой конструкции в данном случае не представляется возможным, поскольку глубина у подошвы сооружения и уклон конструкции фиксированы (рисунок 4.2). Объем волновой камеры будет изменяться в серии опытов 4, как будет показано ниже (раздел 4.5 ниже). Таким образом, в качестве изменяемых параметров сооружения выбраны сквозность откосно-ступенчатой части и объем волновой камеры.

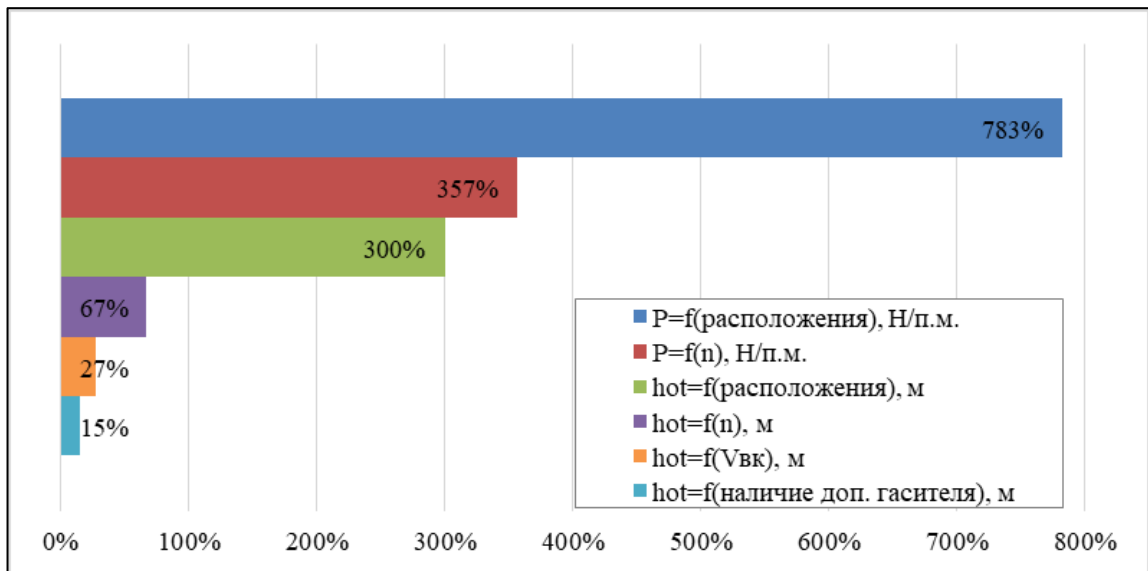


Рисунок 4.3 – График влияния различных параметров сквозного откосно-ступенчатого волногасителя на показатели эффективности работы. Сверху вниз: изменение волнового давления P при изменении места расположения сооружения относительно места обрушения волн и при изменении сквозности n ; изменение высоты волновых заплесков h_{ot} при изменении места расположения сооружения, сквозности n , объема волновой камеры $V_{\text{вк}}$ и заполнения волновой камеры дополнительными волногасящими элементами

Эксперименты проведены на физических моделях ГТС в волновом лотке лаборатории «Научно-исследовательского центра «Морские берега» в г. Сочи. В основе методики исследований лежат положения теории подобия, согласно которой гидравлическая модель сооружения должна максимально достоверно воспроизводить поведение реального объекта [118–120].

При этом должны соблюдаться

- геометрическое подобие модели натурному объекту;
- подобие волновых режимов;
- подобие поверхностных сил;
- подобие объемных сил.

Важно отметить, что одновременно выполнить все указанные условия на практике не представляется возможным. Однако для решения ряда инженерных задач, полное подобие модели натурному объекту не требуется [108].

Также в основе методики исследований лежит принцип сопоставимости результатов, получаемых при одинаковых начальных и граничных условиях проведения экспериментов, что позволяет исключить при сопоставительном анализе экспериментальных данных влияние факторов, которые по каким-то причинам невозможно смоделировать с достаточной точностью.

При воздействии на сооружение не обрушающихся волн (при низком влиянии вязкости), динамическое подобие модели натурному объекту характеризуется равенством чисел Фруда. Критерий Фруда при изучении поверхностных волн в случае несжимаемой жидкости можно выразить следующим образом:

$$Fr = \frac{h}{gT^2}, \quad (2.1)$$

где h – высота воздействующих волн; g – ускорение свободного падения; T – средний период волн.

Образование требуемых для моделирования волн достигается подбором соответствующего режима волнения, осуществляемого специальной волнопроизводящей установкой (волнопродуктором), обеспечивающей подобие воспроизводимых на модели волн волнам, рассчитанным по специальным методикам, опираясь на результаты статистической обработки натуральных наблюдений. Волнопродуктор расположен у одной из торцевых стенок волнового лотка (рисунок 4.4).

Для исключения влияния на волновые условия сооружений, волновые режимы подбирались до начала строительства моделей. Параметры волн определялись с применением емкостных волнографов, нагрузки на модель сооружения определялись с использованием измерительных преобразователей давления. Измерительный комплекс включал также персональный компьютер, секундомер, измерительную рулетку, измерительные линейки. Независимая проверка периода волн выполнялась с применением секундомера, и методом цифровой фото– и видеосъемки.

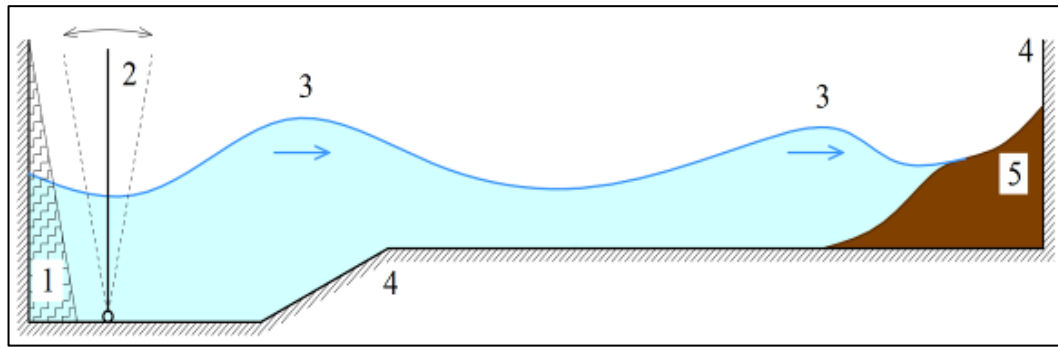


Рисунок 4.4 – Схема волнового лотка:

1 – волногаситель; 2 – щитовой волнопродуктор; 3 – волна;
4 – стенка лотка; 5 – модель

Тарировку датчиков выполняли до начала и после измерений. Погрешности измерений составили менее 5%, абсолютные погрешности при измерении высот волн не превышали ± 2 мм, а периодов – $\pm 0,1$ с. Для исключения ошибок при подборе волнового режима в дальней от волнопродуктора торцевой части лотка устраивалась волногасящая берма. Для каждого из опытов проводилось не менее трех реализаций.

Отметка дна перед сооружением воспроизводилась геометрически подобной натурному дну. В качестве расчетного уровня моря принята отметка, соответствующая отметке 5 % обеспеченности из максимальных годовых, которая составила $H_{\max 5\%} = +0,21$ м БС (здесь и далее по тексту все отметки даются в Балтийской системе высот).

Исходя из геометрических характеристик исследуемой конструкции, геометрический масштаб модели для опытов в сериях 1–3 в волновом лотке принят равным:

$$m_\ell = 1: 30. \quad (4.2)$$

При проведении опытов в волновом лотке контролировались следующие параметры:

- высота наката волн на сооружения;
- придонные скорости перед сооружением;
- наличие заплесков/переливов через сооружение;

- волновое давление на сооружение под действием расчетных волн;
- коэффициенты отражения и волногашения.

Всего в волновом лотке было проведено четыре серии опытов:

- первая серия опытов – рассмотрение различных конструкций при одинаковых волновых условиях для их сравнения (таблица 4.1);
- вторая серия опытов – откосно-ступенчатая конструкция (рисунок 4.2). В опытах серии изменялась длина волн, воздействующих на конструкцию. Опыты проводились для пяти волновых режимов (раздел 4.3);
- третья серия опытов – откосно-ступенчатая конструкция (рисунок 4.2). В опытах серии изменялась сквозность конструкции;
- четвертая серия опытов – откосно-ступенчатая конструкция (рисунок 4.2). В опытах серии менялся объем волновой камеры (раздел 4.5).

Для каждого из опытов проводилось не менее трех реализаций. Характеристики моделей и параметры волнения в экспериментах представлены ниже (таблица 4.1).

4.2. Первая серия опытов. Сопоставление эффективности работы различных конструкций

В первой серии, состоящей из шестнадцати опытов, исследовалось взаимодействие волн с сооружениями для сопоставления эффективности их работы:

- опыты 1–2 – вертикальная трубошпунтовая стенка с оголовком из монолитного железобетона;
- опыты 3–5 – сооружение с волновой камерой шириной 2,6 м (сквозная морская свайная стена со сквозностью 0,18, прикрывающая вертикальную непроницаемую трубошпунтовую стену. Обе стены поверху омоноличены железобетоном);

Таблица 4.1 – Характеристики моделей и параметры волнения в экспериментах

Серия	№ опыта	Сооружение	Масштаб	Параметры волн			УМ H_{\max} /обеспеченность уровня моря
				Высота $h_1\%$	Длина $\bar{\lambda}$	Средний период \bar{T}	
1	1	Вертикальная стенка	1:30	6,2 см (1,85 м)**	3 м (90 м)	1,64 с (9,0 с)	+0,4 см (+0,13 м БС)/5%
	2				4,2 м (126 м)	1,94 с (10,6 с)	
	3	То же со сквозной стеной $n=0,18^*$			2,4 м (72 м)	1,46 с (8,0 с)	
	4				3 м (90 м)	1,64 с (9,0 с)	
	5	То же, $n=0,09$			4,2 м (126 м)	1,94 с (10,6 с)	
	6				2,4 м (72 м)	1,46 с (8,0 с)	
	7	То же без экранов			3 м (90 м)	1,64 с (9,0 с)	
	8				2,4 м (72 м)	1,46 с (8,0 с)	
	9	То же с более широкой волновой камерой			3 м (90 м)	1,64 с (9,0 с)	
	10				4,2 м (126 м)	1,94 с (10,6 с)	
	11	Откосно-ступенчатая сквозная конструкция			2,4 м (72 м)	1,46 с (8,0 с)	
	12				3 м (90 м)	1,64 с (9,0 с)	
	13				4,2 м (126 м)	1,94 с (10,6 с)	
	14				2,4 м (72 м)	1,46 с (8,0 с)	
	15				3 м (90 м)	1,64 с (9,0 с)	
	16				4,2 м (126 м)	1,94 с (10,6 с)	
2	17	Откосно-ступенчатая конструкция (изменение волнового режима)	1:30	20,0 см (6,0 м)	3,2 м (96 м)	1,79 с (9,8 с)	+0,7 см (+0,21 м БС)/5%
	18				3,1 м (91,5 м)	1,67 с (9,1 с)	
	19				2,8 м (84 м)	1,53 с (8,4 с)	
	20				2,5 м (75 м)	1,39 с (7,6 с)	
	21				2,2 м (66 м)	1,22 с (6,7 с)	
3	22	Откосно-ступенчатая конструкция (изменение n)	1:30	20,0 см (6,0 м)	3,2 м (96 м)	1,79 с (9,8 с)	+0,7 см (+0,21 м БС)/5%
	23						
	24						
	25						
	26						
4	27	Откосно-ступенчатая конструкция (изменение $V_{\text{вк}}^{***}$)	1:30	20,0 см (6,0 м)	3,2 м (96 м)	1,79 с (9,8 с)	+0,7 см (+0,21 м БС)/5%
	28		1:35	17,1 см (6,0 м)	2,7 м (96 м)	1,66 с (9,8 с)	+0,6 см (+0,21 м БС)/5%
	29		1:45	13,3 см (6,0 м)	2,1 м (96 м)	1,46 с (9,8 с)	+0,5 см (+0,21 м БС)/5%

* – n – сквозность конструкции;
** – здесь и далее в скобках – величины, соответствующие натурным данным;
*** – $V_{\text{вк}}$ – объем волновой камеры.

- опыты 6, 7 – то же, что в опытах 3–5, проницаемость сквозной стены снижена до 0,09;
- опыты 8–10 – то же, что в опытах 6, 7, но без вертикальных экранов в верхней части сквозной стены с морской и тыльной сторон;
- опыты 11–13 – то же, что в опытах 8–10, но с увеличенной шириной волновой камеры;
- опыты 14–16 – сквозная откосно-ступенчатая конструкция.

Модели исследуемых сооружений показаны ниже (рисунки 4.5–4.6).

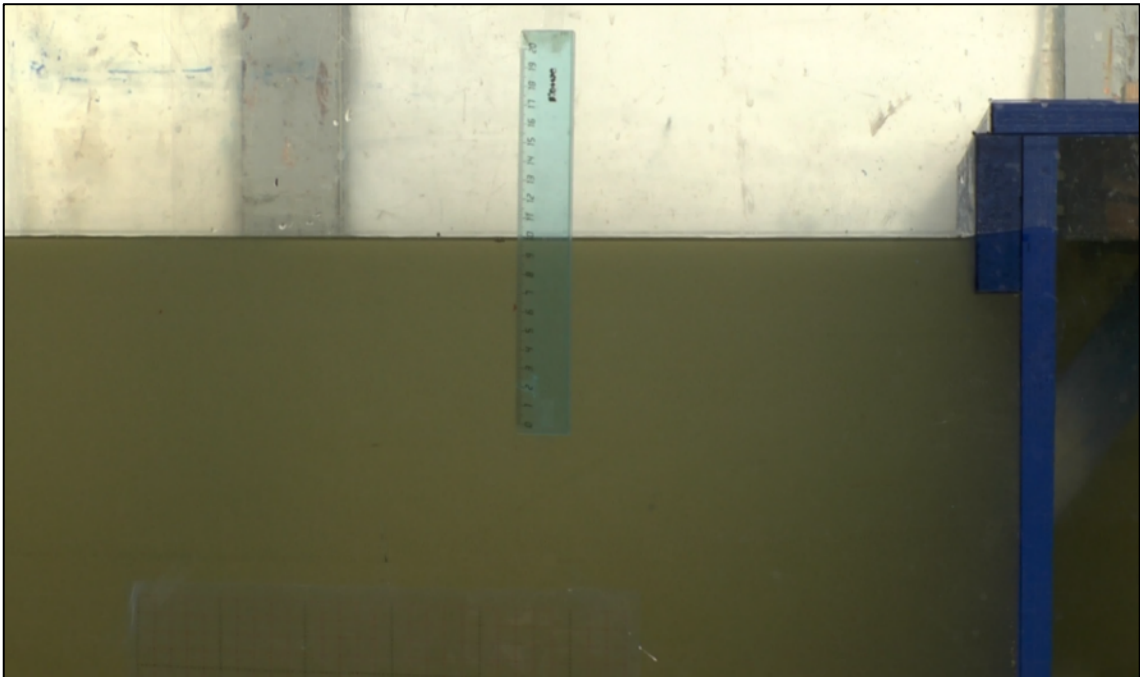
Результаты, полученные по итогам опытов первой серии, приведены ниже (таблица 4.2).

По результатам опытов первой серии можно сделать ряд выводов:

1. Расчетные волны достаточно пологие, поэтому накат на сооружение происходит в виде резкого поднятия уровня воды, без обрушений и ударов.
2. Волна в момент наката находится на грани перелива. При увеличении длины волн до $1,4\lambda$ (126 м) в ряде опытов появляется небольшой перелив (таблица 4.2). Устройство сквозной стены перед непроницаемой вертикальной стеной не оказали значительного влияния на высоту наката волн и переливы через верх сооружения. В свою очередь, увеличение ширины волновой камеры позволяет наблюдать снижение коэффициентов отражения в пользу коэффициентов волногашения, а также наблюдается заметное снижение придонных скоростей (сравнение результатов опытов 11–13 и 8–10, таблица 4.2) и значительное снижение горизонтальных волновых нагрузок.
3. Коэффициенты отражения в опытах 1–10 оказались близкими к единице, что соответствует характеру работы непроницаемых вертикальных стен. Устройство широкой волновой камеры в опытах 11–13 или сквозной откосно-ступенчатой конструкции в опытах 14–16 позволили добиться высокой эффективности работы волновых камер в указанных опытах:

наблюдается снижение коэффициентов отражения в пользу коэффициентов волногашения.

а)



б)

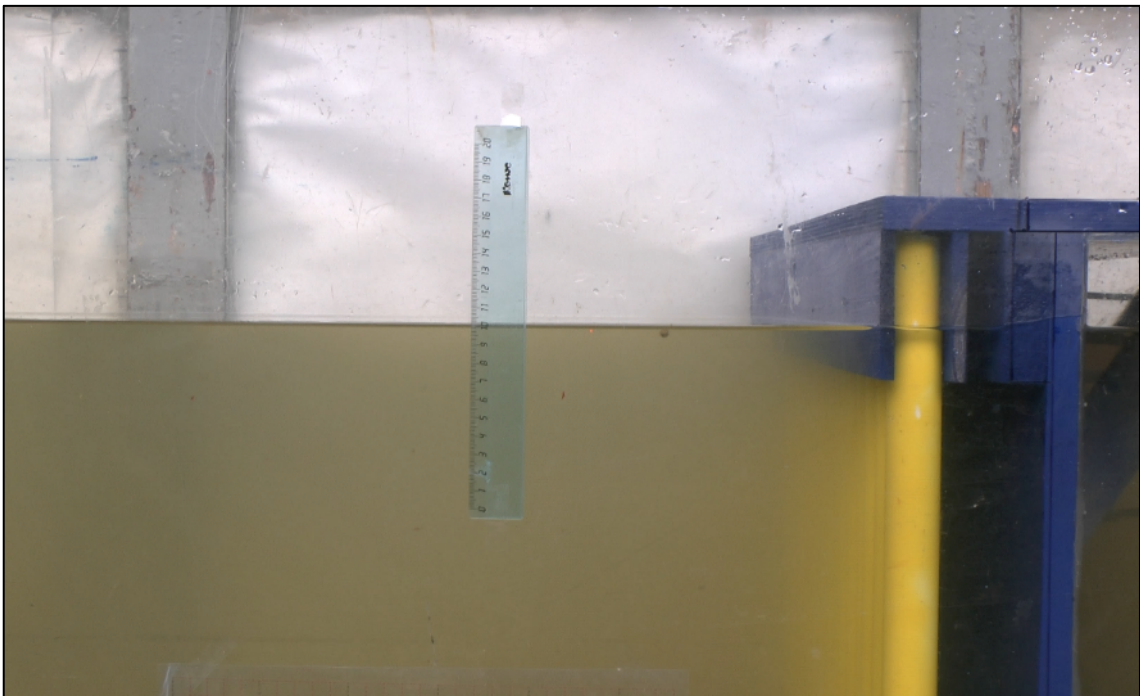


Рисунок 4.5 – Вид моделей до начала опытов первой серии при расчетном уровне моря: а – в опытах 1, 2, б – в опытах 3–7

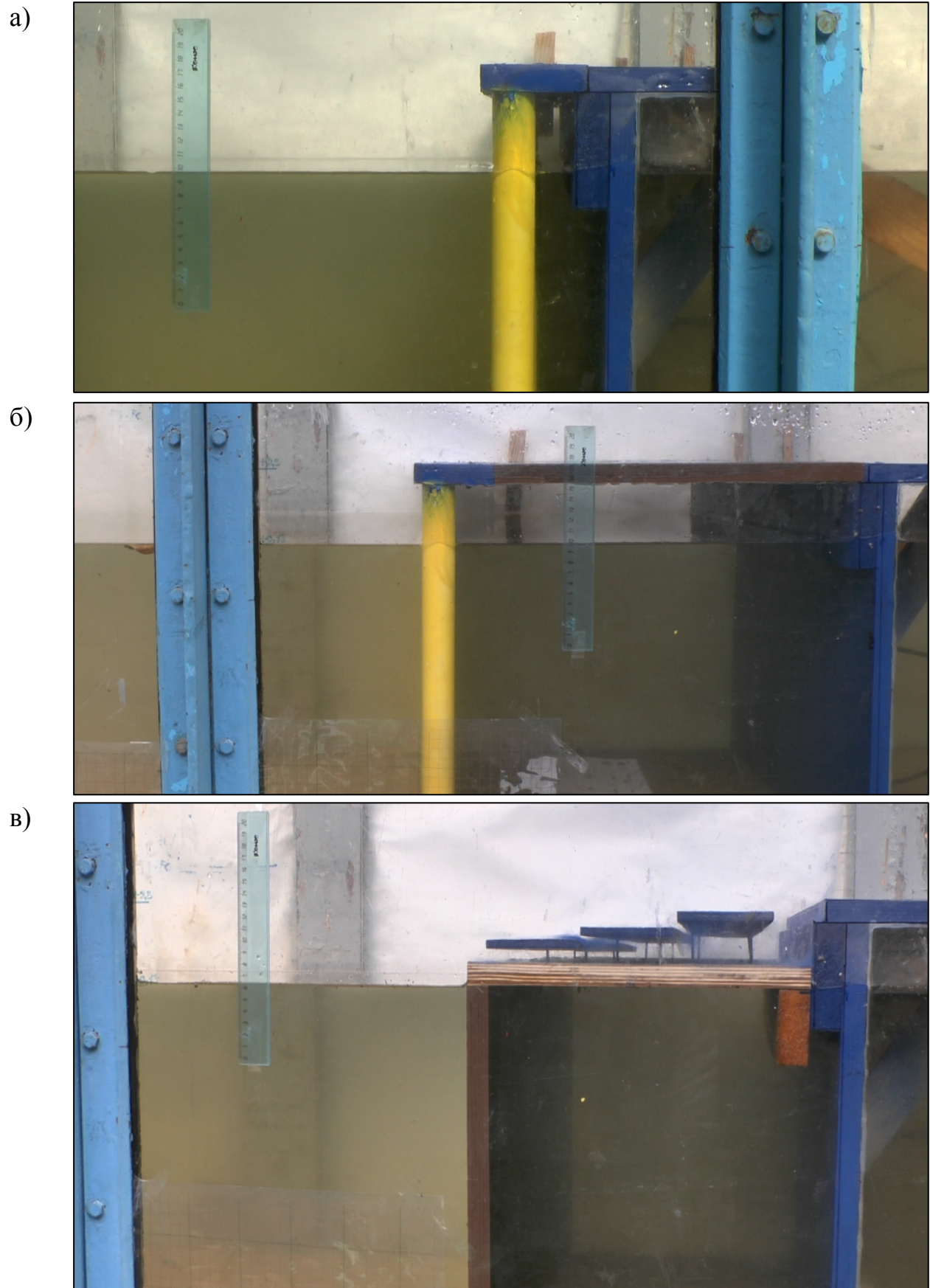


Рисунок 4.6 – Вид моделей до начала опытов первой серии при расчетном уровне моря: а – в опытах 8–10, б – в опытах 11–13, в – в опытах 14–16

Таблица 4.2 – Результаты опытов первой серии (в натуральных величинах)

Описание конструкции	Опыт №	Длина волн, м	Высота наката волн, м БС	Перелив	k_{ref}	k_{dis}	$V_{дон}$, м/с	Нагрузка, тс / п. м.
Непроницаемая вертикальная стенка	1	90	2,16	нет	0,98	0,222	0,71	16,6
	2	126	2,64	есть	0,99	0,148	0,76	19,6
То же со сквозной стеной, сквозность 0,18	3	72	2,04	нет	0,95	0,303	0,58	16,2
	4	90	2,1	нет	0,98	0,178	0,56	16,4
	5	126	2,58	есть	0,98	0,178	0,63	18,3
То же, сквозность 0,09	6	90	2,06	нет	0,91	0,401	0,74	–
	7	126	2,1	нет	0,93	0,366	0,76	–
То же, без экранов	8	72	2,0	нет	0,90	0,438	0,73	14,6
	9	90	2,08	нет	0,92	0,387	0,71	15,3
	10	126	2,74	есть	0,94	0,341	0,77	22,1
То же с более широкой волновой камерой	11	72	1,94	нет	0,86	0,51	0,67	6,1
	12	90	1,86	нет	0,66	0,75	0,66	5,9
	13	126	1,26	нет	0,13	0,99	0,56	5,5
Сквозная откосно-ступенчатая конструкция	14	72	2,17	на грани	0,72	0,69	0,93	5,2
	15	90	2,11	нет	0,64	0,77	0,82	5,1
	16	126	1,85	нет	0,48	0,88	0,74	3,2

4. Волновые нагрузки на конструкции в опытах 1–10 остаются условно неизменными: устройство сквозной конструкции с узкой волновой камерой в опытах 3–5 позволяет незначительно снизить воспринимаемые нагрузки по сравнению с опытами 1–2, однако, решающим фактором для обоих вариантов конструкции является высота наката ветровых волн на сооружение.

5. При сравнении конструкции с широкой волновой камерой (опыты 11–13) со сквозной откосно–ступенчатой конструкцией (опыты 14–16) можно отметить, что в последнем случае коэффициенты работы сооружения представляются более близкими к оптимальным, нагрузки на сооружение снизились, придонные скорости остались в зоне допустимых значений, переливов через верх сооружения не наблюдается.
6. Таким образом, можно отметить высокую эффективность работы сквозных сооружений с волновой камерой и, особенно – сквозных откосно–ступенчатых волногасителей, которые будут более подробно рассмотрены в последующих опытах.

4.3. Вторая серия опытов. Откосно-ступенчатая конструкция – изменение параметров ветровых волн

Во второй серии, состоящей из пяти опытов, исследовался характер и количественные показатели взаимодействия расчетных волн со сквозной откосно-ступенчатой конструкцией в зависимости от длины ветровых волн.

Конструкция ГТС показана выше (рисунок 4.2). Сооружение представлено оболочкой большого диаметра с отметкой верха $-1,4$ см ($-0,41$ м БС), на которой установлена сквозная (проницаемая) откосно–ступенчатая конструкция с отметкой верха $+14,0$ см ($+4,2$ м БС). Высота одной ступени составляла $3,1$ см ($0,92$ м), а ее ширина $-10,0$ см ($3,0$ м). Ширина сооружения составляла $50,4$ см ($15,1$ м). Опыты второй серии проводились для пяти волновых режимов (таблица 4.1).

Вид модели до начала экспериментов показан на рисунке 4.7, во время эксперимента – на рисунке 4.8. Результаты опытов 17–21 второй серии приведены ниже (таблица 4.3).



Рисунок 4.7 – Серия №2. Опыт №17. Вид модели до начала опыта

По результатам опытов второй серии можно сделать ряд выводов. В первую очередь, отмечается недостаточность сквозности сооружения: в волновой камере отмечается попеременное повышение и понижение уровня воды по мере откатов и накатов волн. Другими словами, волнения в волновой камере не наблюдается. Также наблюдались значительные переливы через верх сооружения. В последующих опытах (в опытах третьей серии) сквозность будет увеличена и по результатам опытов можно будет сделать выводы о влиянии сквозности на эффективность работы сооружения и о достаточности объема волновой камеры $V_{\text{вк}}$.

Придонные скорости с уменьшением длины волн при неизменной высоте волн заметно растут (таблица 4.3).

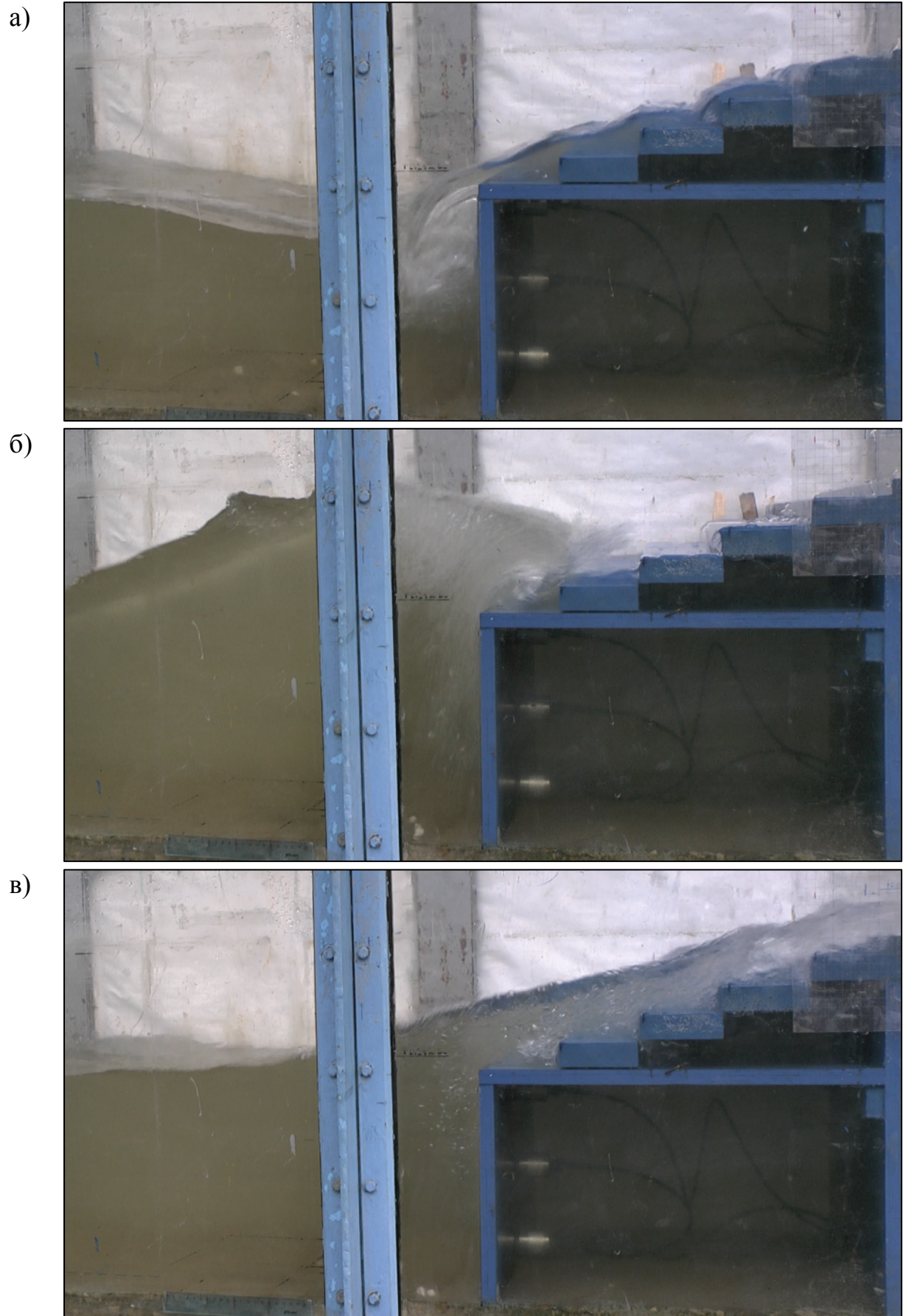


Рисунок 4.8 – Серия №2. Опыт №17. Вид модели во время опыта:
а) откат волны; б) подход волны; в) накат волны

Таблица 4.3 – Результаты опытов второй серии (в натуральных величинах)

Серия опытов и описание конструкции	№ опыта	Длина волн λ , м	Высота волн h , м	Период волн, с	λ/h	k_{ref}	k_{dis}	$V_{дон}$, м/с	Нагрузка, тс / п. м.
Серия 2. Откосно-ступенчатая конструкция. $n=0,1$	17	96	6,0	9,8	16	0,54	0,84	1,41	34,7
	18	91,5	6,0	9,1	15,3	0,41	0,91	1,43	33,2
	19	84	6,0	8,4	14	0,33	0,94	1,45	32,7
	20	75	6,0	7,6	12,5	0,27	0,96	1,55	28,6
	21	66	6,0	6,7	11	0,25	0,97	1,63	26,5

Горизонтальные волновые нагрузки на сооружение при уменьшении длины волн существенно снижаются (таблица 4.3). Отмечается значительное увеличение эффективности работы конструкции в сравнении с вертикальной стеной, имеющей те же отметки верха и дна перед сооружением: нагрузки в первом случае ниже на 33–39 % (рисунок 4.9). Как видно на графике, прирост эффективности работы рассматриваемой конструкции в сравнении с вертикальной стеной снижается при уменьшении длины волн. Ниже приведена зависимость измеренных и расчетных (для вертикальной стены) горизонтальных волновых нагрузок от соотношения длины волн к их высоте (λ/h) (рисунок 4.10). Экстраполяция для расчетных значений в случае сплошной вертикальной стены показывает строгую линейную зависимость, а для измеренных значений на модели сквозной откосно-ступенчатой конструкции отмечается степенной характер зависимости. Таким образом, максимальная эффективность работы сквозных откосно-ступенчатых волногасителей в сравнении с вертикальной непроницаемой стеной наблюдается при больших длинах волн.

Ниже показаны эпюры горизонтального волнового давления на исследуемую конструкцию (рисунок 4.11).

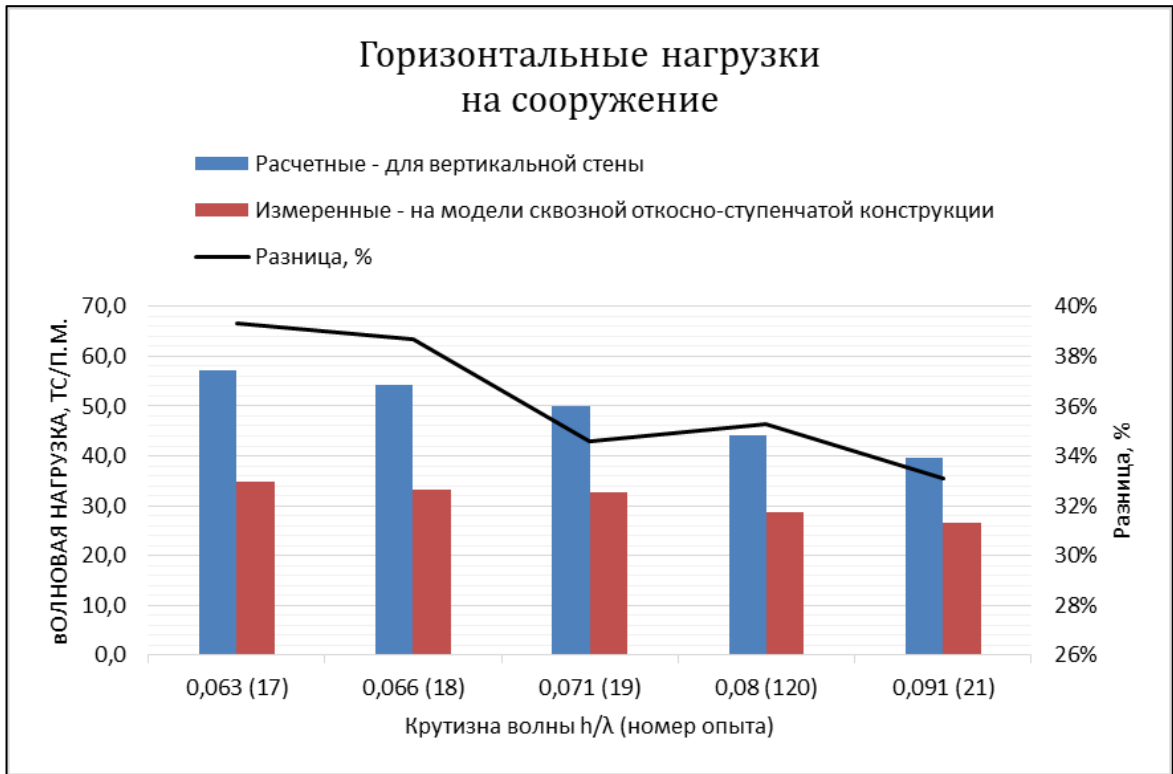


Рисунок 4.9 – Серия опытов №2. Волновые нагрузки – измеренные для откосно-ступенчатой конструкции и расчетные для непроницаемой вертикальной стены с идентичными отметками при изменении крутизны волн

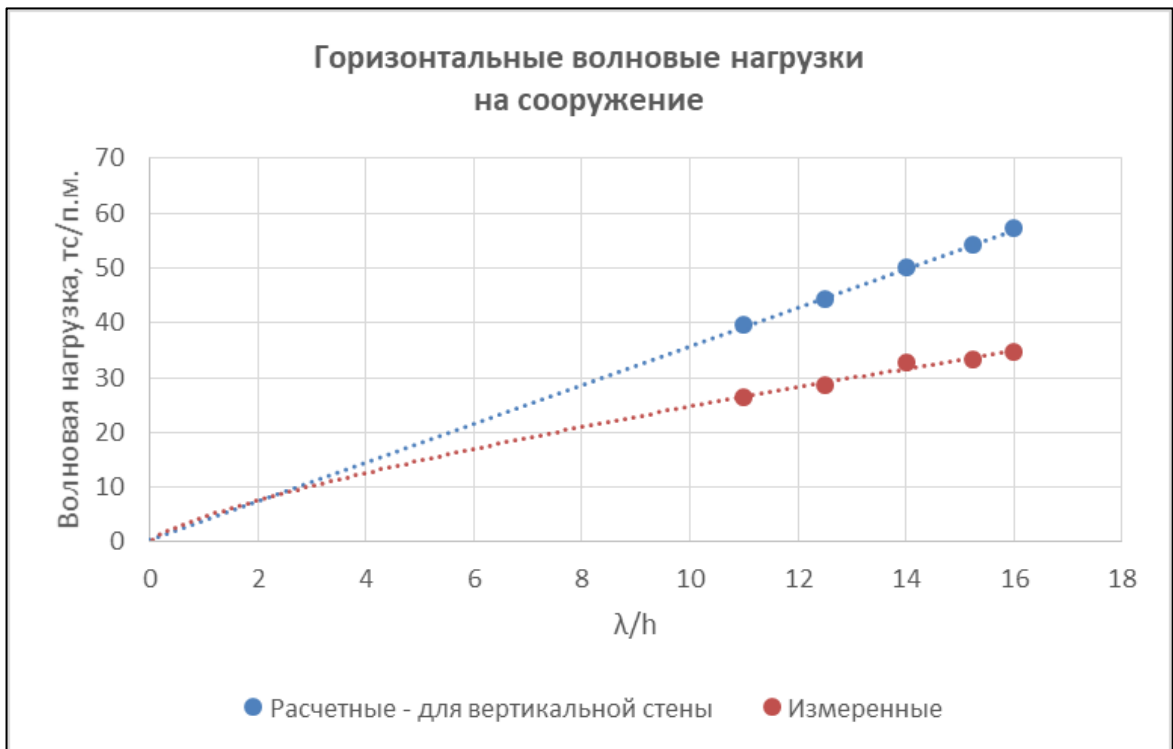


Рисунок 4.10 – Серия №2. Волновые нагрузки – измеренные для откосно-ступенчатой конструкции и расчетные для непроницаемой вертикальной стены с идентичными отметками в зависимости от λ/h

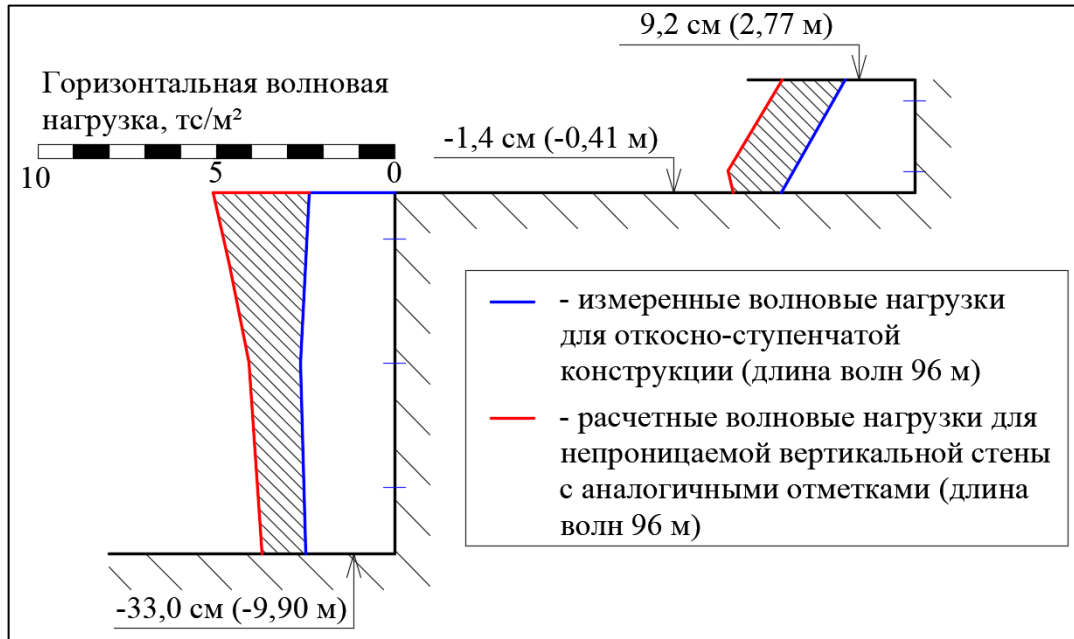


Рисунок 4.11 – Серия №2. Опыт №17. Эпюры горизонтального волнового давления при накате волн (по данным замеров на физической модели откосно-ступенчатой конструкции и расчетная – для вертикальной непроницаемой стены).

Штриховкой показана разница в волновых нагрузках, воспринимаемых указанными конструкциями

Как видно на рисунке 4.11, снижение нагрузок при переходе от расчетного случая со сплошной вертикальной стеной к сквозной откосно-ступенчатой конструкции по высоте сооружения распределяется неравномерно. Наибольшее снижение волнового давления наблюдается в верхней части непроницаемой стенки последней. Кроме того, если сравнивать эпюры волновых нагрузок при воздействии коротких (66 м) и длинных (96 м) волн, то снова можно наблюдать неравномерное распределение разницы нагрузок (рисунок 4.12).

На рисунке видно, что в области около верха вертикальной непроницаемой оболочки (отметка $-0,41$ м) при сравнении замеров в опытах №17 и №22 второй серии давление не только не снижается, но даже немного возрастает. В то же время суммарная нагрузка снижается на 24 % (с 34,7 до 26,5 тс/п. м., таблица 4.3). Это связано, судя по всему, с понижением отметок профиля расчетных волн при снижении их длины.

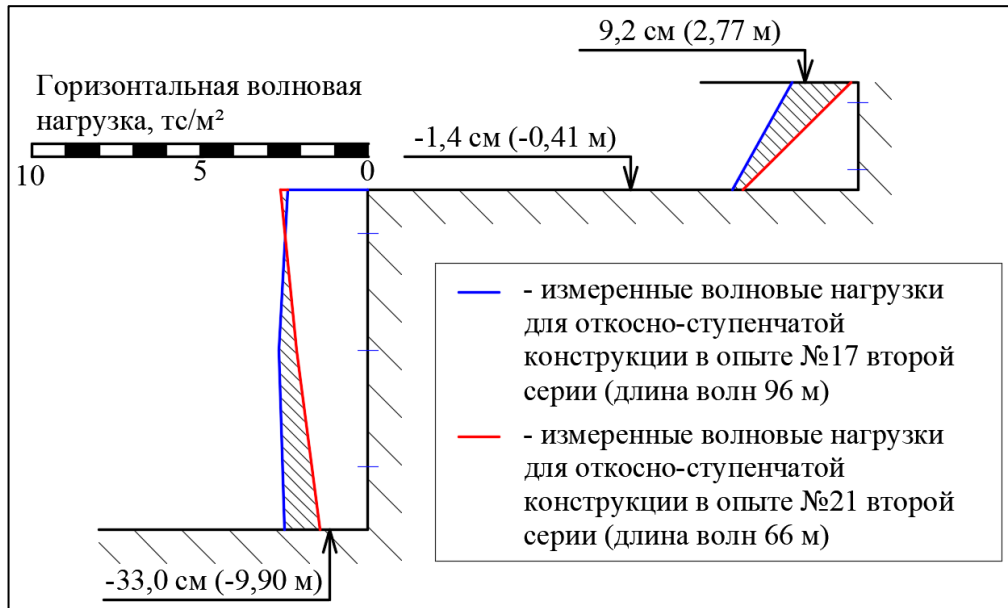


Рисунок 4.12 – Серия №2. Опыты №17 и №21. Эпюры горизонтального волнового давления при накате волн по данным замеров на физической модели откосно-ступенчатой конструкции при длине волн 96 м и 66 м соответственно. Штриховкой показана разница в волновых нагрузках, воспринимаемых конструкциями

Ниже показано изменение указанных отметок при снижении длины волн (рисунок 4.13): расчет выполнен для стоячих волн при воздействии на вертикальную непроницаемую стену. Как видно на рисунке, равнодействующая горизонтального волнового давления находится ниже для более коротких волн, что хорошо согласуется с нормативными гистограммами, приведенными в [11] (рисунок 4.14). Таким образом, в случае более длинных волн целесообразно повышать отметку непроницаемой части сооружения для повышения коэффициента отражения, но при этом необходимо обосновывать такие решения численными расчетами и (или) результатами гидравлического моделирования с проверкой соблюдения требуемых волновых нагрузок, воспринимаемых сооружением и объема волновой камеры, требуемого для эффективной работы сооружения.

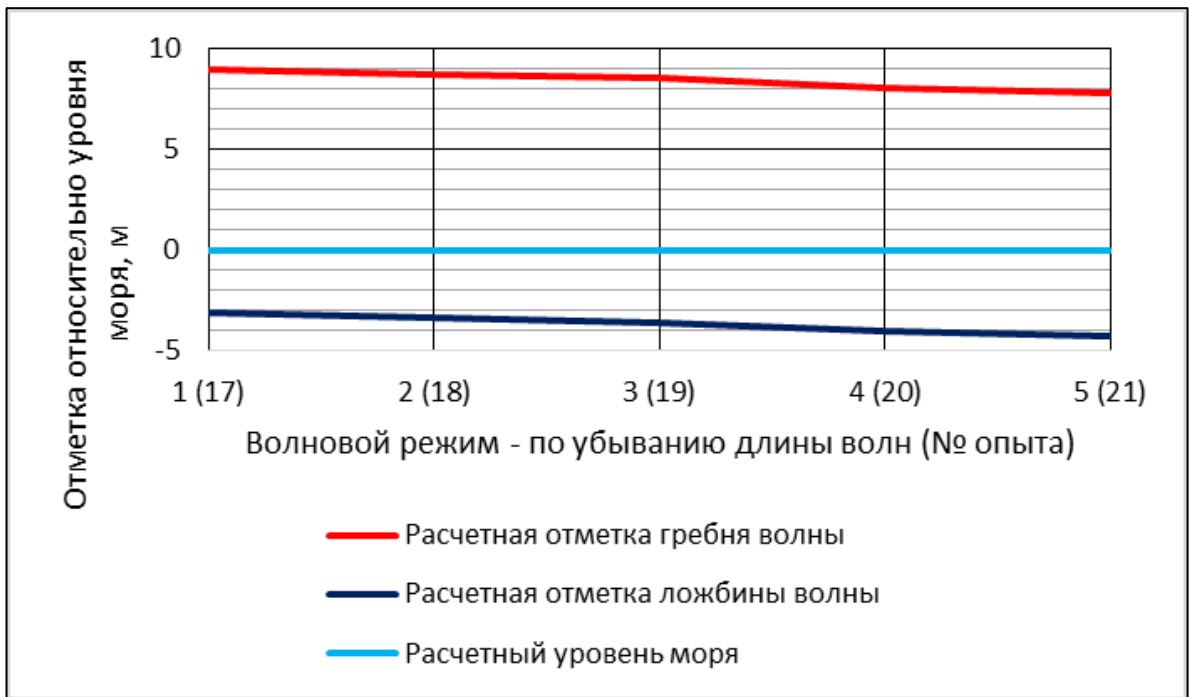


Рисунок 4.13 – Серия №2. Изменение отметок профиля стоячих волн – расчет для непроницаемой вертикальной стены

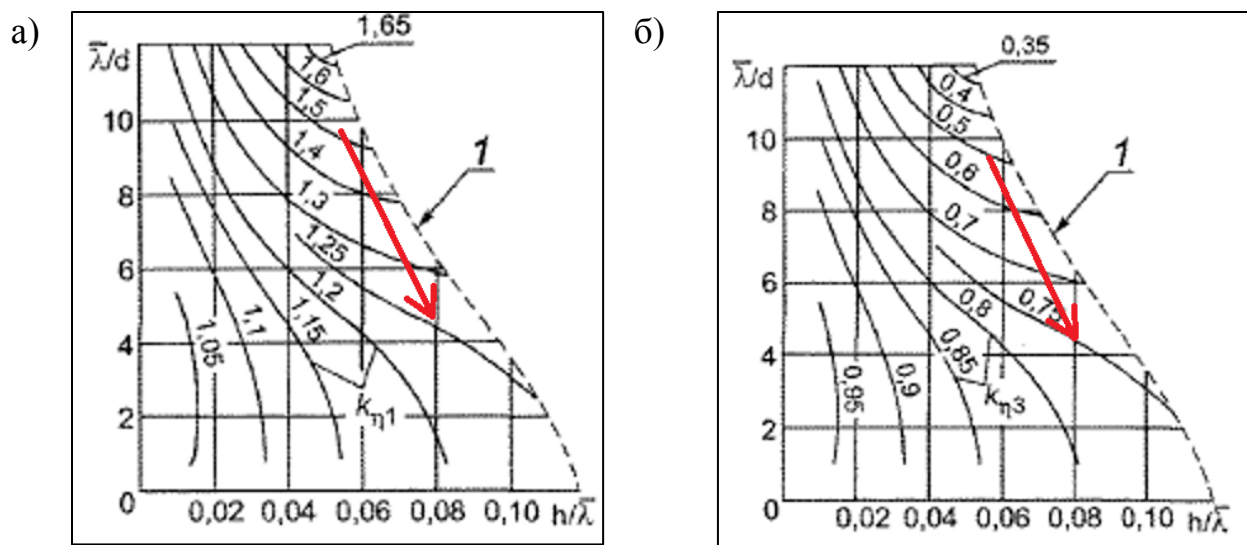


Рисунок 4.14 – Графики коэффициентов для определения отметок свободной волновой поверхности при воздействии волн на вертикальную стену [11]. Красными стрелками схематично показано изменение расчетных коэффициентов при снижении длины волн:
а – при накате волн; б – при откате волн

Также на эпюрах волнового давления отмечается, что на эпюрах второй серии опытов наблюдаются вертикальные волновые нагрузки на нижнюю грань верхней горизонтальной ступени (на отметке +2,77 м БС, рисунок 4.11). В то же

время, на кадрах видеосъемки видно, что при накате расчетной волны на тыльную стенку сооружения взволнованная поверхность в волновой камере не поднимается до указанной отметки (рисунок 4.15). Это может быть связано с тем, что эпюра давления в верхней части сооружения имеет нелинейное очертание, в то время как измеренная эпюра была построена по данным с двух датчиков давления (рисунок 4.16) и, соответственно, при построении получила линейный вид. С учетом вышесказанного, в дальнейших опытах в верхней части сооружения будет размещено не менее 3-х датчиков давления для более детального построения эпюр.

Ниже представлен график зависимости коэффициентов отражения k_{ref} и волногашения k_{dis} от крутизны волн (рисунок 4.17).

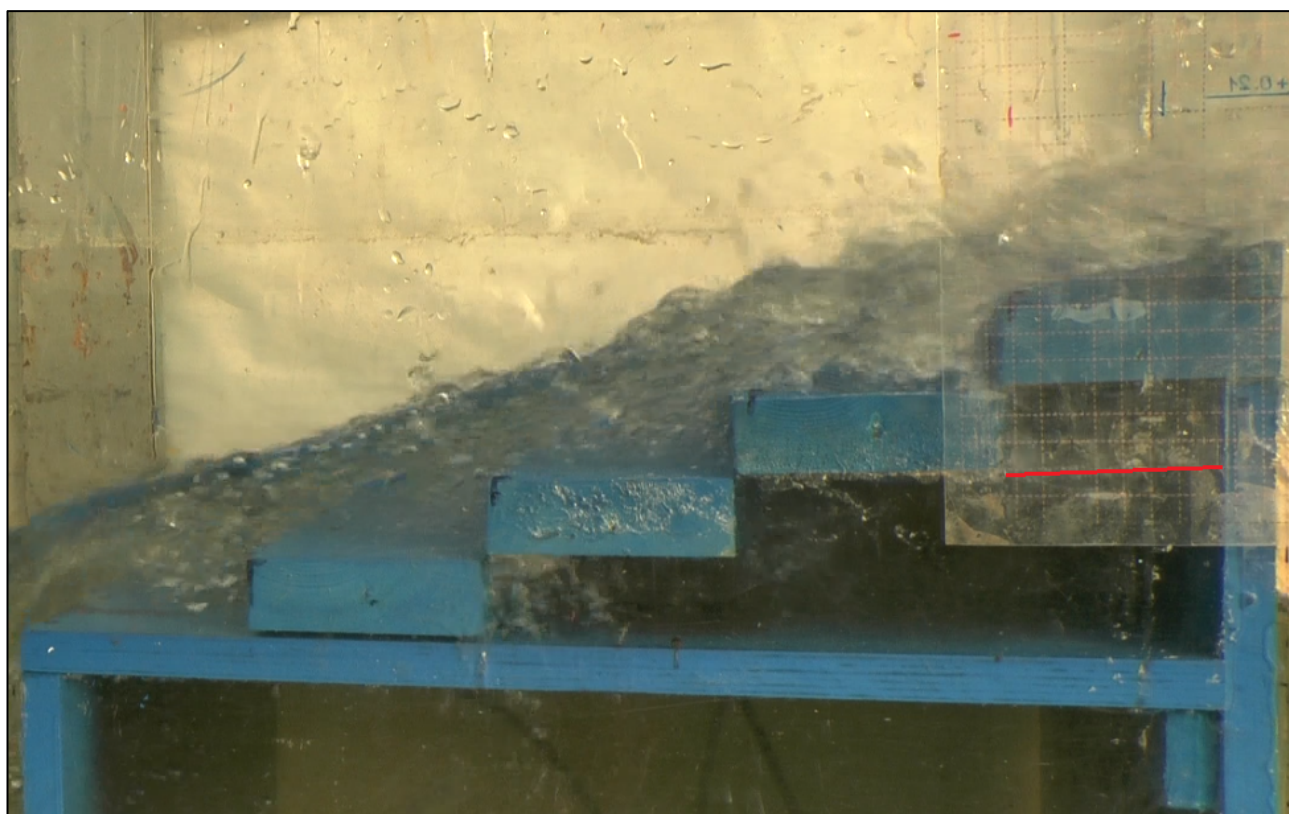


Рисунок 4.15 – Отметка волновой поверхности в волновой камере (показана красной линией)

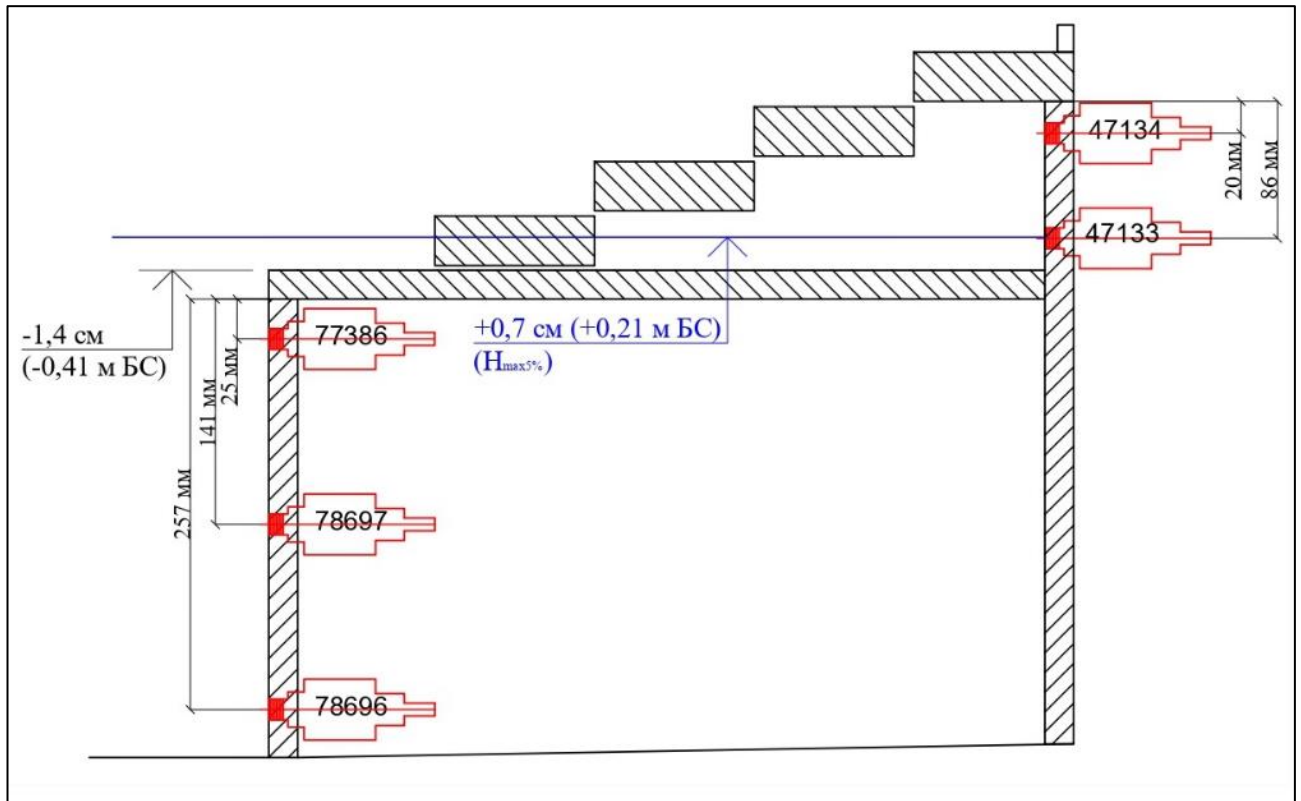


Рисунок 4.16 – Схема расположения датчиков давления в опыте №17 серии опытов №2

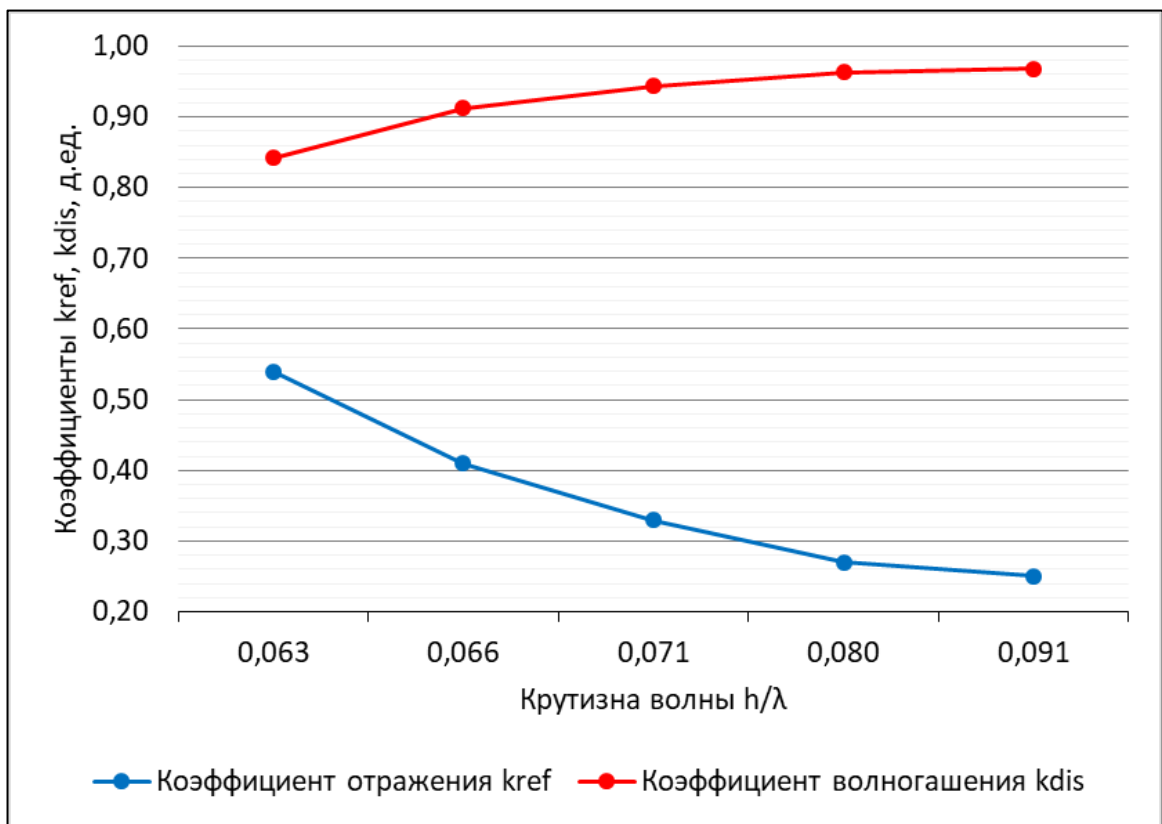


Рисунок 4.17 – Изменение коэффициентов отражения k_{ref} и волногашения k_{dis} от крутизны волн h/λ в опыте №17 серии опытов №2

Как видно на графике, при снижении длины волн коэффициент отражения снижается, а коэффициент волногашения растёт. Другими словами, более пологие волны отражаются сильнее при неизменной сквозности откосно–ступенчатой конструкции. Условно можно считать оптимальными условиями работы волновые режимы 1 и 2, когда коэффициент отражения близок к значению 0,5, а коэффициент волногашения уже достаточно высок (таблица 4.3).

4.4. Третья серия опытов. Откосно-ступенчатая конструкция – изменение сквозности

В третьей серии, состоящей из пяти опытов, исследовалось взаимодействие расчетных волн со сквозной откосно-ступенчатой конструкцией для определения её оптимальной сквозности.

Конструкция ГТС показана выше (рисунок 4.2). Сооружение представлено оболочкой большого диаметра с отметкой верха $-1,4$ см ($-0,41$ м БС), на которой установлена сквозная (проницаемая) откосно-ступенчатая конструкция с отметкой верха $+14,0$ см ($+4,2$ м БС). Высота одной ступени составляла $3,1$ см ($0,92$ м), $3,0$ см ($0,9$ м), $2,8$ см ($0,84$ м), $2,6$ см ($0,77$ м) и $2,5$ см ($0,75$ м) в опытах с двадцать второго по двадцать шестой соответственно, а её ширина $-10,0$ см ($3,0$ м). Ширина сооружения составляла $50,4$ см ($15,1$ м).

Параметры конструкций в опытах третьей серии и результаты опытов №22–26 третьей серии приведены ниже (таблица 4.4).

Вид модели сооружения до начала эксперимента (опыт №22) показан на рисунке 4.18, а во время эксперимента – на рисунке 4.19.

По результатам опытов видно, что при увеличении сквозности коэффициент отражения k_{ref} снижается в пользу коэффициента волногашения k_{dis} . Это свидетельствует об увеличении эффективности работы волновой камеры, что также подтверждается снижением высоты переливов через сооружение h_{ot} при накате волн на сооружение (рисунок 4.20).

Таблица 4.4 – Параметры конструкций в опытах третьей серии и полученные результаты (в натуральных величинах)

Серия опытов и описание конструкции	№ опыта	Сквозность n , д. ед.	Длина волн λ , м	Высота волн h , м	Период волн, с	k_{ref}	k_{dis}	$V_{дон}$, м/с	Нагрузка, тс / п. м.
Серия 3. Откосно-ступенчатая конструкция. Изменение сквозности n	22	0,1	96	6,0	9,8	0,58	0,82	1,4	37,4
	23	0,15	96	6,0	9,8	0,57	0,82	1,41	35,8
	24	0,2	96	6,0	9,8	0,54	0,84	1,66	35,2
	25	0,25	96	6,0	9,8	0,53	0,85	1,81	34,7
	26	0,3	96	6,0	9,8	0,52	0,85	1,85	30,1



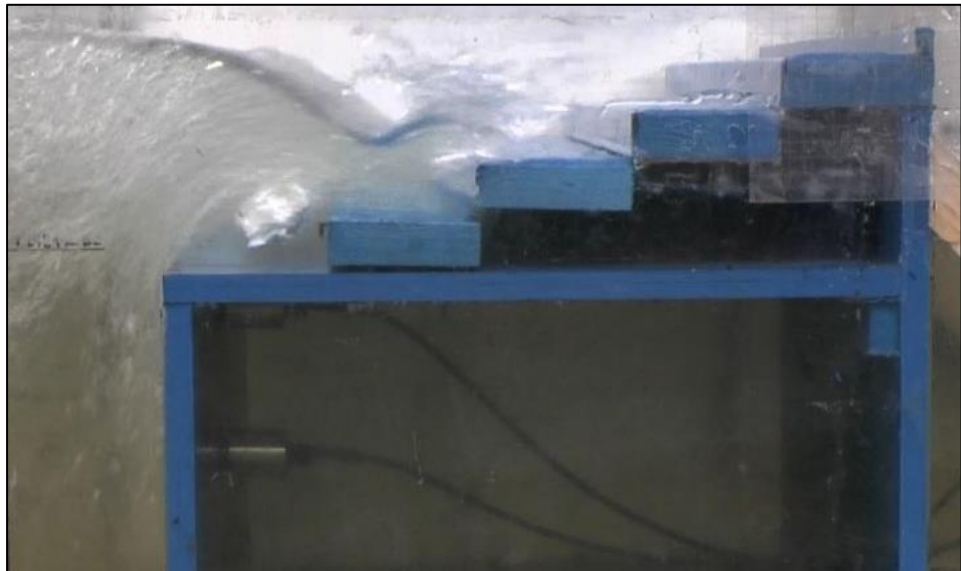
Рисунок 4.18 – Серия №3. Опыт №22. Вид модели до начала опыта

В то же время важно отметить, что даже при максимальной из рассмотренных значений сквозности все еще наблюдаются переливы через верх сооружения, что подтверждает необходимость увеличения объема волновой камеры в дальнейших опытах.

а)



б)



в)



Рисунок 4.19 – Серия №3. Опыт №22. Вид модели во время опыта:
а) откат волны; б) подход волны; в) накат волны

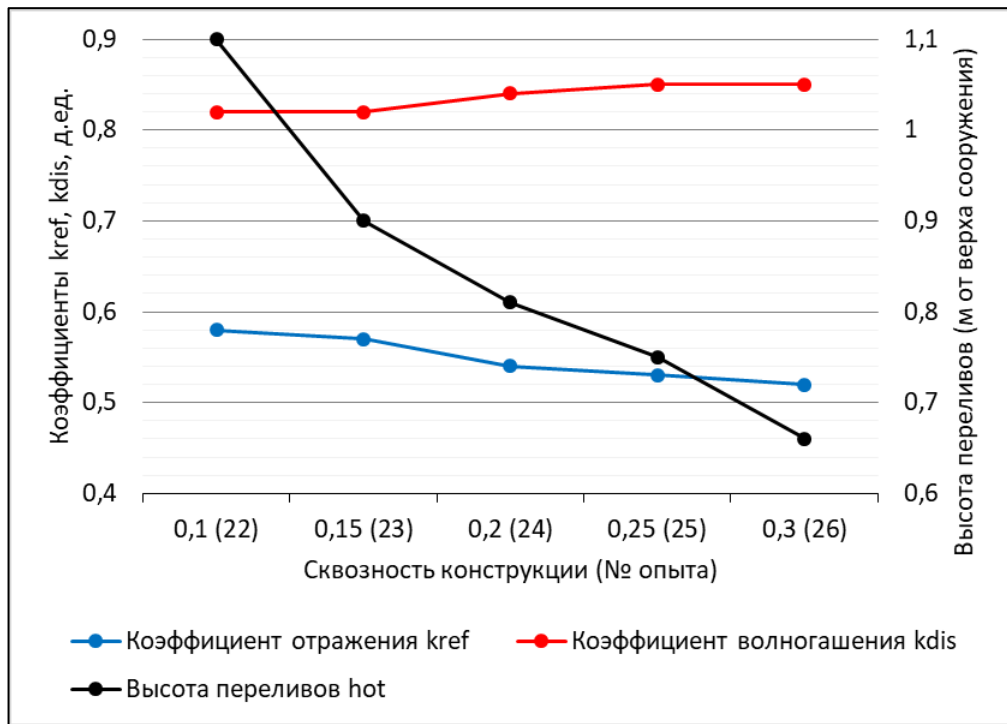


Рисунок 4.20 – Серия №3. Коэффициенты отражения k_{ref} , волногашения k_{dis} и высота переливов через верх сооружения в зависимости от сквозности p

Если рассматривать набор данных по результатам опытов для всех пяти волновых режимов, то при сквозности, раной 0,3 сооружение снова показывает оптимальные результаты: на графике распределения повторяемостей коэффициента отражения k_{ref} пик распределения находится ближе к оптимальным значениям ($0,35 < k_{ref} < 0,4$ вместо $0,3 < k_{ref} < 0,35$ при сквозности 0,1–0,25), а также исчезает второй пик (рисунок 4.21).

Придонные скорости при увеличении сквозности заметно растут (таблицу 4.4).

Горизонтальные волновые нагрузки на сооружение при увеличении сквозности конструкции заметно снижаются (таблицу 4.4). Это также хорошо согласуется со снижением коэффициента отражения k_{ref} . В то же время это снижение менее существенно, чем таковое во второй серии опытов (19,5 % против 24 % во второй серии опытов). Это можно объяснить тем, что при одновременном понижении высоты переливов через верх сооружения и, соответственно, меньшему прохождению волновой энергии через сооружение, конструкция воспринимает большую часть энергии накатывающейся волны.

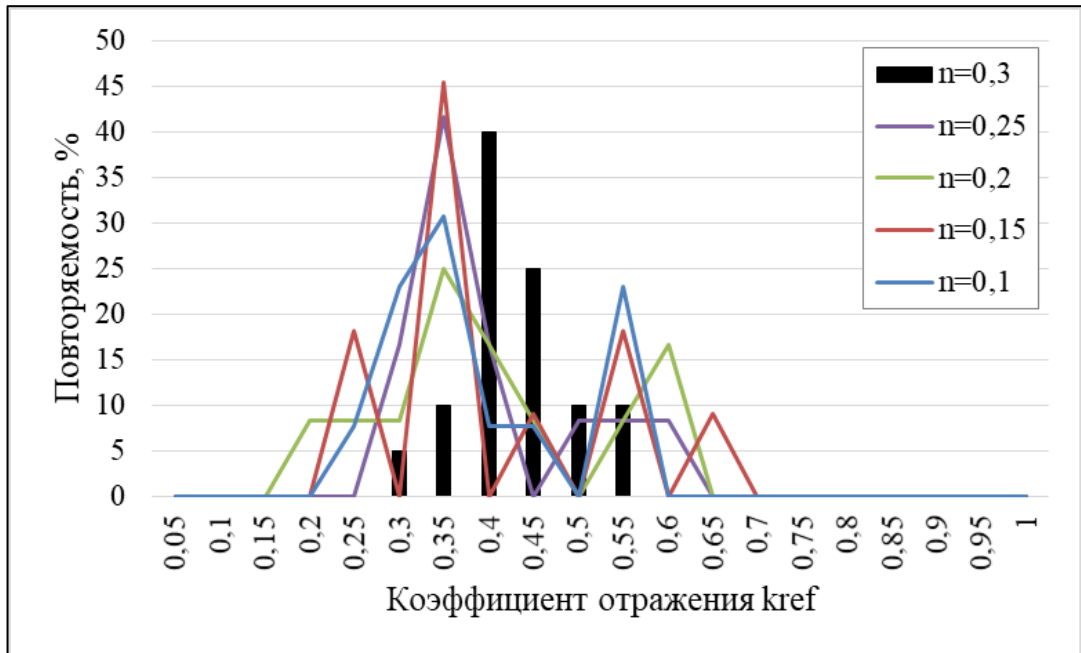


Рисунок 4.21 – Серия №3. График распределения повторяемостей коэффициента отражения kref для всех пяти волновых режимов в зависимости от сквозности n

Этот же эффект можно наблюдать, если сравнить измеренные максимальные придонные скорости: 1,63 м/с в опыте №22 третьей серии против 1,85 м/с в опыте №26 третьей серии.

Ниже показаны эпюры горизонтального волнового давления на сооружение при сквозности 0,1 и при сквозности 0,3 (рисунок 4.22). Схема расположения измерительных датчиков показана на рисунке 4.16. Как видно на рисунке 4.22, основное снижение нагрузок приурочено к верхней, сквозной части сооружения, в то время как давление на нижнюю, непроницаемую часть сооружения остается почти без изменений, что подтверждает вклад сквозной части в эффективность работы сооружения в целом.

Таким образом, по результатам опытов третьей серии наиболее близкой к оптимальной является сквозность сооружения 0,3, при которой нагрузки на сооружение минимальны, коэффициент отражения наиболее близок к оптимальному (0,52 против 0,58 при сквозности 0,1), а переливы через верх сооружения показывают наименьшие высоты. В то же время переливы все еще наблюдаются, поэтому в дальнейших опытах будет изменяться (увеличиваться) объем волновой камеры для дальнейшего выбора оптимальных параметров

конструкции и для оценки влияния таких изменений на характер и численные показатели работы сооружения.

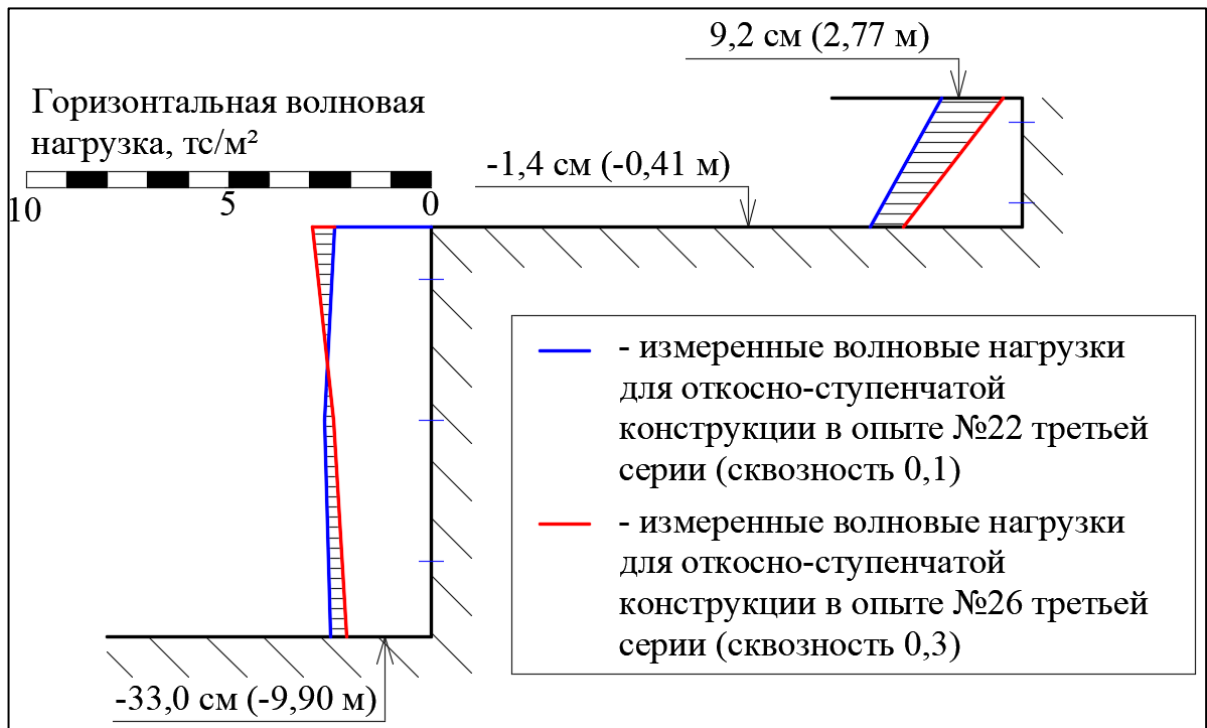


Рисунок 4.22 – Серия №3. опыты №22 и №26. Эпюры горизонтального волнового давления при накате волн по данным замеров на физической модели откосно-ступенчатой конструкции при сквозности конструкции 0,1 и 0,3 соответственно.

Штриховкой показана разница в волновых нагрузках, воспринимаемых конструкциями

4.5. Четвертая серия опытов. Откосно-ступенчатая конструкция – изменение объема волновой камеры

В четвертой, заключительной серии, состоящей из трех опытов, исследовалось влияние величины объема волновой камеры $V_{\text{вк}}$ на эффективность работы сооружения.

Конструкция ГТС показана выше (рисунок 4.2), но в опытах №28–29 изменялись ширина сооружения, отметки его верха, высота и ширина ступеней сквозной части конструкции. Сквозность конструкции принята равной 0,3. Длина волн во всех опытах четвертой серии принята 96 м, высота волн – 6,0 м, период

волн – 9,8 с. Параметры конструкций в опытах четвертой серии и полученные результаты приведены ниже (таблица 4.5).

Вид модели до начала эксперимента (опыт №29) показан на рисунке 4.23, во время эксперимента – на рисунках 4.24–4.25.

Таблица 4.5 – Параметры конструкций в опытах четвертой серии и полученные результаты (в натуральных величинах)

Серия опытов и описание конструкции	Серия 4. Откосно-ступенчатая конструкция. Изменение объема волновой камеры $V_{вк}$		
	№ опыта	27	28
Ширина сооружения, м	15,1	17,6	22,7
Отметка верха сооружения, м БС	4,2	4,7	6,2
Высота ступеней, м	0,75	0,88	1,13
Ширина ступеней, м	3	3,5	4,5
k_{ref}	0,52	0,48	0,43
k_{dis}	0,85	0,87	0,9
$V_{дон}$, м/с	1,85	2,04	2,4
Нагрузка, тс / п. м.	30,1	33,0	38,9

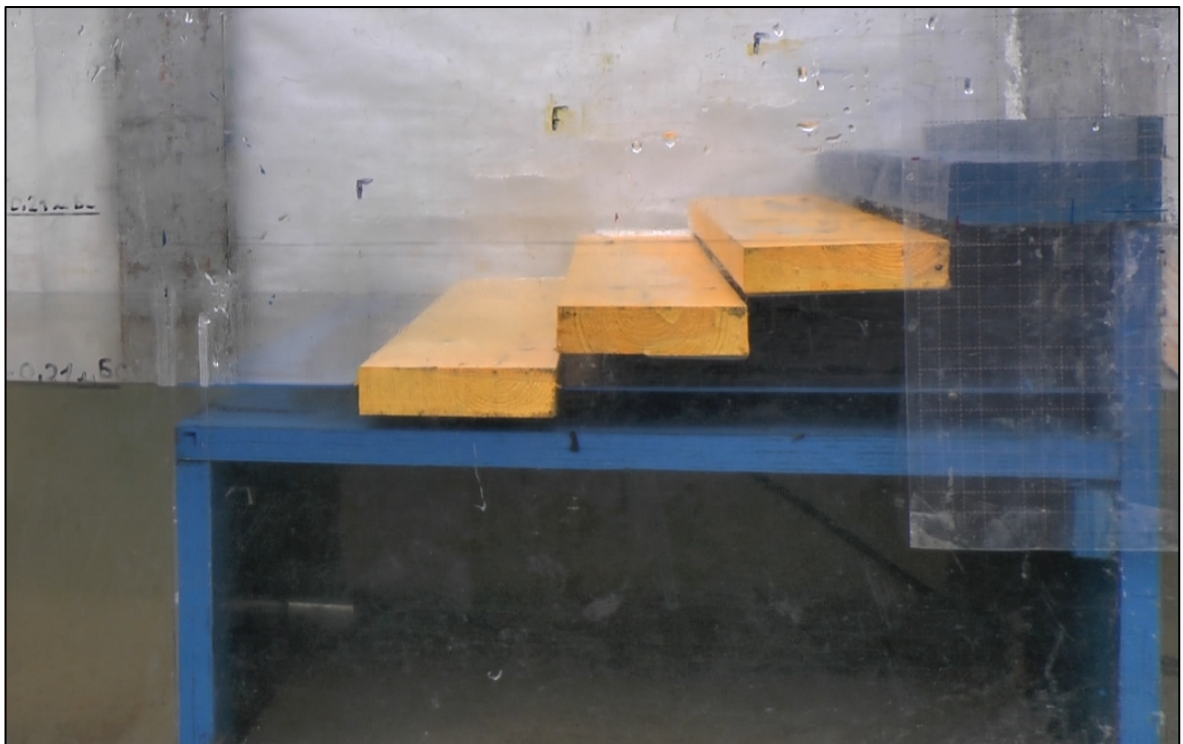


Рисунок 4.23 – Серия №4. Опыт №29. Вид модели до начала опыта

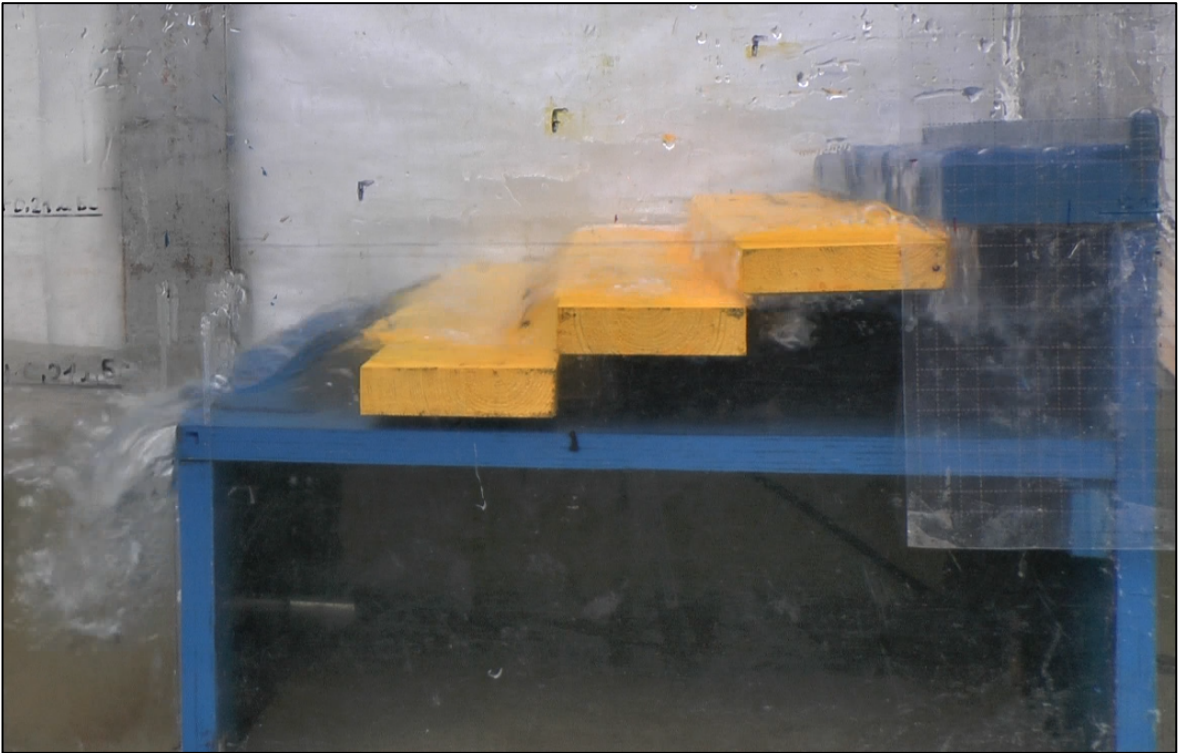
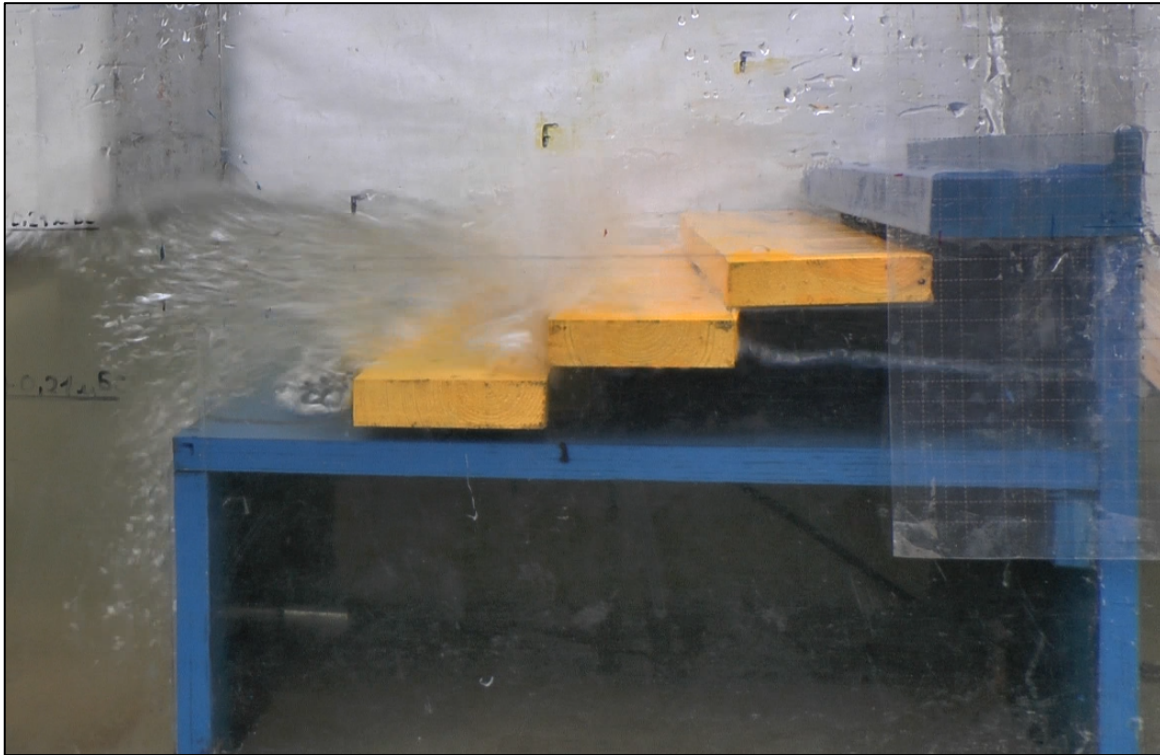


Рисунок 4.24 – Серия №4. Опыт №29. Вид модели во время опыта при откате волны

По результатам опытов видно, что при увеличении объема волновой камеры коэффициент отражения k_{ref} снижается в пользу коэффициента волногашения k_{dis} . Это свидетельствует об увеличении эффективности работы волновой камеры, что также подтверждается снижением высоты переливов через сооружение h_{ot} при накате волн (рисунок 4.26). При этом в опыте №29 переливы через сооружение отсутствуют, наблюдаются лишь незначительные заплески. На рисунке видно, что отсутствие переливов согласуется с ростом коэффициента волногашения k_{dis} . Также это сказывается на росте придонных скоростей (таблица 4.5).

Горизонтальные волновые нагрузки на сооружение при увеличении объема волновой камеры заметно растут (таблица 4.5). Ниже показаны эпюры горизонтального волнового давления на сооружение в опытах №27 и №29 (рисунок 4.27).

а)



б)



Рисунок 4.25 – Серия №4. Опыт №29. Вид модели во время опыта:

а) подход волны; б) накат волны

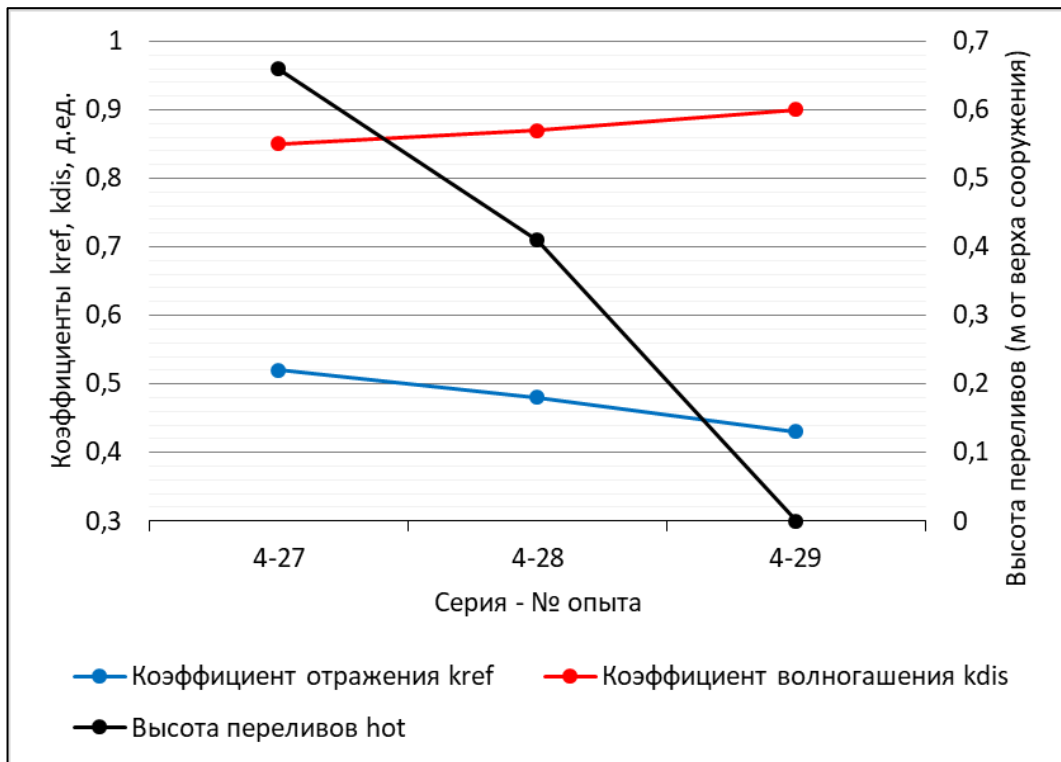


Рисунок 4.26 – Серия №4. Коэффициенты отражения k_{ref} , волногашения k_{dis} и высота переливов через верх сооружения

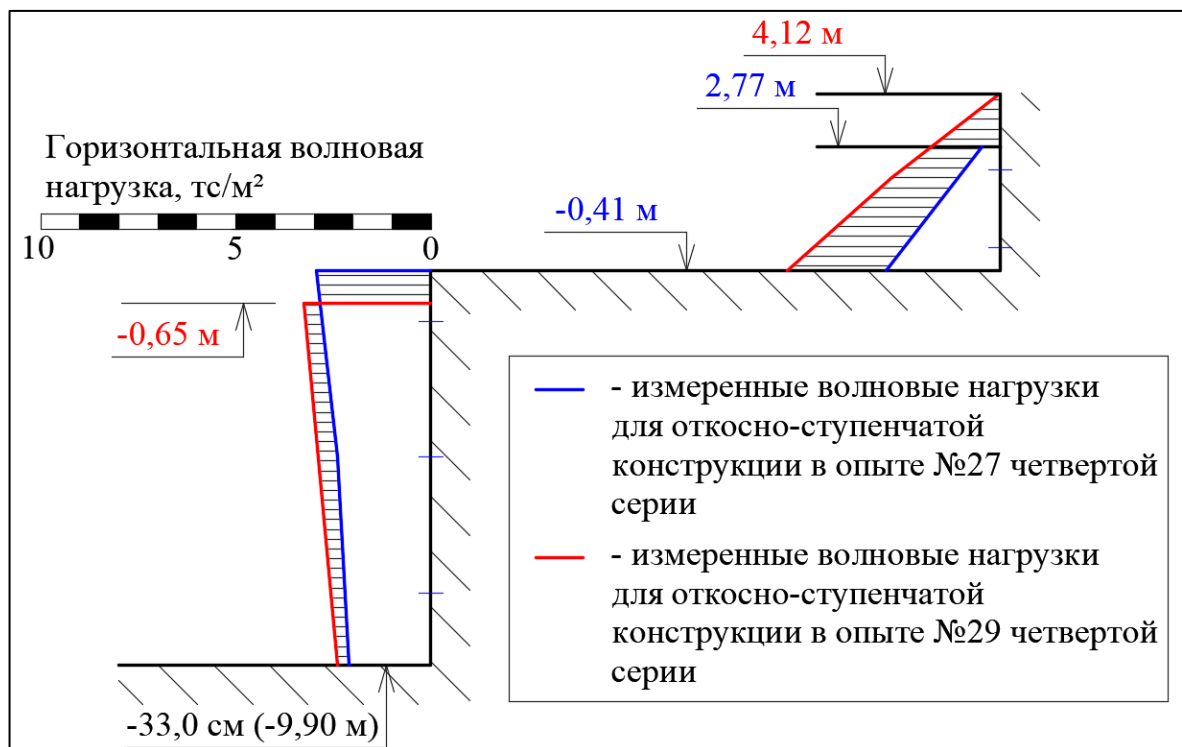


Рисунок 4.27 – Серия №4. Опыты №27 и №29. Эпюры горизонтального волнового давления при накате волн по данным замеров на физической модели откосно-ступенчатой конструкции. Штриховкой показана разница в волновых нагрузках, воспринимаемых конструкциями

Как видно на рисунке 4.27, увеличение горизонтальных нагрузок приурочено к верхней, сквозной части сооружения. Это вызвано, в первую очередь, повышением отметок верха непроницаемой стены, расположенной ближе к берегу от сквозной конструкции, а во-вторых – тем, что в волновой камере большего объема заключен, соответственно, больший объем воды, воздействующий на стену при ветровом волнении. Кроме того, при большем объеме волновой камеры в опыте №29 камера работает более эффективно в сравнении с опытом №27.

На рисунке 4.28 показано положение свободной поверхности воды в волновой камере в опытах №27 и №29 четвертой серии. В опыте №27 при накате волны волновая камера заполняется полностью, проявляя недостаточность своего объема, и вследствие этого эффективность работы снижается и возникают нежелательные вертикальные нагрузки в виде ударов о нижнюю грань верхней ступени сквозной конструкции.

В то же время в опыте №29 таких ударов не возникает, что отчетливо видно в верхней части эпюр на рисунке 4.27. Кроме того, при максимальном накате в волновой камере линия свободной поверхности достигает верхней точки горизонтальной непроницаемой стены, что говорит о правильности выбора объема волновой камеры.

При рассмотрении эпюр волнового давления можно также отметить, что сделанное ранее в настоящей работе предположение о том, что в верхней части конструкции эпюры могут иметь нелинейный вид (раздел 4.3) не подтвердилось: например, в опыте №29 четвертой серии, где измерение нагрузок в верхней части сооружения выполнялось в трех точках, эпюра волнового давления имеет строго линейный профиль (рисунок 4.27). Отклонение эпюры в верхней части вертикальной стенки от нулевого значения вызвано, судя по всему, сжатием связанного в волновой камере воздуха, что может происходить при сдвиге фаз у волн, накатывающих на откос и волн в камере гашения [121].

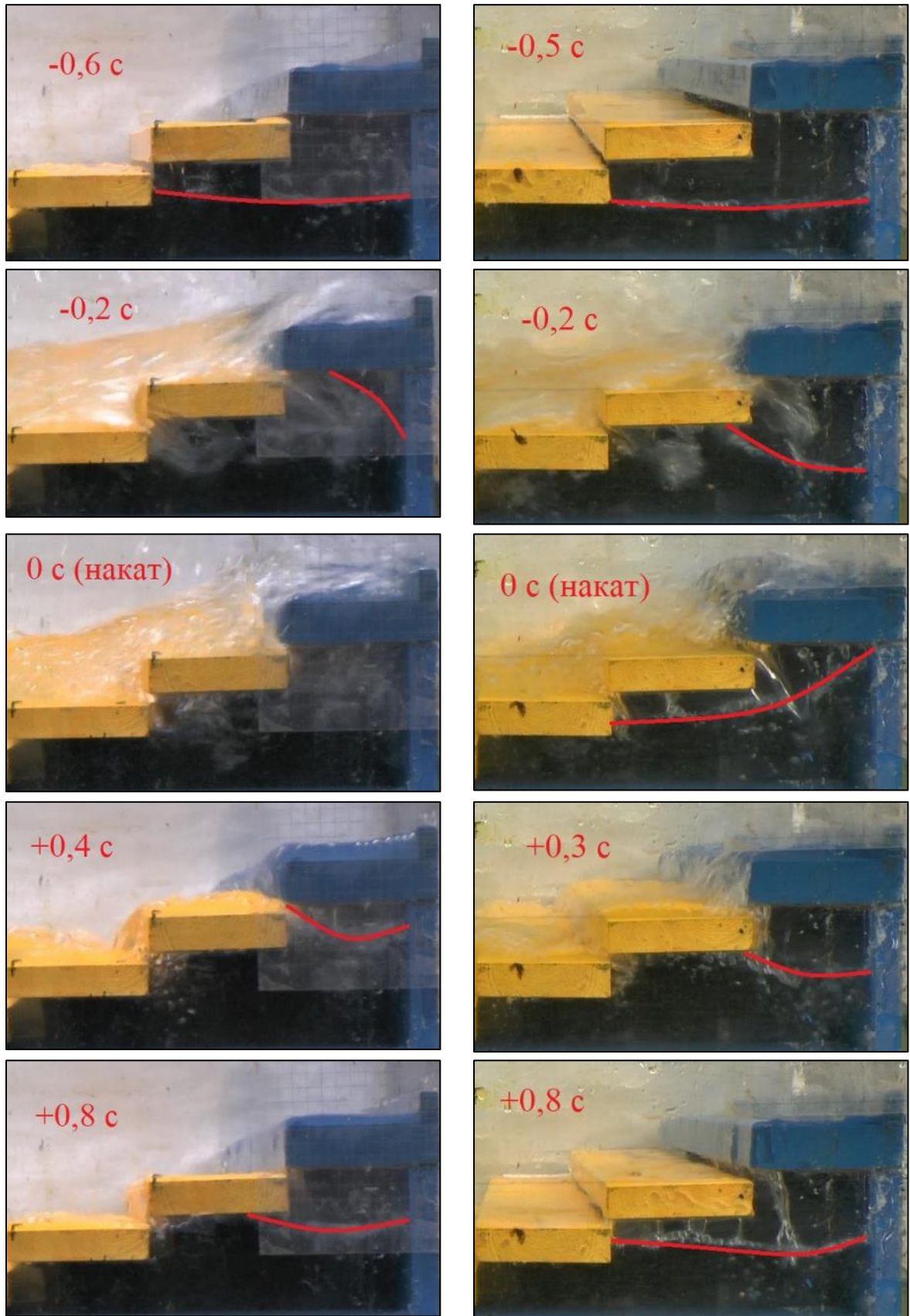


Рисунок 4.28 – Серия №4. Опыты №27 (слева) и №29 (справа). Положение линии свободной поверхности воды в волновой камере при накате волн. Текстом на фото указано время до (–) или после (+) момента максимального наката волны в волновой камере в модельных величинах

Схема расположения измерительных преобразователей давления (датчиков) во время опыта №29 показана ниже (рисунок 4.29).

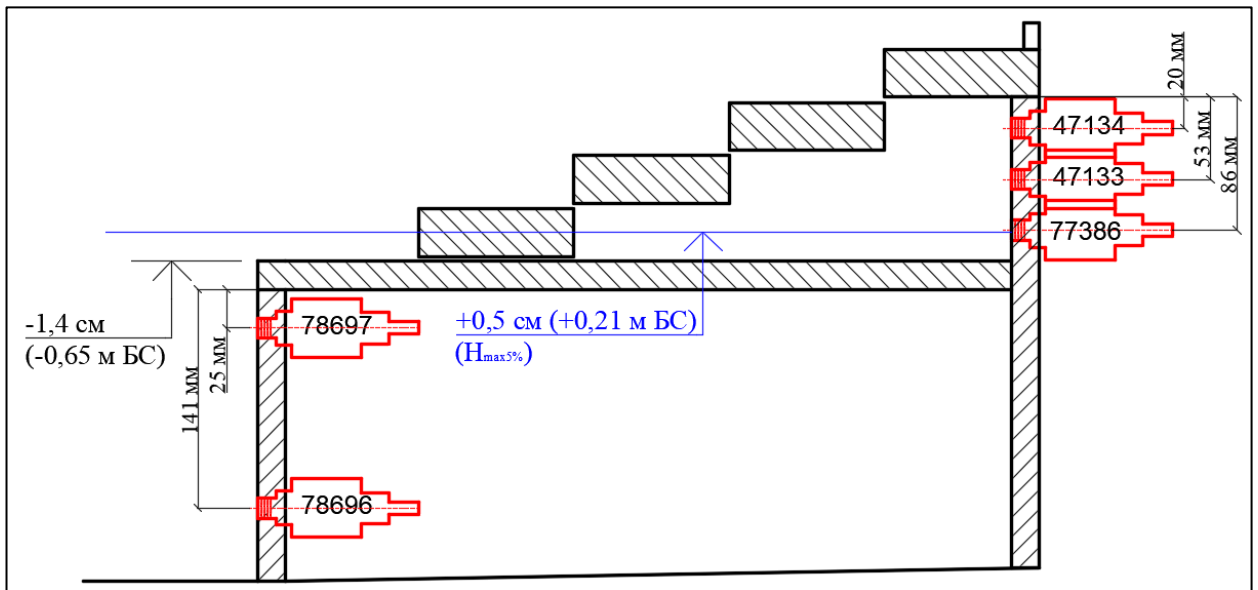


Рисунок 4.29 – Серия №4. Опыт №29. Схема расположения датчиков давления

Увеличение волновой камеры в опытах четвертой серии позволило устранить переливы через верх сооружения и, в то же время, в волновой камере не наблюдалось вертикальных ударов взволнованной поверхности об элементы конструкции. Таким образом, по результатам исследований в волновом лотке сквозной откосно-ступенчатой конструкции параметры сооружения, рассмотренного в опыте № 29 можно считать оптимальным.

Выводы по главе

Для целей настоящей работы было выполнено четыре серии опытов на физических моделях ГТС в волновом лотке. По результатам исследований можно сделать ряд выводов:

1. Выполнены исследования для сравнения различных типов конструкций в аналогичных условиях. Затем выполнен ряд исследований на моделях сквозной откосно-ступенчатой конструкции для выявления зависимости эффективности работы сооружения от волнового режима на акватории.

После этого подбиралась оптимальная сквозность конструкции, которая оказалась равной 0,3, при которой удалось минимизировать волновые нагрузки на сооружение, оптимизировать коэффициент отражения (наиболее близкий к 0,5), и максимально понизить высоты переливов через верх сооружения. После этого увеличивался объем волновой камеры, что позволило устранить переливы и убедиться в отсутствии в волновой камере вертикальных ударов взволнованной поверхности об элементы конструкции. Таким образом, выполнен выбор оптимальных значений ключевых параметров сооружения, предназначенного для защиты проектируемого островного сооружения от воздействия расчетных штормовых волн с волноопасного направления.

2. Устройство сквозной стены перед непроницаемой вертикальной стеной при недостаточной ширине волновой камеры не позволяют значительно снизить высоту наката волн и переливы через верх сооружения. В свою очередь, увеличение ширины волновой камеры позволяет снизить коэффициенты отражения в пользу коэффициентов волногашения, а также заметно снизить придонные скорости и горизонтальные волновые нагрузки (таблица 4.2).
3. Устройство широкой волновой камеры или сквозной откосно-ступенчатой конструкции позволяет добиться высокой эффективности работы волновых камер по сравнению с непроницаемыми вертикальными стенами: наблюдается снижение коэффициентов отражения в пользу коэффициентов волногашения (раздел 4.2).
4. Устройство сквозной конструкции с узкой волновой камерой позволяет незначительно снизить воспринимаемые нагрузки по сравнению со сплошной вертикальной стеной, однако, решающим фактором для обоих вариантов конструкции является высота наката волн.
5. При сравнении конструкции с широкой волновой камерой со сквозной откосно-ступенчатой конструкцией можно отметить, что в последнем

случае коэффициенты работы сооружения оказались более близкими к оптимальным, нагрузки на сооружение снизились, придонные волновые скорости остались в области допустимых значений, переливов через верх сооружения не наблюдалось.

6. Отмечается высокая эффективность работы сквозных сооружений с волновой камерой и, особенно – сквозных откосно-ступенчатых волногасителей в сравнении с другими, рассмотренными в первой серии опытов сооружениями.
7. Придонные волновые скорости с уменьшением длины волн при неизменной их высоте заметно растут (таблица 4.3).
8. Горизонтальные волновые нагрузки на сквозной откосно-ступенчатый волногаситель при уменьшении длины волн существенно снижаются (таблица 4.3).
9. По результатам опытов сквозная откосно-ступенчатая конструкция показала значительно большую эффективность по сравнению с непроницаемой вертикальной стеной аналогичных размеров: нагрузки в первом случае оказались ниже на 33–39% в зависимости от длины накатывающих волн (рисунок 4.9), максимальный прирост эффективности при этом наблюдается при больших длинах волн.
10. Снижение волнового давления при переходе от расчетного случая со сплошной вертикальной стеной к сквозной откосно-ступенчатой конструкции распределяется неравномерно. Максимальное снижение наблюдается на границе нижней (сплошной) и верхней (сквозной) частей сооружения.
11. Для более пологих волн, воздействующих на сооружение наблюдается повышение отметок профиля стоячих волн [11], поэтому рекомендуется выбирать отметку верха непроницаемой части сооружения в соответствии с пологостью (крутизной) расчетных волн для повышения коэффициента отражения. При этом необходимо обосновывать такие

решения численными расчетами и (или) результатами гидравлического моделирования с проверкой соблюдения требуемых волновых нагрузок на сооружение и, при необходимости – корректировать объем волновой камеры, необходимый для эффективной работы сооружения.

12. Эпюра волнового давления в волновой камере сквозной откосно-ступенчатой конструкции имеет линейное очертание.
13. Более крутые волны отражаются от сквозной откосно-ступенчатой конструкции слабее: при снижении длины волн при их неизменной высоте коэффициент отражения снижается, а коэффициент волногашения растёт.
14. При увеличении сквозности до некоторого предела эффективность работы волновой камеры увеличивается: коэффициент отражения снижается в пользу коэффициента волногашения, высота переливов через верх сооружения снижается (рисунок 4.20).
15. При увеличении сквозности конструкции придонные скорости растут, а горизонтальные волновые нагрузки на сооружение заметно снижаются (таблица 4.4).
16. При увеличении сквозности горизонтальные волновые нагрузки в верхней (сквозной) части сооружения снижаются, а в нижней (непроницаемой) части – остаются практически без изменений (рисунок 4.21).
17. При увеличении объема волновой камеры коэффициент отражения снижается (в пользу коэффициента волногашения), как и высота переливов волн через верх сооружения.
18. Горизонтальные волновые нагрузки на сооружение при увеличении объема волновой камеры заметно растут, что связано с повышением отметок верха сооружения и с воздействием большего объема воды на непроницаемую стену в волновой камере.

19. При проектировании сквозных откосно-ступенчатых оградительных сооружений необходимо принимать во внимание, что сооружение будет подвержено воздействию всей энергии подходящих расчетных волн. Эту энергию необходимо по возможности разделить на две равные части: половину необходимо отразить (это достигается при коэффициенте отражения, равном 0,5), а остальную часть – погасить (достигается при условии отсутствия переливов через сооружение).
20. Для снижения материалоемкости проектируемого ГТС необходимо, чтобы волновая камера работала с максимальной эффективностью. Максимальной эффективностью при этом необходимо считать повышение отметки свободной водной поверхности в волновой камере до верха вертикальной стенки в тыльной части волновой камеры при отсутствии ударов о нижнюю грань верхней ступени (рисунок 4.30).
21. Подобрать оптимальные параметры конструкции оградительных ГТС искусственных островов без проведения специальных исследований на практике представляется сложной или вовсе невыполнимой задачей, поэтому на этапе научного обоснования проекта искусственного острова необходимо выполнять отдельные исследования (серии опытов) для выбора каждого из ключевых параметров таких сооружений. При этом для снижения трудоемкости исследований необходимо выполнить ранжирование параметров сооружения по убыванию влияния единицы изменения параметра на эффективность работы конструкции, как было показано в разделе 4.1. Затем необходимо выбрать параметры конструкции, которые будут изменяться и поочередно изменять каждый из них, выбирая на каждом этапе оптимальные значения, как показано на рисунке 4.31.

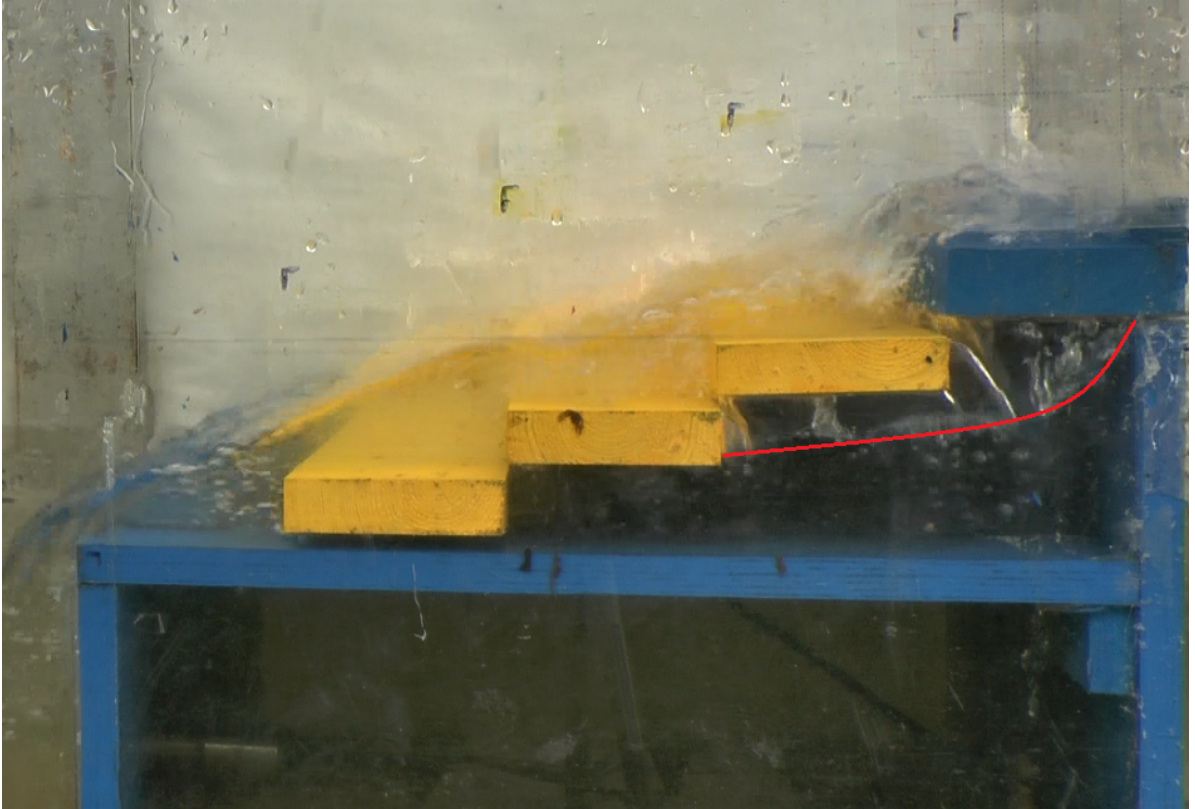


Рисунок 4.30 – Положение линии свободной поверхности воды в волновой камере при накате волн, характеризующее максимальную эффективность работы волновой камеры

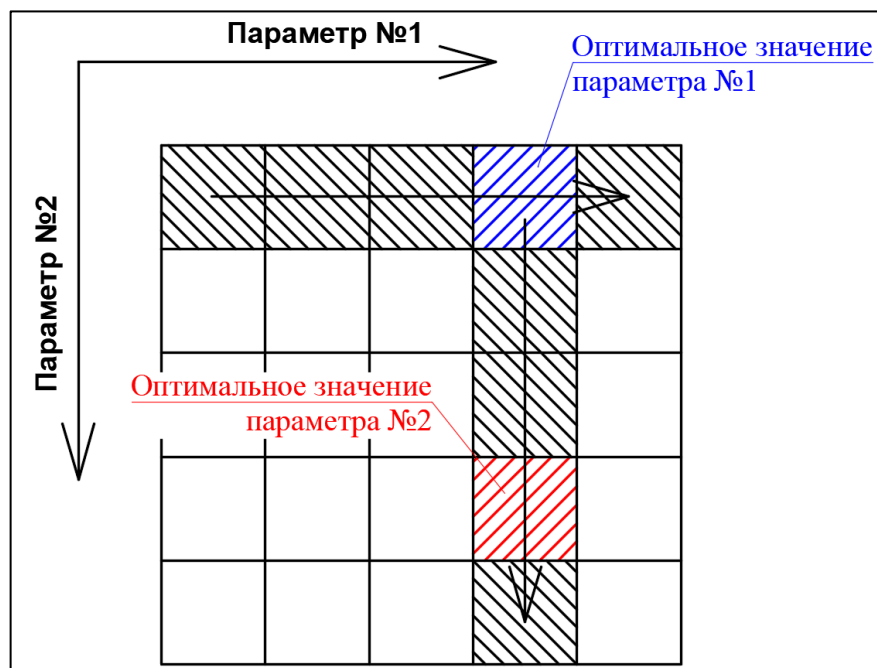


Рисунок 4.31 – Схема проведения опытов при изменении двух параметров конструкции

22. В случае, показанном выше (рисунок 4.31), проводится одна серия опытов для выбора оптимального значения параметра №1 и для этого выбранного значения выполняется следующая серия опытов для выбора оптимального значения параметра №2. В данном случае выполняется 9 опытов вместо 25, что позволяет сократить трудозатраты на выполнение исследований до 56%.

23. Для сквозных откосно-ступенчатых и подобных конструкций одновременно с минимизацией материалоемкости необходим поиск оптимального соотношения сквозности конструкции и объема волновой камеры:

- при первоначальном выборе оптимальной сквозности необходимо подобрать волновую камеру такого объема, чтобы, с одной стороны, работал максимальный ее объем, а с другой – чтобы не возникало вертикальных нагрузок и переливов через сооружение. Другими словами, волновая камера должна работать с максимальной эффективностью (рисунок 4.30);

- в противном случае, при первоначальном выборе объема волновой камеры необходимо подбирать сквозность таким образом, чтобы работал максимальный объем волновой камеры, чтобы наблюдался максимальный перепад отметок водной поверхности в камере при воздействии волн (как показатель эффективности волногашения) и чтобы не возникало вертикальных нагрузок.

24. По результатам выполненных исследований, описанных выше, разработаны методические рекомендации по научному обоснованию проектов искусственных островов (глава 5).

ГЛАВА 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАУЧНОМУ ОБОСНОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ИСКУССТВЕННЫХ ОСТРОВОВ

Характерной чертой возведения ГТС является длительный период строительства и более высокая по сравнению со многими другими отраслями стоимость единицы готовой продукции. Такая особенность строительства требует повседневной борьбы за наиболее эффективное использование трудовых и материальных ресурсов, облегчения строительных конструкций, уменьшения транспортных расходов и максимального сокращения сроков строительства. Приведенные ниже методические рекомендации разработаны для оптимизации процесса научного обоснования при проектировании искусственных островных сооружений.

5.1. Общие указания

1. При выборе места строительства искусственного острова необходимо учитывать:

- гидрологический и литодинамический режимы прибрежной зоны (уровенные, ветро-волновые условия моря, транспорт наносов и др.), в том числе возможность возникновения низовых размывов за пределами проектируемого объекта [122–123];
- возможность и необходимость сохранения существующих и создания новых пляжей на месте строительства;
- рельеф дна;
- возможность использования волновой тени проектируемого острова для оптимизации проектных решений, например, отказа от возведения пляжеудерживающих сооружений;
- возможность использования зоны волновой тени в качестве портов – убежищ для судов.

2. При проектировании оградительных островных ГТС необходимо учитывать гидрологические и геологические условия (интенсивность волнового воздействия, глубина акватории, несущая способность грунтов основания) с целью обеспечения требуемой устойчивости и прочности сооружения.
3. Первоначальный выбор конструкции ГТС рекомендуется выполнять с учетом показаний по условиям применимости и рекомендаций, приведенных в разделе 2.2.
4. Результаты исследований показывают более высокую эффективность сквозных и особенно сквозных откосно-ступенчатых конструкций оградительных сооружений.
5. При наличии на участке выраженного вдольберегового потока наносов необходимо разрабатывать мероприятия, предотвращающие потенциальные низовые размывы берега.
6. Для обоснования принимаемых проектных решений, а также для оптимизации проектируемых конструкций в части безопасности, надежности и экономичности необходимо выполнение научных исследований с применением методов физического и математического моделирования волновых воздействий.
7. На этапе научного обоснования проекта искусственного острова необходимо выполнять отдельные исследования (серии опытов) для выбора каждого из ключевых параметров сооружения. При выборе ключевых параметров (факторов) необходимо учитывать следующие положения:
 - для снижения трудоемкости исследований следует выполнить ранжирование параметров сооружения по убыванию влияния единицы изменения параметра на эффективность работы конструкции, как было показано в разделе 4.1, а затем выбрать ключевые из них;

- как правило, 20 % параметров определяют 80 % характеристик сооружения;
- параметры сооружения могут быть количественными и (или) качественными;
- параметры должны быть управляемыми (должна иметься возможность поддержания параметра на неизменном уровне или изменять его до необходимых значений соответственно программе экспериментального исследования);
- изменяемые параметры сооружения в совокупности должны быть совместимыми (все комбинации значений факторов должны быть осуществимы) и независимыми;
- число уровней для каждого из параметров может быть любым, но не менее двух. Их количество необходимо выбирать из условий сокращения трудоемкости и, в то же время – точности и достоверности полученных результатов;
- рекомендуется применение симметричного планирования экспериментов (использовать одинаковое количество уровней для каждого из параметров сооружения);
- рекомендуется назначение уровней параметра, равностоящих друг от друга.

8. Серия опытов, при проведении которой рассматриваются все возможные сочетания изменяемых и параметров представляется наиболее информативной, однако требует значительных затрат ресурсов (зачастую неприемлемых). Поэтому после выбора ключевых параметров сооружения рекомендуется изменять их значения (уровни) поочередно, выбирая на каждом этапе оптимальные значения для дальнейших исследований.

9. Выбор местоположения проектируемого острова, конструкции острова, в том числе схемы берегозащитных мероприятий и транспортного

сообщения с берегом необходимо выполнять на основе технико-экономического сравнения вариантов (не менее трех).

10. При достаточном технико-экономическом обосновании островные сооружения могут образовывать островные комплексы, состоящие из нескольких островов, связанных друг с другом и с берегом транспортными линиями. Примеры плановой организации таких комплексов показаны ниже (рисунок 5.1). Схемы расположения таких сооружений должны создаваться с учетом назначения проектируемых сооружений, доступности транспортной инфраструктуры, природных условий площадки строительства и других факторов.

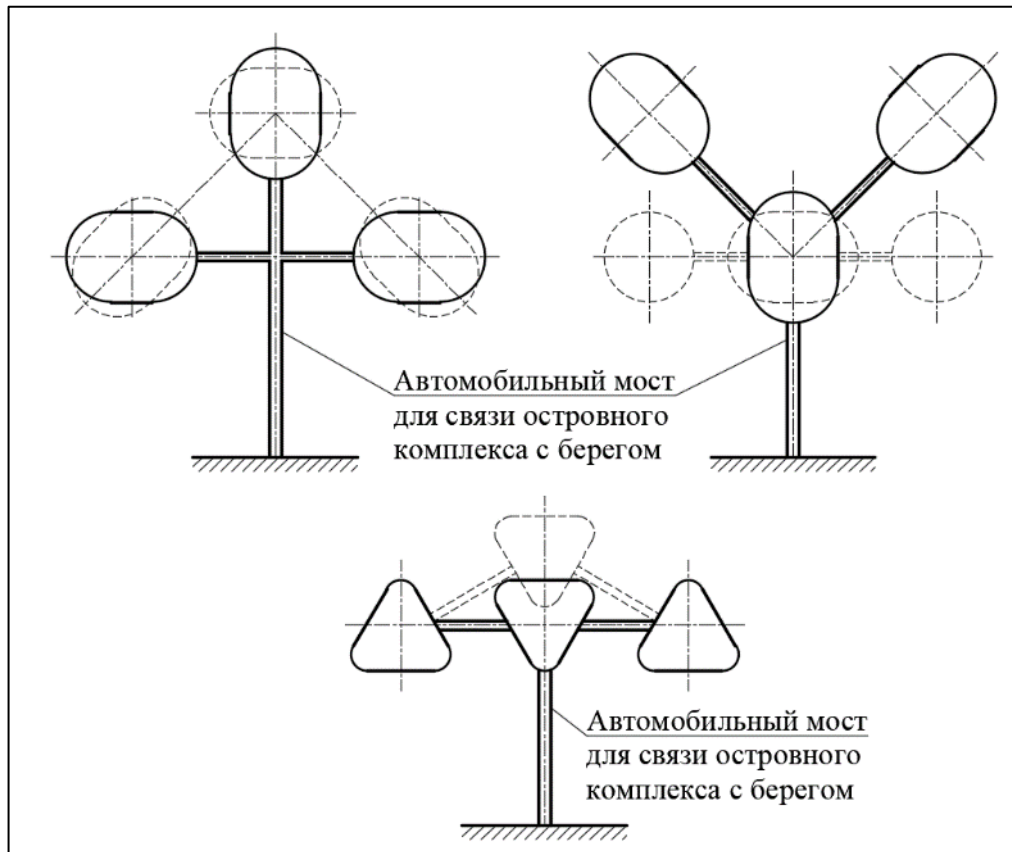


Рисунок 5.1 – Некоторые схемы планового расположения сооружений островных комплексов

11. Проектируемые островные сооружения в процессе эксплуатации должны сохранять и, по возможности, улучшать экологическую обстановку в прибрежной зоне акватории и на прилегающем участке берега.

12. При проектировании оградительных сооружений выполняются расчеты по основному и особому сочетанию нагрузок. В последнем случае необходимо установить наименее выгоднейшие комбинации нагрузок, удерживающих и опрокидывающих сил, действующих моментов сил. Нагрузки и воздействия волн на островные сооружения первого класса и на сооружения других классов при высоте расчетных волн более 5 м необходимо уточнять с помощью специальных лабораторных исследований.
13. При проектировании принципиально новых конструкций, не прошедших проверку в практике строительства и для которых использованы конструктивные решения, не прошедшие апробирование или для которых не существует нормативных методов расчета, необходимо выполнять специальные исследования, в том числе с применением методов физического моделирования, или использовать данные натурных наблюдений на объектах – аналогах.
14. При проектировании оградительных сооружений искусственного острова необходимо определять:
- расчетные уровни воды с учетом сгонно-нагонных и приливно-отливных явлений в зависимости от класса сооружения;
 - расчетные характеристик ветра и элементов волн, волновые нагрузки и воздействия на сооружения;
 - скорости течений от всех волноопасных направлений. Воздействие шторма на дно акватории у основания оградительного сооружения необходимо оценивать путем сравнения максимальной ожидаемой придонной скорости и неразмывающей скорости для основания;
 - интенсивность водообмена: моделирование расчетных течений, моделирование динамики качества воды в акватории при заданных источниках загрязнений и интенсивности промывки.

15. На этапе оценки интенсивности водообмена в прилегающей к проектируемому сооружению акватории, в том числе, в зоне его волновой тени, должно выполняться моделирование поля течения в этой акватории методами физического или математического моделирования.
16. При строительстве островных сооружений в зоне полярного шельфа, нагрузки от воздействия льда в зависимости от характера воздействия и типа конструкции сооружения разделяют на статические и динамические. При наблюдении у сооружения дрейфующих ледяных полей и при наличии надежных данных об их размерах за расчетную принимают наименьшую динамическую нагрузку. При определении ледовых нагрузок в число исходных данных должны включаться толщина льда, его прочностные характеристики, перепады температур, размеры и фактор формы рельефа ледяного покрова, скорости подхода льда к сооружению, а также скорость ветра.
17. Для создания связи островов с берегом и друг с другом необходимо предусматривать строительство транспортных линий (мосты, тоннели, канатные дороги и т.п.). Мост должен быть рассчитан под минимально необходимую автомобильную нагрузку, иметь необходимую минимальную ширину проезжей части. Основным мостом, соединяющим островной комплекс с берегом, рекомендуется возводить балочной конструкции на основе типовых проектов автодорожных мостов. Отметку проезжей части моста рекомендуется устанавливать равной отметке верха надостровной площадки, хотя мост может быть построен с уклоном к берегу или к островной площадке в зависимости от условий сопряжения моста с берегом. Опоры этого моста рекомендуется сооружать в волновой тени острова, где они будут подвержены незначительным волновым нагрузкам, слабому размыву основания и истиранию бетонных опор галечным материалом пляжа. Мосты, сооружаемые для связи смежных островов комплекса, рекомендуется

применять висячей конструкции, чтобы избежать строительства опор в акватории между островами. Конструкции мостов островного комплекса должны позволять их использование для прокладки по ним всех видов сетей инженерно-технического обеспечения, необходимых для нормального функционирования острова.

5.2. Сооружения откосного профиля

Особенности расчета взаимодействия расчетных волн с сооружениями откосного профиля [11]:

18. При проектировании оградительных сооружений откосного типа в дополнение к указанным выше (раздел 5.1) определяются:

- высота наката волн на откосы сооружения;
- величины деформаций свободных откосов;
- объемы материалов для ежегодного восполнения потерь при размыве откосов;
- при креплении откосов камнем, бетонными или железобетонными блоками – минимальная масса отдельного элемента крепления [124–126].

19. По результатам расчетов назначаются основные характеристики сооружения (при известной крупности материала, отсыпаемого в откос):

- отметка верха сооружения или его высота над расчетным уровнем – из условия отсутствия переливов через сооружение при волнении;
- ширина горизонтальной полки в верхней части откоса – из условия полного гашения волн, накатывающих на откос;
- уклон морского откоса сооружения рекомендуется принимать в пределах 1:2 – 1:5, при наличии расчетного или экспериментального обоснования допускается принимать более пологие уклоны.

20. При определении волновых нагрузок на пляжи искусственного острова без устройства берегозащитных ГТС необходимо принимать обеспеченность расчетного уровня моря равной 1%.

21. При расчетах высоты наката волн на откос должны определяться, в том числе, шероховатость поверхности морского откоса и фильтрационные свойства материала откоса. Определение высоты наката рекомендуется выполнять с применением методов физического моделирования или гидродинамических расчетов.
22. При выборе откосного типа сооружения с креплением откосов, как правило, рассматривается несколько вариантов крепления. Оптимальный вариант выбирается по результатам физического и (или) математического моделирования.
23. В районах, где наблюдаются тяжелые ледовые условия откосные сооружения рекомендуется предусматривать массивными с достаточной защитой от ледовых нагрузок и ударов отдельных льдин, а также учитывать возможность возникновения нагромождений льда в береговой зоне с учетом зависимости воспринимаемых нагрузок от глубины акватории и от ширины сооружения [127].
24. В условиях открытых акваторий и большой удаленности острова от берега подход расчетных волн к сооружению, как правило, равновероятен с нескольких направлений, поэтому изменение с какой-либо стороны сооружения параметров морских откосов в меньшую сторону от расчетных должно быть обосновано специальными расчетами.
25. Поперечная площадь исходной отсыпки материала (строительного профиля) рассчитывается с учетом того, что материал будет отсыпаться в разрыхленном состоянии. В дальнейшем за счет волновой переработки он будет уплотняться, в результате чего объем сформированного откоса будет меньше объема первичной отсыпки (общее уменьшение объема исходной отсыпки материала при ее переработке волнами в среднем составляет 15–20%).

26. В случае устройства подводного банкета рекомендуется определять его основные размеры с использованием зависимостей и графиков, полученных по результатам экспериментальных лабораторных исследований и приведенных выше (раздел 2.1).

5.3. Вертикальные сооружения

Как было сказано выше, оградительные сооружения вертикального типа применяются преимущественно в виде гравитационных, свайных конструкций и оболочек большого диаметра. Ниже приведены особенности проектирования вертикальных ГТС искусственных островов:

27. При исследованиях на пространственных физических моделях вертикальных ГТС искусственного острова необходимо определять отметки верха сооружения, высоту наката волн, выполнять проверку отсутствия заплесков и переливов через верх сооружения, оценивать волновые нагрузки на стену и придонные скорости.

28. Вертикальная защитная стена должна удовлетворять условиям [128]:

- выдерживать удары волн;
- подошва стены должна быть защищена от донных течений – необходимо выполнять проверку неразмываемости дна у основания сооружения;
- стена должна воспринимать распор грунта, лежащего за ней;
- территорию за стеной необходимо предохранить от размыва при заплесках от разбивающихся волн редкой повторяемости;
- вымывание грунта через стену не допускается. Вместе с тем, стена должна оставаться устойчивой даже в случае вымывания и осадки обратной засыпки;
- должны быть предусмотрены дренажные устройства для отвода грунтовых вод из-за стены (из тела острова);
- расчет сооружений на воздействие стоячих волн, подходящих со стороны открытой акватории;

- проверка общей и местной устойчивости сооружения и отдельных его частей;
- определение величины и характера распределения напряжений в основании сооружения;
- определение величин деформаций и перемещений сооружения;
- оценка взвешивающего волнового давления вдоль подошвы сооружения и в швах между массивами сооружения.

29. Горизонтальную волновую нагрузку при воздействии стоячих волн принимают по эпюрам волнового давления для трех расчетных случаев: для максимального, минимального наката волн и при максимальной горизонтальной волновой нагрузке на стену.

30. При расчете устойчивости сооружения и прочности грунтов основания необходимо учитывать снижение волновой нагрузки вследствие подхода волн под углом к линии кордона сооружения.

31. При расчете опор глубоководных сооружений со свайными фундаментами величинами местных размывов дна, как правило, пренебрегают, поскольку их величина значительно меньше длины утраиваемых свайных фундаментов [64]. Это объясняется затуханием движения жидкости у дна в глубоководной зоне, а также механизмом местного размыва у вертикальных опор, при котором глубины размывов сопоставимы по величине с диаметром сваи.

32. В инженерной практике применяются пассивные способы защиты от местных размывов дна у основания ГТС. Это могут быть покрытия дна, обеспечивающие механическую защиту грунтов от размыва. Наиболее распространенный способ защиты – каменная наброска поверх обратного фильтра из гравия или специальной фильтрующей ткани. Способы защиты оснований островных сооружений от размыва приведены ниже (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Способы защиты оснований островных сооружений от размыва

Пассивная защита		Активная защита
Устройство после установки сооружений	Устройство в момент установки сооружений	
Сборные ж/б плиты 5,3*2,0*0,2 м	Шарнирные ж/б и металлические плиты	Экран-отражатель, вызывающий намыв естественных наносов
Мешки с песком 0,7*0,25*0,13 м в нейлоновых сетках	Такие же плиты с засыпкой камня или гравия	Метод “искусственных водорослей” [129]
Гибкие нейлоновые маты 10,5*3,0*0,2 м	Жесткие горизонтальные экранирующие элементы	
Каменная или галечная отсыпка		

33. Конструктивные решения для защиты дна от местных размывов рекомендуется выбирать по данным, приведенным ниже (рисунок 5.2) с учетом естественных условий площадки, наличия строительной техники, доступности строительных материалов.

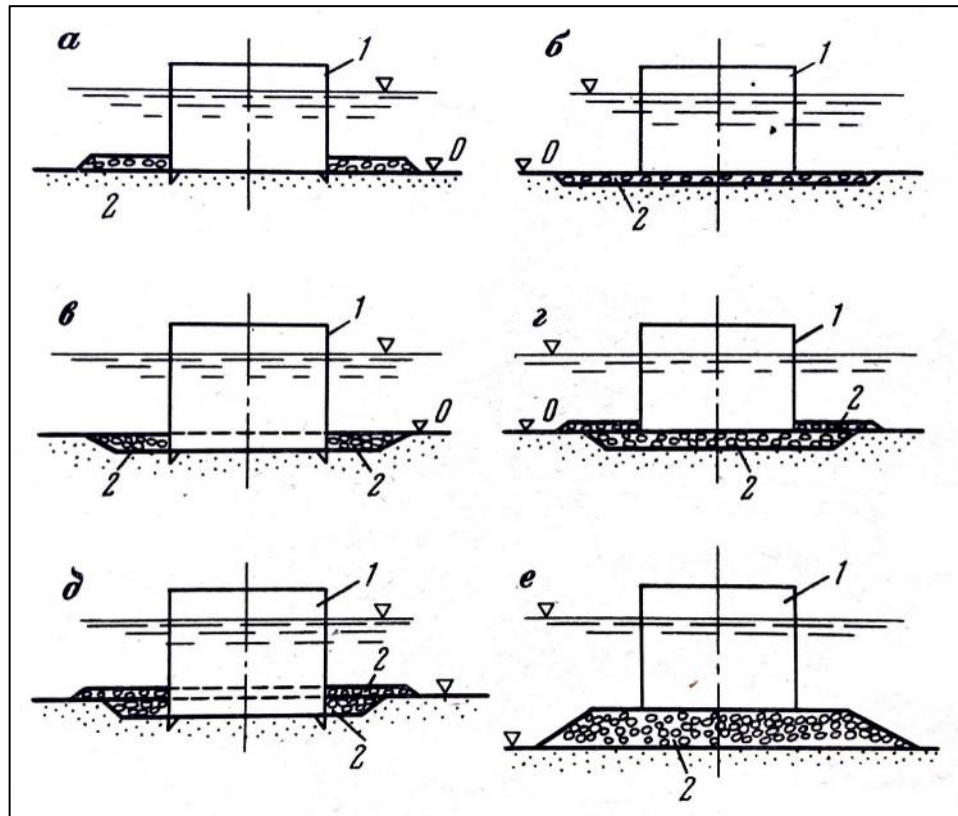


Рисунок 5.2 – Схемы защиты дна у цилиндрического сооружения от местного размыва наброской камня и гальки: 1 – сооружение; 2 – наброска

Варианты «а» – «д» предпочтительны при строительстве в условиях мелководья (глубина в месте установки до 20–25 м), а вариант «е» – на более значительных глубинах. В случае наброски вокруг установленного сооружения возможна экономия значительных объемов материалов и трудозатрат, но при этом требуется тщательная организация и высокая производительность работ для быстрого выполнения защитных мероприятий после установки сооружения на естественное основание. Недостатки вариантов «б» – «д» заключаются в необходимости дноуглубительных работ и увеличении общей высоты сооружения на глубину котлована. Из преимуществ вариантов б), г) и е) можно назвать устройство наброски до установки острова, недостатками являются высокая материалоемкость наброски и рост вертикальных нагрузок и опрокидывающего момента из-за высокой проницаемости наброски.

34. Крупность материала защитной наброски выбирается исходя из условия устойчивости верхнего слоя (отсутствие размывов) при воздействии волн и течений редкой повторяемости или из условия контролируемых размывов на определенную глубину. В последнем случае необходимо предусматривать периодические пополнения наброски во время эксплуатации ГТС. Выбор крупности материала и толщины защитного слоя наброски необходимо выполнять на основе технико-экономического сравнения вариантов при условии обеспечения прочности и устойчивости сооружения на весь период эксплуатации.
35. На открытых акваториях с глубинами 15–30 м и более параметры защитной каменной наброски определяются, как правило, воздействием расчетных волн, а не течений [65].
36. Ширина защитного слоя каменной наброски должна быть наибольшей из величин:
- максимального планового размера воронки размыва у опоры ГТС;
 - расстояния от опоры до ближайшего узла стоячих волн.
37. Определенные по указанным выше правилам параметры защитной наброски являются предварительными и должны уточняться на стадии проектирования посредством специальных лабораторных исследований.
38. При проектировании оградительных сооружений островов вертикального профиля назначаются предварительные размеры оградительного сооружения, которые впоследствии необходимо уточнять [130]:
- высота сооружения над расчетным уровнем моря, которая определяется с учетом высоты волн, приливных и нагонных явлений;
 - толщина каменной постели в основании сооружения (принимается согласно требованиям действующих нормативных документов в области проектирования ГТС);

– ширина каменной постели, которая подбирается с некоторым запасом, который впоследствии уточняется расчетом.

39. При использовании в конструкции оградительных сооружений деревянных элементов, такие элементы следует располагать ниже уровня, при котором возможно гниение.

5.4. Некоторые специальные типы сооружений

40. Основные сочетания нагрузок, действующих на сооружения, представленные мягкими геосинтетическими оболочками, состоят из следующих сил:

- собственный вес оболочки;
- избыточное давление наполнителя;
- давление воды – статическое, динамическое, волновое, фильтрационное;
- давление льда – статическое и динамическое;
- давление наносов;
- особые нагрузки.

41. Избыточное давление при заполнении оболочки жидкостью подчиняется гидростатическому закону: оно нормально к поверхности оболочки в любой точке и пропорционально высоте столба жидкости выше этой точки. Распределение нагрузки складывается из предварительной нагрузки и нагрузки от веса жидкости.

42. Точный расчет мягких оболочек представляет собой задачу строительной механики, требует привлечения теории упругости и введения ряда допущений:

- допущение о безмоментности оболочки;
- усилия в оболочке относятся к срединной поверхности;
- допущение о невесомости материала оболочки;

- материал оболочки работает в зоне упругих деформаций, подчиняющихся закону Гука;
- допущение об отсутствии влияния продольных натяжений на форму поперечного сечения конструкции и величину поперечных усилий;
- допущение об отсутствии касательных напряжений, действующих на оболочку.

43. Расчет мягких оболочек сводится к задаче о расчете гибкого кольца, нагруженного гидростатическим давлением.

44. При проектировании сквозных ГТС искусственных островов выполняют расчеты для следующих сочетаний волновой, ветровой и вертикальной нагрузок:

- нагрузки и воздействия должны приниматься в наиболее неблагоприятных, но возможных сочетаниях, отдельно для эксплуатационного и строительного периодов;
- при одновременном действии волновой, ветровой и вертикальной нагрузок менее опасную горизонтальную нагрузку принимают с понижающим коэффициентом;
- при проверке устойчивости конструкций сквозных островных оснований в процессе монтажа до крепления их к морскому дну посредством свай расчетные волновую и ветровую нагрузки принимают с понижающим коэффициентом;
- при расчете опор и пролетного строения транспортных эстакад расчетную скорость ветра следует принимать по данным многолетних наблюдений. При этом следует учитывать ветровую нагрузку на верхнее строение, монтажный кран, монтируемую конструкцию, волновую нагрузку – на одну готовую опору и одну сваю незавершенной строительством опоры;
- расчетные нагрузки от веса бурового оборудования на сквозные ГТС необходимо учитывать с учетом динамического эффекта, который учитывается с помощью коэффициента динамичности к статическим нагрузкам.

45. При проектировании сквозных вертикальных ГТС с волновой камерой необходимо учитывать следующие положения:

- более высокие волны, как правило, отражаются сильнее при одинаковой сквозности стены;
- оптимальная эффективность работы сквозных стен в общем случае достигается при отношении ширины волновой камеры к длине волн порядка 0,08–0,10;
- при относительной высоте волн 0,875, при отсутствии граничных условий со стороны берега, равенство коэффициентов прохождения и отражения волн наблюдается при сквозности 0,22;
- уменьшение эффективного объема волновой камеры допускается до некоторого предела, при котором наблюдается резкое снижение коэффициента волногашения и, соответственно, эффективности работы конструкции. При недостаточном объеме волновой камеры коэффициент отражения всегда будет выше коэффициента прохождения волн;
- при отсутствии волновой камеры для определения коэффициентов отражения и прохождения волн рекомендуется использовать формулы 3.4 и 3.5 (глава 3);
- волновая камера должна иметь достаточную ширину для значительного снижения высоты наката волн и переливы через верх сооружения, а также снизить коэффициенты отражения в пользу коэффициентов волногашения, а также заметно снизить придонные скорости и горизонтальные волновые нагрузки.

46. При проектировании сквозных сооружений (в общем случае – пирсов) необходимо учитывать несколько типов нагрузок (рисунок 5.3).

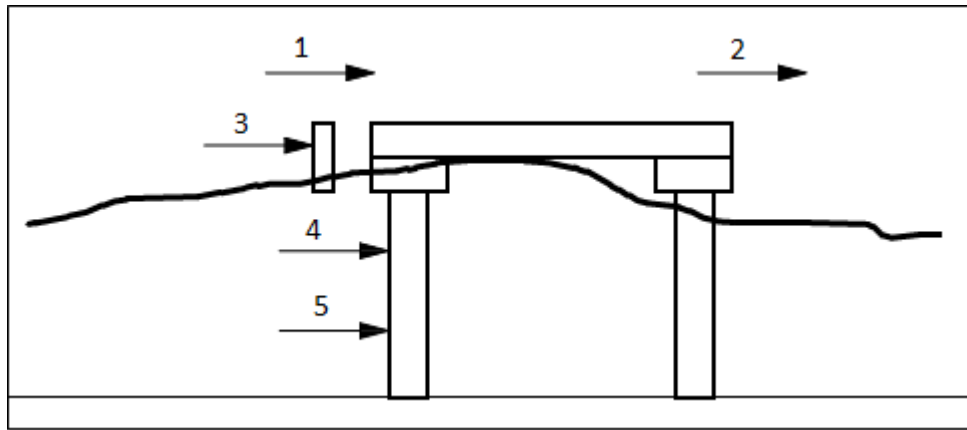


Рисунок 5.3 – Волновые нагрузки на сквозное сооружение:
 1 – перелив, 2 – общее трение, 3 – удар волны о конструкцию, 4 – удар волны о сваю, 5 – пульсирующая нагрузка на сваи

47. Основные типы воздействий, которые необходимо учитывать:

- воздействие волн на сваи;
- горизонтальные нагрузки от волн на балки, перекрытия или другие элементы верхнего строения;
- выталкивающая сила, действующая на погруженные в воду элементы.

48. При исследованиях на пространственных моделях сквозных сооружений необходимо в дополнение к указанным для вертикальных сооружений (раздел 5.3) определять также коэффициенты отражения волн и волногашения.

5.5. Сквозные откосно-ступенчатые конструкции искусственных островов

При проектировании сквозных откосно-ступенчатых сооружений рекомендуется учитывать следующее:

49. Устройство сквозной откосно-ступенчатой конструкции в ряде случаев позволяет добиться высокой эффективности работы волновых камер по сравнению с непроницаемыми вертикальными стенами: наблюдается снижение коэффициентов отражения в пользу коэффициентов волногашения.

50. Сквозная откосно-ступенчатая конструкция показывает значительно большую эффективность по сравнению с непроницаемой вертикальной стеной аналогичных размеров. Максимальное снижение нагрузок наблюдается при больших длинах волн.
51. Сквозные откосно-ступенчатые оградительные сооружения подвержены воздействию всей энергии подходящих расчетных волн. Эту энергию необходимо по возможности разделить на две равные части: половину необходимо отразить (это достигается при коэффициенте отражения, равном 0,5), а остальную часть – погасить (достигается при условии отсутствия переливов через сооружение).
52. В сравнении со сквозными вертикальными стенами сквозные откосно-ступенчатые конструкции позволяют получить коэффициенты работы более близкие к оптимальным, а также меньшие нагрузки на сооружение.
53. Отметку верха непроницаемой части сооружения рекомендуется выбирать в соответствии с пологостью (крутизной) расчетных волн для повышения коэффициента отражения (при необходимости). Такие решения необходимо обосновывать численными расчетами и (или) результатами гидравлического моделирования с проверкой допустимости волновых нагрузок на сооружение и, при необходимости – корректировать объем волновой камеры, необходимый для эффективной работы сооружения.
54. Выбор сквозности необходимо выполнять с учетом наблюдаемых или расчетных коэффициентов отражения волн и волногашения, наличия и высоты переливов через верх сооружения, придонных скоростей и горизонтальных волновых нагрузок.
55. Для снижения материалоемкости проектируемого ГТС необходимо, чтобы волновая камера работала с максимальной эффективностью, которая достигается при одновременном повышении отметки свободной водной поверхности в волновой камере до верха горизонтальной стенки

позади сквозной конструкции и при отсутствии ударов о нижнюю грань верхней ступени.

56. При проектировании сквозных откосно-ступенчатых конструкций необходимо учитывать следующие положения:

- придонные скорости с уменьшением длины волн при неизменной высоте волн заметно растут;
- горизонтальные волновые нагрузки на сквозной откосно-ступенчатый волногаситель при уменьшении длины волн существенно снижаются;
- снижение волнового давления при переходе от расчетного случая со сплошной вертикальной стеной к сквозной откосно-ступенчатой конструкции распределяется неравномерно. Максимальное снижение наблюдается в верхней части непроницаемой стенки последней;
- наибольшее снижение волнового давления при сравнении сплошной вертикальной стены и сквозной откосно-ступенчатой конструкции наблюдается на границе нижней (сплошной) и верхней (сквозной) частей сооружения;
- более крутые волны отражаются от сквозной откосно-ступенчатой конструкции слабее: при снижении длины волн при их неизменной высоте коэффициент отражения снижается, а коэффициент волногашения растёт;
- при увеличении сквозности горизонтальные волновые нагрузки в верхней (сквозной) части сооружения снижаются, а в нижней (непроницаемой) части - остаются практически без изменений (глава 4);
- при увеличении объема волновой камеры коэффициент отражения снижается, коэффициент волногашения растёт, высота наката волн (или высота переливов через верх сооружения) снижается.

57. Для сквозных откосно-ступенчатых и подобных конструкций одновременно с минимизацией материалоемкости необходим поиск оптимального соотношения площади отверстий сквозной конструкции и объема волновой камеры, которое можно обозначить как относительную проводимость сквозной конструкции:

– при первоначальном выборе оптимальной сквозности необходимо подобрать волновую камеру такого объема, чтобы, с одной стороны, работал максимальный ее объем, а с другой – чтобы не возникало вертикальных нагрузок и переливов через сооружение. Другими словами, волновая камера должна работать с максимальной эффективностью;

– в противном случае, при первоначальном выборе объема волновой камеры необходимо подбирать сквозность таким образом, чтобы работал максимальный объем волновой камеры, чтобы наблюдался максимальный перепад отметок водной поверхности в камере при воздействии волн (как показатель эффективности волногашения) и чтобы не возникало вертикальных нагрузок.

58. В первом приближении выполнить эти условия можно, если изменять оба параметра одновременно, чтобы отношение суммарной длины щелей сквозной конструкции на поперечном сечении к площади сечения волновой камеры (рисунок 5.4) оставалось неизменным.

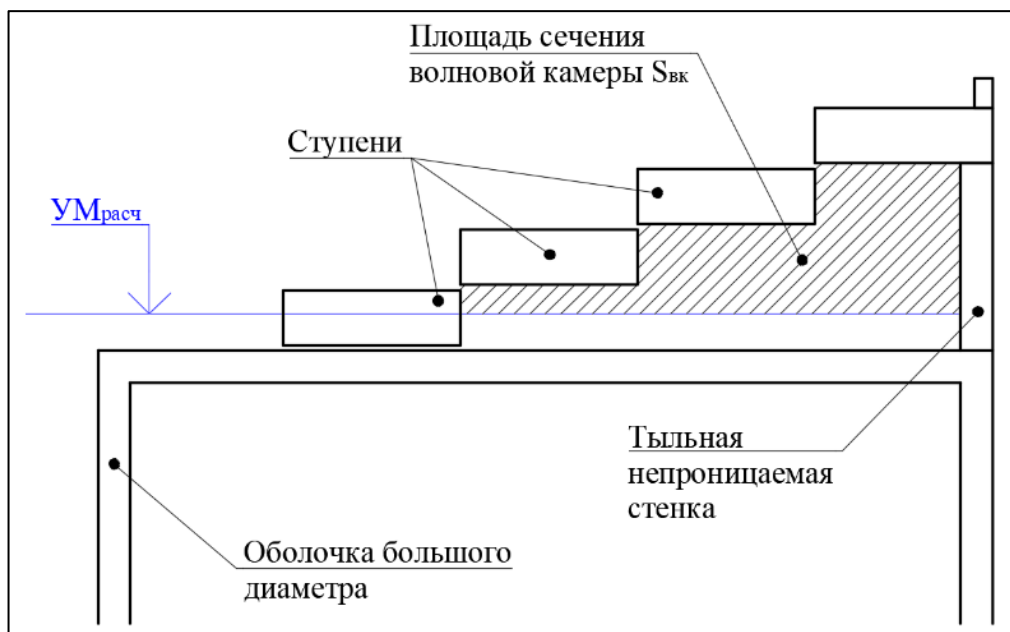


Рисунок 5.4 – Схема определения эффективной площади сечения волновой камеры $S_{вк}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия выполнено большое количество экспериментальных исследований и накоплен большой опыт проектирования, строительства и эксплуатации искусственных островных сооружений в России и в зарубежных странах. Вновь образованные территории в естественных акваториях позволяют решать ряд задач: рекреационные потребности населения, промышленность, судоходство, государственная безопасность, экология и другие. В свою очередь, проектирование искусственного острова в ряде случаев требует обязательного выполнения научных исследований, в том числе методами физического и математического моделирования ГТС. Однако, до сих пор отсутствует методика, которая обобщала бы накопленный опыт и позволяла бы оптимизировать процесс научного обоснования таких проектов.

По результатам выполненной работы можно сделать ряд выводов:

- при первоначальном выборе конструкции ГТС искусственного острова рекомендуется использовать предложенную новую классификацию и критерии применимости конструкций островных сооружений, разработанные по результатам обзора российского и зарубежного опыта проектирования, строительства и эксплуатации указанных сооружений, а также обзора, анализа и теоретических исследований результатов экспериментальных исследований, выполненных в соответствии с темой диссертации;
- при устройстве подводных banquetов для защиты морских откосов рекомендуется использовать зависимости и графики, полученные по результатам обработки данных экспериментальных исследований на двухмерных моделях и приведенные выше в настоящей работе (раздел 2.1);
- экономическая эффективность строительства откосных сооружений в наибольшей степени зависит от глубины акватории. На больших глубинах, как правило, более целесообразным представляется строительство сооружений вертикального профиля;

– ГТС сквозной конструкции в ряде случаев могут оказаться более эффективными и экономичными в сравнении с другими вариантами с аналогичными характеристиками;

– при применении сквозных конструкций оградительных сооружений рекомендуется рассматривать волновую камеру шириной порядка 0,08–0,1 от длины волны. В рамках последующих исследований эта величина может изменяться;

– при недостаточной ширине волновой камеры сквозные вертикальные стены не позволяют значительно снизить высоту наката волн и переливы через верх сооружения и их эффективность снижается вплоть до показателей вертикальной сплошной стены. В то же время, при увеличении ширины волновой камеры наблюдается снижение коэффициентов отражения в пользу волногашения, а также заметное снижение придонных скоростей и горизонтальной составляющей волновых нагрузок;

– уменьшение эффективного объема волновой камеры допускается выполнять до некоторого предела, при достижении которого происходит увеличение коэффициента отражения и к снижению волногасящих свойств сооружения;

– для вертикальных сквозных стен более крутые волны, как правило, отражаются сильнее при одинаковой сквозности стены, а в случае со сквозным откосно-ступенчатым сооружением – наоборот;

– сооружение с широкой волновой камерой или, тем более, сквозной откосно-ступенчатой конструкции в ряде случаев позволяет добиться более высокой эффективности работы волновых камер по сравнению с непроницаемыми вертикальными стенами: наблюдается снижение коэффициентов отражения и отметок наката волн (а при недостаточной высоте сооружения – высоты переливов). Нагрузки на сооружение с откосно-ступенчатым сквозным волногасителем по сравнению со сплошной вертикальной стеной оказались ниже на 33–39% в зависимости от длины накатывающих волн,

максимальный прирост эффективности при этом наблюдается при больших длинах волн;

- изменяемые параметры изучаемого ГТС должны быть управляемыми, совместимыми и независимыми. Число уровней для каждого из параметров должно быть не менее двух, рекомендуется назначение уровней каждого параметра, равностоящих друг от друга. Рекомендуется применение симметричного планирования экспериментов;

- при достаточном технико-экономическом обосновании островные сооружения могут образовывать островные комплексы, состоящие из нескольких островов, связанных друг с другом и с берегом транспортными линиями;

- выбор конструкции, размеров, планового расположения островных ГТС, конструктивных решений мостовых соединений должны подтверждаться по итогам моделирования поля течений в прилегающей к островным сооружениям акватории, в том числе в зоне волновой тени между островом и берегом методами физического или математического моделирования;

- научное обоснование проектирования искусственного острова или островного комплекса рекомендуется выполнять с учетом положений разработанных методических рекомендаций.

Выводы по результатам исследований на физических моделях сквозных откосно-ступенчатых сооружений:

- при проектировании сквозных откосно-ступенчатых ограждающих сооружений необходимо исходить из условия, что всю энергию подходящей волны необходимо, если возможно, разделить на две равные части: отраженную и погашенную, что достигается при коэффициенте отражения, равном 0,5 и отсутствием переливов через верх сооружения соответственно;

- придонные волновые скорости с увеличением крутизны волн при их неизменной высоте заметно растут;

- горизонтальные волновые нагрузки на сооружение при уменьшении длины волн существенно снижаются;

- снижение волнового давления при переходе от расчетного случая со сплошной вертикальной стеной к сквозной откосно-ступенчатой конструкции распределяется неравномерно. Максимальное снижение наблюдается на границе нижней (сплошной) и верхней (сквозной) частей сооружения;
- для более пологих волн, воздействующих на сооружение наблюдается повышение отметок профиля стоячих волн, поэтому рекомендуется выбирать отметку верха непроницаемой части сооружения в соответствии с пологостью (крутизной) расчетных волн для повышения коэффициента отражения. При этом необходимо обосновывать такие решения численными расчетами и (или) результатами гидравлического моделирования с проверкой волновых нагрузок на сооружение и, при необходимости, корректировать объем волновой камеры, необходимый для эффективной работы сооружения;
- эпюра волнового давления в волновой камере сквозной откосно-ступенчатой конструкции имеет линейный профиль;
- для откосно-ступенчатой конструкции с определенными характеристиками (в том числе с фиксированным объемом волновой камеры) существует оптимальное значение сквозности, после достижения которого дальнейшее его изменение будет приводить к снижению эффективности работы сооружения (изменение коэффициентов отражения и волногашения, увеличению нагрузок и отметок накатов/переливов);
- при увеличении сквозности конструкции придонные скорости растут, а горизонтальные волновые нагрузки на сооружение заметно снижаются;
- при увеличении сквозности горизонтальные волновые нагрузки в верхней (сквозной) части сооружения снижаются, а в нижней (непроницаемой) части – остаются практически без изменений. Таким образом, эффективность работы всего сооружения обеспечивается его верхней, сквозной частью;
- для достижения максимальной эффективности работы волновой камеры и, соответственно, минимальной материалоемкости, необходимо чтобы отметка свободной водной поверхности в волновой камере в момент наката волн

достигала отметки верха тыльной вертикальной стенки, а удары о перекрытие в верхней части волновой камеры отсутствовали;

– для подбора оптимальных параметров конструкции оградительных ГТС искусственных островов на этапе научного обоснования проектирования необходимо выполнять отдельные исследования (серии опытов) для выбора каждого из ключевых параметров таких сооружений. При этом, для снижения трудоемкости исследований необходимо выполнить ранжирование параметров сооружения по убыванию влияния единицы изменения параметра на эффективность работы конструкции, как было показано в разделе 4.1. Затем необходимо выбрать параметры конструкции, которые будут изменяться и поочередно изменять каждый из них, выбирая на каждом этапе оптимальные значения.

– для сквозных откосно-ступенчатых и подобных конструкций одновременно с минимизацией материалоемкости необходим поиск оптимального соотношения сквозности конструкции и объема волновой камеры:

- а) При первоначальном выборе оптимальной сквозности необходимо подобрать волновую камеру такого объема, чтобы, с одной стороны, работал максимальный ее объем, а с другой – чтобы не возникало вертикальных нагрузок и переливов через сооружение. Другими словами, волновая камера должна работать с максимальной эффективностью;
- б) В противном случае, при первоначальном выборе объема волновой камеры необходимо подбирать сквозность таким образом, чтобы работал максимальный объем волновой камеры, чтобы наблюдался максимальный перепад отметок водной поверхности в камере при воздействии волн (как показатель эффективности волногашения) и чтобы не возникало вертикальных нагрузок.

В первом приближении выполнить эти условия можно, если изменять оба параметра одновременно, чтобы отношение суммарной площади щелей

сквозной конструкции и объема волновой камеры оставалось неизменным. Указанное отношение можно обозначить как относительную проводимость сквозной конструкции;

Разработанные методические рекомендации научного обоснования проектов искусственных островов позволяют:

- обосновывать выбор места строительства искусственного острова;
- выбирать тип конструкции и основные параметры островных сооружений с использованием предложенной классификации и критериев применимости конструкций;
- определять набор ключевых параметров сооружения для выполнения научных исследований и объем работ при их выполнении с учетом требований, предъявляемых к таким параметрам;
- оптимизировать процесс научного обоснования при проектировании искусственных островных сооружений;
- выбирать конструктивное исполнение объектов транспортной инфраструктуры искусственных островов и островных комплексов;
- определять порядок необходимых расчетов, перечень контролируемых параметров при моделировании, особенности планировочной организации конструкций, основные характеристики откосных, вертикальных и некоторых специальных типов островных ГТС, условия их устойчивости и безопасности;
- использовать предложенную методику научного обоснования при проектировании сквозных откосно-ступенчатых ГТС искусственных островов.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

Выполненные в настоящей работе исследования позволили выявить приоритетные направления дальнейших исследований: необходимо выполнение ряда исследований на физических моделях сквозных откосно-ступенчатых конструкций для построения математических моделей и номограмм по выбору

оптимальных соотношений объема волновой камеры и сквозности сооружения при известных основных параметрах воздействующих ветровых волн.

Для расширения границ применимости предложенного метода определения основных размеров подводного банкета у откосных сооружений островов (в сторону уменьшения относительной глубины воды перед бермой откоса) также необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

1. Кондрашин К. Г., Стрелков С. П., Пилипенко В. Н. Комплексная оценка экологического риска при формировании искусственных островов и инженерно-строительных изысканиях на территории искусственно-созданного острова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2019. – № 4 (30). – С. 33-38.
2. Чипурина М. А., Арников А. Е. Искусственные острова как "зеленый" вариант решения проблемы урбанизации // Сборник научных трудов 8-й Международной молодежной научной конференции "Юность и знания - гарантия успеха - 2021", Курск, 2021.
3. Добрицына И. А. От постмодернизма – к нелинейной архитектуре: дис. ... д-ра архитектуры / Добрицына И. А. – М., 2004. – 416 с.
4. Бессмертная Е. А., Бессмертный А. Ф., Рыжий М. Н. Искусственные островные комплексы в условиях прибрежной зоны Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2013. – № 27. – С. 446-450.
5. Keskeys P. What Would You Build Here? 10 Stellar Firms Compete to Design China's "Pearl Eco-Island" // URL:<https://architizer.com/blog/inspiration/industry/what-would-you-build-here-pearl-eco-island/>.
6. Neftegaz.ru Кашаган месторождение // URL:<https://neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/141663-kashagan/>.
7. Вялый Е. А., Макаров К. Н. Методика математического моделирования волнения на акваториях островных сооружений // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции "Моря России: год науки и технологий в РФ - десятилетие наук об океане ООН", Севастополь, 2021.
8. Макаров К. Н., Королев К. И. Конфигурация оградительных сооружений островных портов на Черноморском побережье Кавказа // Строительство

- в прибрежных курортных регионах: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Сочи, 2008.
9. Иванов А. Н., Кобзева Ю. А. Географические аспекты создания искусственных островов // Геосистемы северо-восточной Азии, Владивосток, 2021, С. 234-238.
 10. Постановление Правительства РФ от 19 января 2000 г. № 44 Об утверждении Порядка создания, эксплуатации и использования искусственных островов, сооружений и установок во внутренних морских водах и в территориальном море Российской Федерации, М., 2000.
 11. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – СПб : Стандартиформ, 2018.
 12. СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения. – М. : Стандартиформ, 2012.
 13. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М. : Стандартиформ, 2019.
 14. Sharp J. J., Hydraulic modelling: пер. с англ. // Мир, 1984.
 15. Тлявлиная Г. В., Тлявлин Р. М., Вялый Е. А. Портовые гидротехнические сооружения: требования к физическому моделированию волновых воздействий // Транспортное строительство. – 2022. – № 3. – С. 24-26.
 16. Тлявлин Р. М., Тлявлиная Г. В., Дроботько С. Ю. Физическое моделирование взаимодействия волнения с проектируемыми берегоукрепительными сооружениями Имеретинской низменности // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2011. – т. 7, № 2. – С. 112-116.
 17. Макаров К. Н., Шевцов В. С., Мишин С. В. Методические подходы к процессу создания искусственных островных комплексов // Недвижимость: экономика, управление. – 2014. – № 3-4. – С. 80-85.

18. Семенов Д. А., Калошина С. В. Инновационные технологии строительства искусственных островов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2016. – № 4. – С. 80-92.
19. Abel R. B., Connell S., Della Croce N. Coastal ocean space utilization III // CRC Press, 1995. – 688 с.
20. Крылов Д. Ю. Острова из мусора // Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Направления развития российской науки: теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов», Тверь, 2021.
21. Фотостранник Аэропорты на островах // URL:<https://fotostranik.com/aeroportyi-na-ostrovah.html>.
22. Chang J.-N., Chang Y.-L., Wang H.-Y. A study of the effect of recycled material on the durability of ocean engineering concrete in a hot-spring environment // 8th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science, Zhoushan, China, 2020.
23. A. Vaughan Is this the future? Dutch plan vast windfarm island in North Sea // The Guardian. URL:<https://www.theguardian.com/environment/2017/dec/29/is-this-the-future-dutch-plan-vast-windfarm-island-in-north-sea>.
24. Сытников В. Е., Кашеев А. В., Рябин Т. В. Перспективы создания сверхпроводящих кабельных линий для передачи электроэнергии на большие расстояния // Энергия единой сети. – 2018. – № 1(36). – С. 34-40.
25. Кизилова С. А. Предпосылки возведения искусственных островных территорий XXI века // Architecture and Modern Information Technologies. – 2018. – № 1 (42). – С. 187-200.
26. История, настоящее и перспективы острова Palm Jumeirah // URL:<http://oceana-the-palm-jumeirah.ru/ostrov-palm-jumeirah>.
27. Speight J. G., Handbook of Offshore Oil and Gas Operations. – Waltham, Massachusetts : Gulf Professional Pub, Elsevier, 2015.

28. Курило Е. Ю., Павлов А. М., Иванов М. О. Целесообразность применения искусственных ледовых островов в арктических условиях для разведочного бурения / Синергия наук. – 2016. – № 6. – С. 321-326.
29. Новые конструкции причальных сооружений за рубежом // СоюзморНИИпроект, М. : ЦБНТИ ММФ, 1972. – 390 с.
30. Вялый Е. А. Проектирование искусственных островных комплексов. Накопленный опыт и перспективы // Материалы XI Международной научно-практической конференции "Строительство в прибрежных курортных регионах", Сочи, 2020.
31. Бондарев Л. Г. Антропогенные острова // Земля и Вселенная. – 2004. – № 6. – С. 27-34.
32. Travel.ru В Сеуле появился плавучий остров // URL:<https://www.travel.ru/news/2011/06/14/190288.html>.
33. MyWorld.ru Остров фламинго // URL:<https://omyworld.ru/4116#:~:text=%D0%9D%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D0%BE%20%D0%BE%D1%82%20%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B0%20%D0%9A%D0%B8%D0%BC%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%BB%D0%B8%20%D0%B2,%D0%BD%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D1%8>.
34. Neftegaz.ru Грунтово-ледовые острова Новые технологии для освоения ресурсов газа на шельфе Карского моря // URL:<https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/770125-gruntovo-ledovye-ostrova-novye-tehnologii-dlya-osvoeniya-resursov-gaza-na-shelfe-karskogo-morya/>.
35. Bahrain About Durrat Al Bahrain // URL:<https://www.durratbahrain.com/#firstPage>.
36. Стасенко М. Ю. Жемчужина Катара // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2009. – № 6(125). – С. 86-89.

37. Володина Н. И. Искусственные острова в Китае // Архитектура и время. – 2022. – № 1. – С. 2-11.
38. Гуляев Л. Г. Переправа через морской пролив Эресунн: европейский опыт реализации крупных транспортных проектов // Менеджмент и бизнес-администрирование. – 2014. – № 3. – С. 174-179.
39. Остров Феникс - остров роскоши в Китае // URL:https://china-sky.ru/tourism/sea_tour/Sanya_Bay/ostrov-feniks.
40. Раздолгин А. А., Скориков Ю. А., Кронштадтская крепость, Л.: Стройиздат, Ленингр. Отделение, ил. ISBN 5-274-00232-3, 1988.
41. Люгай Д. В., Караев И. П. К вопросу освоения газовых месторождений Обской губы с использованием искусственных островных сооружений // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. – 2018. – № 1. – С. 2-5.
42. Пономарева Е. В., Абдуллина Ю. И. Некоторые проблемные аспекты правового регулирования искусственно созданных земельных участков // Символ науки. – 2016. – № 9-1.
43. Иванова Т. Г. Некоторые особенности правового статуса намывной территории в современных условиях // Вестник СПбГУ. Серия 14. Право. – 2011. – № 4. – С. 10-17.
44. Сойников М. А. Проблемы правового регулирования отношений, связанных с искусственными земельными участками // Правовые вопросы недвижимости. – 2014. – № 1. – С. 28-32.
45. Замышляев Д. В., Задорожнюк Е. И. К проблеме создания искусственных территорий // Юрист. – 2008. – № 6. – С. 36-39.
46. Зубова О. Искусственные острова – новое слово в экологической безопасности Финского залива // «Наша версия». URL:<https://neva.versia.ru/ambicioznyj-proekt-po-stroitelstvu-iskusstvennyh-ostrovov-poluchil-odobrenie-yekologov-i-inzhenerov>.
47. Гидравлическое моделирование устойчивости проектируемых берегозащитных сооружений и пляжа у пос. Волна Темрюкского района

- Краснодарского края: отчет о НИР / Филиал АО ЦНИИС "НИЦ "Морские берега". – Сочи, 2004.
- 48.Скорик В. Остров "Федерация" и другие проекты // Морской флот. – 2007. – № 6. – С. 20-21.
- 49.Гидравлическое моделирование устойчивости и волногашения оградительных сооружений и математическое моделирование волнового режима и течений в акватории марины "Хомар": отчет о НИР // Филиал АО ЦНИИС "НИЦ "Морские берега". – Сочи, 2006.
- 50.Бааджи В. Г., Рогачко С. И., Шунько Н. В. Берегозащитное сооружение откосного профиля с камерой гашения // Вестник МГСУ. – 2013. – № 4. – С. 137-142.
- 51.Научные исследования особенностей формирования волногасящих пляжей на искусственных островах: отчет о НИР // Филиал АО ЦНИИС "НИЦ "Морские берега". – Сочи, 2009.
- 52.Макаров К. Н. Моделирование островного галечного пляжа // Вестник МГСУ. – 2013. – № 11. – С. 200-209.
- 53.Макаров Н. К. Математическая модель динамики галечных пляжей искусственных островных комплексов // Гидротехника. – 2012. – № 2(27). – С. 84-87.
- 54.Макаров К. Н. Искусственные островные сооружения на черноморском побережье России // Труды Международной конференции «Создание и использование земельных участков на берегах и акватории водоёмов», г. Новосибирск, 2009.
- 55.Bung D.-B., Tullis B.-P. Hydraulic Structures // 7th International Symposium on Hydraulic Structures, Aachen, Germany, 2018.
- 56.Reis M. T., Silva L. G., Neves M. G. Physical modelling as a fundamental tool for the design of harbours and maritime structures // PIANC yearbook. – 2014. – С. 135-145.

57. СП 277.1325800.2016 Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования. – М. : Стандартинформ, 2016.
58. Силкина Е. Е., Улицкая Н. Ю., Акимова М. С. Создание искусственных островов в России и за рубежом // СтройМного. – 2017. – № 2(7). – С. 8.
59. Питалев И. МИД Китая назвал острова в Южно-Китайском море законной территорией страны // URL:<https://ria.ru/20180503/1519806453.html>.
60. Восконьян В. Г. Строительство искусственного острова // Современные наукоемкие технологии Создание искусственных островов в России и за рубежом. – 2006. – № 8. – С. 84-86.
61. Федеральный закон № 187-ФЗ от 30 ноября 1995 г. "О континентальном шельфе Российской Федерации". – М., 1995.
62. Тлявлиная Г. В., Тлявлин Р. М. Техническое регулирование в области проектирования берегозащитных сооружений // Гидротехника. – 2018. – № 3. – С. 70-72.
63. Корытова И. В., Пантелеев В. Г., Фролов А. Н. Применение способа гидромеханизации для создания на шельфе искусственных островов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2015. – № 277. – С. 11-19.
64. Симаков Г. В., Шхинек К. Н., Смелов В. А., Марченко Д. В., Храпатый Н. Г. Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе – Л. : Судостроение, 1989. – 328 с.
65. Халфин И. Ш., Воздействие волн на морские нефтегазопромысловые сооружения – М. : Недра, 1990. – 312 с.
66. Макаров К. Н., Вялый Е. А. Моделирование деформаций откосов искусственного намывного острова // Гидротехника. – 2020. – № 1 (58). – С. 30-33.

- 67.Макаров К. Н., Вялый Е. А. Искусственные острова на побережье города Сочи // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2021. – № 1 (264). – С. 18-23.
- 68.Макаров К. Н., Королев К. И. Будущее островных портов и гаваней // Мир транспорта. – 2007. – № 4. – С. 100-105.
- 69.Bonasia J. J. Civil Engineering Considerations // Industrial Port Islands. - Final Technical Rep. to NSF – RANN, 1975.
- 70.Пат. RU 65902 U1 Россия. Островной гостиничный комплекс на металлических плавучих платформах / Ефимкин А. В. ; заявитель и патентообладатель ; опубл. 27.04.2007 – 3 с.
- 71.Пат. RU 2545128 С1 Россия. Плавучий остров / Новиков А. А. ; заявитель и патентообладатель ; опубл. 14.01.2014 – 3 с.
- 72.Пат. RU 2679521 С2 Россия. Плавающий остров, его конструкция и технология сборки / Феоктистов А. И. ; заявитель и патентообладатель ; опубл. 17.02.2016 – 3 с.
- 73.Федеральный закон №155-ФЗ от 31.07.1998г. "О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации". – М., 1998.
- 74.Горная энциклопедия Искусственный остров // URL:[http:// www.mining-enc.ru/i/iskusstvennyj-ostrov](http://www.mining-enc.ru/i/iskusstvennyj-ostrov).
- 75.Тлявлиная Г. В., Вялый Е. А. Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2022. – № 2. – С. 53-69.
- 76.Макаров К. Н., Вялый Е. А. Применимость природного камня в современной морской гидротехнике // Материалы XIII Международной научно-практической конференции в рамках Международного туристского форума "Трансформация экономики и социально-культурной сферы курортно-туристских дестинаций России", Сочи, 2022.

- 77.S. Sigurdarson, J. W. van der Meer Icelandic-type berm breakwater for the Hambantota artificial island revetment, application of geometrical design rules // Coastal engineering, 2014.
- 78.J. W. Van der Meer, S. Sigurdarson Geometrical Design of Berm Breakwaters // Proceedings of 34th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Seoul, Korea, 2014.
- 79.Буров А. М., Иванов М. В., Плетнев М. С. Конструктивные особенности возведения шпунтовых искусственных островов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия Строительство и архитектура. – 2019. – № 3 (76). – С. 15-21.
- 80.Пат. SU 1836522A3 СССР. Гидротехническое сооружение для защиты акватории и пляжа / Николаевский М. ; заявитель и патентообладатель ; опубл. 20.09.1991 – 3 с.
- 81.Пат. RU 2107773 C1 Россия. Способ монтажа искусственного острова / Федоров Л. Ф. ; заявитель и патентообладатель ; опубл. 08.06.1994 – 3 с.
- 82.Пат. RU 126675 U1 Россия. Мобильное островное сооружение для мелководных шельфовых месторождений в арктическом бассейне / Мацкевич А. В. ; заявитель и патентообладатель ; опубл. 12.12.2012 – 3 с.
- 83.Пат. RU 63373 U1 Россия. Мобильный искусственный остров / Полесский В. В. ; заявитель и патентообладатель ; опубл. 19.10.2005 – 3 с.
- 84.Пат. SU 1700138 A1 СССР. Конструкция глубоководного искусственного острова и способ его возведения / Черевач В. Д., Сухарев Ю. А. ; заявитель и патентообладатель ; опубл. 23.12.1991 – 3 с.
- 85.Власова Т. В. Искусственный остров и его влияние на экосистему // Молодой ученый. – 2019. – № 50(288). – С. 66-67.
- 86.Глотов В. Е., Глотова Л. П. Обеспечение экологической безопасности добычи углеводородов на Примагаданском шельфе (Северная часть

- Охотского моря) // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. – 2010. – т. 12, № 1-5. – С. 1208-1211.
87. Янкевский А. В., Ганченко Д. Д., Чернеева Е. В., Щерба В. А. Экологические проблемы добычи нефти и газа на шельфе мирового океана // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – т. 9, № 6. – С. 40.
88. Семенов Д. А., Клевеко В. И. Использование геосинтетических оболочек в строительстве // Вестник ПНИПУ. – 2018. – т. 9, № 2. – С. 78-87.
89. Пиявский С. А. Применение геосинтетических оболочек в гидротехническом строительстве // Вестник МГСУ. – 2012. – № 6. – С. 54-61.
90. Голотина Ю. И., Михеев Г. В. Искусственные острова: методы и технологии строительства // Сборник статей Международной науч.-практич. конференции "Экологические, инженерно-экономические, правовые и управленческие аспекты развития строительства и транспортной инфраструктуры", Краснодар, 2017.
91. ЦПИ 22/43 Технические указания по применению габионов для усиления земляного полотна. – М., : ПТКБ ЦП МПС, 1998.
92. Пат. SU 1165741 А Россия. Искусственный намораживаемый остров / Макеенко В. И., Мясковский Е. Г., Мирзоев Д. А. ; заявитель и патентообладатель ; опубл. 16.04.1981 – 4 с.
93. Горгуца Е. Ю., Курило Е. Ю. Строительство искусственных ледовых островов в условиях Арктики // Гидротехника. XXI век. – 2017. – № 4. – С. 54-57.
94. Зотов Д. А., Потехин А. И., Эркин Д. Р. Увеличение прочностных характеристик искусственных ледовых островов // Материалы Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового океана", Тюмень, 2023.

95. Зотов Д. А. Повышение прочности и скорости строительства искусственных ледовых островов для поисково-разведочного бурения // *Инновации и инвестиции*. – 2023. – № 2. – С. 175-179.
96. T. Pullen, E. Silva, J.-G. Zhou Laboratory measurements of overtopping spatial distributions under the effect of wind // *8th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science, Zhoushan, China, 2020*.
97. T.-X. Tho, L.-H. Trung Wave overtopping at seawalls with bullnose // *8th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science, Zhoushan, China, 2020*.
98. Мальцев В. П., Макаров К. Н., Николаевский М. Ю. Разработка и исследование островного пляжного комплекса // *Гидротехническое строительство*. – 1993. – № 11. – С. 15-17.
99. E. A. Vyaly, K. N. Makarov, G. V. Tlyavlina Permeable constructions of artificial islands // *Power Technology and engineering*. – 2022. – № 1 (56). – С. 52-58.
100. Вялый Е. А., Макаров К. Н., Тлявлинка Г. В. Проницаемые конструкции искусственных островов // *Гидротехническое строительство*. – 2021. – № 12. – С. 21-28.
101. X. Sun, C. Zhang, D. Ning Experimental study on hydrodynamic characteristics of dual-pontoon breakwater in transient waves // *8th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science, Zhoushan, China, 2020*.
102. Vyaly E. A., Makarov K. N. Classification and application of protective structures of artificial islands // *Power technology and engineering*. – 2022. – т. 55, № 5. – С. 667-671.
103. Вялый Е. А., Макаров К. Н. Классификация и условия применения конструкций оградительных сооружений искусственных островов // *Гидротехническое строительство*. – 2021. – № 7. – С. 40-44.

104. РИЦ ФГБОУ ВО «СГУ» Совершенствование методов проектирования инженерной инфраструктуры прибрежных регионов: монография. – Сочи, 2023. – 158 с.
105. Kline S. J. Similitude and Approximation Theory // New York: Springer, 1986. – 248 с.
106. Ляхтер В. М., Прудовский А. М., Гидравлическое моделирование, М. : Энергоатомиздат, 1984. – 392 с.
107. Баренблатт Г. И., Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика, Л. : Гидрометеиздат, 1982. – 257 с.
108. Дейли Д., Харлеман Д. Механика жидкости, М., Перевод с англ. : "Энергия", 1971. – 480 с.
109. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений, Л: Энергия, 1967. – 236 с.
110. Разработка нового метода защиты морских берегов на базе сооружений проницаемой конструкции: отчет о НИР // ЧО ЦНИИС. – Сочи, 1990.
111. Разработка предложений по берегозащите Каспийского побережья Дагестанской АССР в условиях повышения уровня моря. Раздел II. Гидравлическое и математическое моделирование: отчет о НИР // ЧО ЦНИИС. – Сочи, 1989.
112. Результаты моделирования конструкций берегозащитного сооружения для ТЭО неотложных мероприятий на 1993-1995 гг. по предотвращению затопления и подтопления объектов в прибрежной зоне Каспийского моря России: отчет о НИР // ЧО ЦНИИС. – Сочи, 1993.
113. Физическое и математическое моделирование взаимодействия штормовых волн с гидротехническими сооружениями острова «Югра»: отчет о НИР // ЧО ЦНИИС. – Сочи, 2002.

114. Физическое моделирование взаимодействия штормовых волн с гидротехническими сооружениями острова «Югра» : отчет о НИР // ЧО ЦНИИС. – Сочи, 2002.
115. Исследование волновых нагрузок и воздействий на волногасящие сооружения с волновой камерой: отчет о НИОКР // Филиал АО ЦНИИС «НИЦ «Морские берега». – Сочи, 2016
116. Gawande S., Kashyape P. A. Review of hydraulic model studies for port development // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2017. – т. 04, № 04. – С. 2350-2353.
117. Briggs M. J. Basics of Physical Modeling in Coastal and Hydraulic Engineering // Coastal and Hydraulics Laboratory - ERDC - U.S. Army. – С. 1-11, 2013.
118. Goda Y., Random sea and design of maritime structures, Tokyo: University of Tokyo Press, 1985.
119. Hughes S. A. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. Volume 7. Advanced series on ocean engineering // Singapore and River Edge, NJ: World Scientific, 1993.
120. Young D. F., Munson B. R., Okiishi T. H. A brief introduction to fluid mechanics // John Wiley and Sons, Inc, 1997. – 608 с.
121. Takahashi S., Design of vertical breakwaters // Yokosuka city, Japan: Port and airport research institute, 1996. – 105 с.
122. Тлявлиная Г. В. Особенности проектирования морских берегозащитных сооружений на приливных морях // Транспортное строительство. – 2016. – № 4/2016. – С. 4-6.
123. Лищишин И. В., Тлявлиная Г. В., Тлявлин Р. М. Исследования для проектирования мостовых переходов в особо сложных гидрологических условиях // Гидротехника. – 2010. – № 3. – С. 36-37.
124. Akeda Y. S. Design and Construction of Seawater Exchange Breakwaters // Coastal Engineering. – 1998. – № 2. – С. 1539-1552.

125. Sloth P. Berm Breakwaters – Influence of Stone Gradation, Permeability and Armouring // Coastal Engineering. – 1998. – № 2. – С. 1394-1406.
126. Sigurdarson S. Berm Breakwaters, Fifteen Years' Experience // Coastal Engineering. – 1998. – № 2. – С. 1407-1420.
127. Чернеев А. М., Шевцова М. А., Черкасов А. В. Воздействие естественных нагрузок на искусственные острова // Перспективы науки. – 2019. – № 6 (117). – С. 94-97.
128. Брюм А. И., Воронов П. А., Гинсбарг Р. И. Морские порты и портовые сооружения, М. : «Морской транспорт», 1959. – 448 с.
129. Asorakos S. Kolkbildung and Kolkenschutzmassuahme im offshore // Bereich Meerestechnik. – 1982. – т. 3, № 4. – С. 105-113.
130. Удовиченко В. Н., Яковлев П. И. Морские и речные гидротехнические сооружения, М. : "Транспорт", 1976. – 416 с.