

*На правах рукописи*



Вялый Елисей Александрович

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

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Сочи – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сочинский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Макаров Константин Николаевич**

Официальные оппоненты: **Беллендир Евгений Николаевич**  
доктор технических наук, Акционерное общество  
«Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука», генеральный директор

**Шунько Наталья Владимировна**  
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Научно-образовательный центр «Гидротехника», руководитель центра

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится 19 марта 2024 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.339.07 при ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИУ МГСУ и на сайте [www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

А. С. Бестужева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **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 в условиях дефицита площадей пляжевой полосы и возрастающей антропогенной нагрузки на эти площади. Современная архитектура сталкивается с вызовами выбора и внедрения новых стратегий, обусловленных достижениями науки и техники. 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. 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, 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. 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. В соответствии с действующим законодательством, 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 СП 38.13330.2018, нагрузки и воздействия волн на сооружения первого класса (а искусственные острова согласно СП 58.13330.2012 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 действующими нормативами. 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.

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.

### **Цели 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 островных ГТС, 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** отражены актуальность и разработанность темы диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, сформулирована цель исследования и поставлены соответствующие задачи, выделена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, личный вклад автора, приведены защищаемые положения, а также данные по степени достоверности и апробации результатов.

**В первой главе** приведен обзор отечественных и зарубежных исследований, затрагивающих тему проектирования и строительства островных сооружений. Дан краткий анализ работ Воскоњьян В. Г., Марченко Д. В., Раздолгина А. А., Семенова Д. А., Симакова Г. В., Скорик В., Скорилова Ю. А.,

Смелова В. А., Халфина И. Ш., Шхинек К. Н., J. W. van der Meer, S. Sigurdarson. Обобщен накопленный российский и мировой опыт, рассмотрены проблемы и перспективы строительства искусственных островов.

Приведен обзор опыта строительства и эксплуатации существующих и проектирования новых искусственных островов в различных странах мира в различных топографических, гидрологических и гидрометеорологических условиях. Обозначены трудности и инженерно-технические вызовы, с которыми сталкиваются проектировщики островных сооружений на сегодняшний день.

Отмечается, что искусственные острова, как правило, строятся для создания территорий под хозяйственные нужды (рекреационные, для устройства ветропарков, под аэропорты и т.п.), а также для разведки и добычи полезных ископаемых в шельфовой зоне.

Приведен ряд примеров физического и математического моделирования взаимодействия конструкций искусственных островов с волнением, выполненных для обоснования их проектов, в том числе, рекреационных островов на Черноморском побережье России. По данным выполненного обзора выявлены основные характеристики гидротехнических сооружений искусственных островов, которые определяются по результатам моделирования (компоновка, размеры, конструктивные характеристики, влияние на береговые процессы и т.п.).

Для определения условий применимости тех или иных конструкций искусственных островов **во второй главе** работы был проанализирован накопленный опыт их проектирования, строительства и эксплуатации в России и за рубежом.

Помимо общераспространенных типов сооружений были рассмотрены такие конструкции, как ограждения из геосинтетических оболочек, острова-польдеры и другие специальные типы. Отдельную группу оградительных сооружений островных ГТС составляют сквозные конструкции. По принципу работы они частично отражают, частично гасят и частично пропускают волны. Опираясь на опыт проектирования, строительства и эксплуатации таких сооружений можно говорить об их высокой эффективности и более низкой (в сравнении с традиционными сооружениями) материалоемкости. Все рассмотренные типы конструкций послужили дополнением к существующей классификации конструкций ограждений искусственных островов по конструктивному признаку. Предложенная дополненная классификация приведена на рисунке 1.

Был выполнен анализ накопленного опыта эксплуатации различных типов оградительных ГТС в различных природных условиях, а также большой объем данных лабораторных исследований. Таким образом, были определены условия применимости тех или иных конструкций.

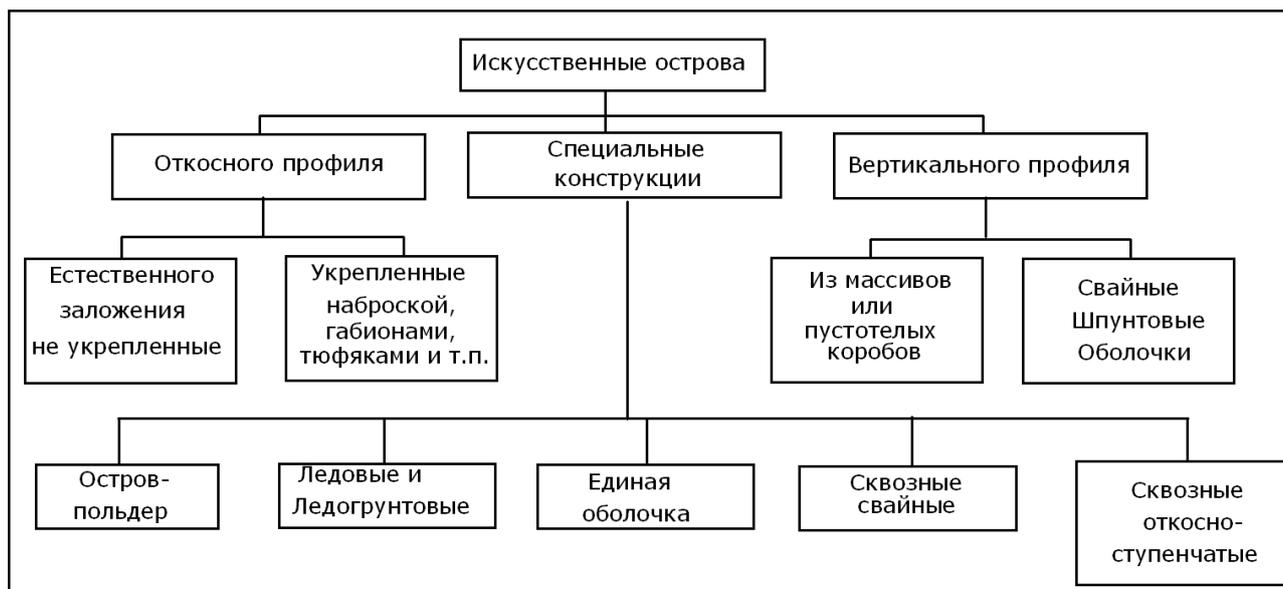


Рисунок 1 - Предлагаемая классификация оградительных сооружений искусственных островов

По результатам анализа работы оградительных сооружений искусственных островов, наиболее перспективными представляются волногасители в виде сквозных конструкций с волновой камерой, в частности в откосно-ступенчатом исполнении.

В действующих нормативах по проектированию берегозащитных сооружений и в ранее выполненных исследованиях предложены теоретические зависимости для определения коэффициентов отражения, прохождения и гашения волн при различных параметрах сквозности стен, ширины волновой камеры, угла наклона стены к горизонту. Для проверки указанной расчетной методики **в третьей главе** работы были выполнены специальные эксперименты на гидравлической модели. Было установлено, что использованная математическая модель дает заметные расхождения с данными экспериментов. Поэтому была выполнена калибровка модели.

Сопоставление результатов расчетов и экспериментов приведено на рисунке 2. После калибровки модели расхождения расчетных и экспериментальных данных по коэффициентам отражения и прохождения волн в большинстве случаев не превышают 15%.

**В четвертой главе** работы для получения более полного представления об основных преимуществах и для разработки методики выбора основных параметров сквозных сооружений искусственных островов, а также для дальнейшей формулировки рекомендаций научного обоснования конструкций островных сооружений было выполнено четыре серии экспериментальных исследований на физических моделях.

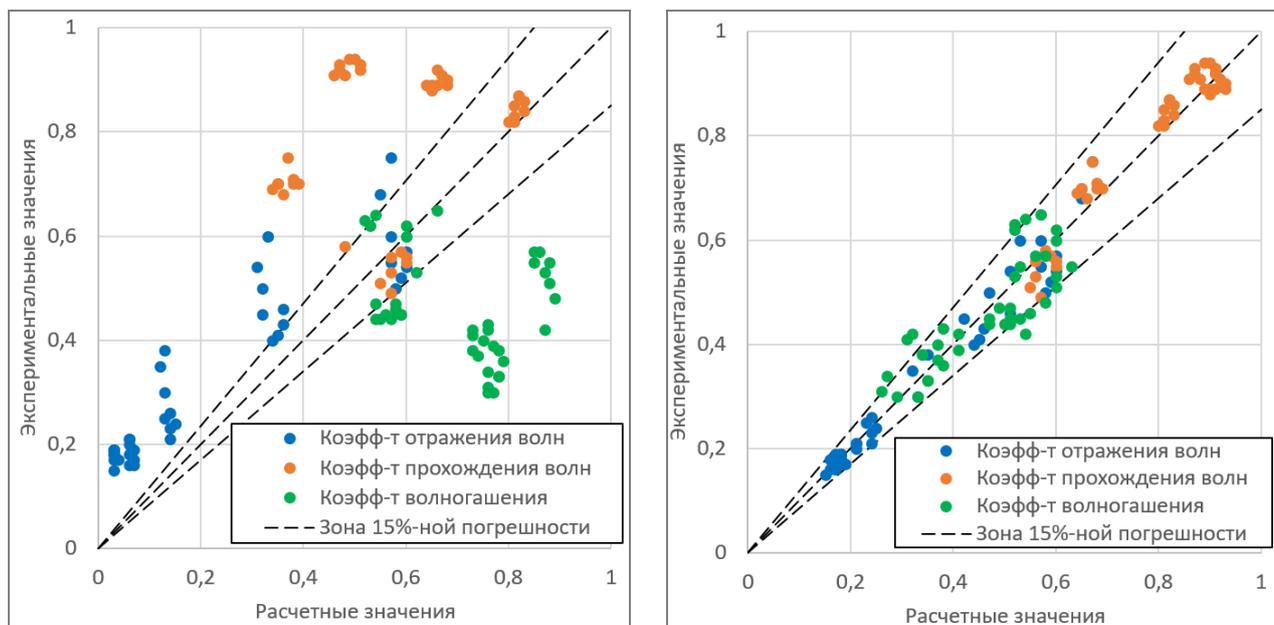


Рисунок 2 - Сравнение эмпирических и расчетных значений коэффициентов отражения, прохождения волн и волногашения: слева – до калибровки, справа – по откалиброванным формулам

Как известно, комплекс экспериментальных исследований, при проведении которого рассматриваются все возможные сочетания изменяемых параметров представляется наиболее информативным, 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 (рисунок 3).

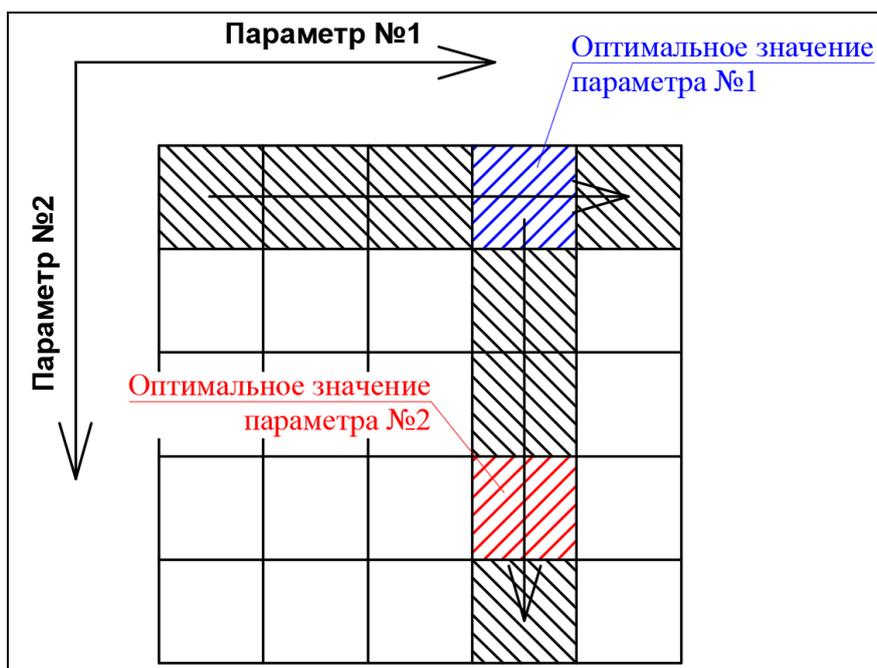


Рисунок 3 – Схема проведения опытов при изменении двух параметров конструкции

С этой целью по результатам выполненных ранее исследований была выполнена оценка вклада различных параметров сооружения на эффективность его работы. Таким образом, в качестве изменяемых параметров сооружения выбраны сквозность откосно-ступенчатой части и объем волновой камеры.

Характеристики моделей и параметры волнения в экспериментах представлены ниже (таблица 1).

Таблица 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	1,85 м	90 м	9,0 с	+0,13 м БС/ 5%
	2				126 м	10,6 с	
	3	То же со сквозной стеной $n=0,18^*$			72 м	8,0 с	
	4				90 м	9,0 с	
	5	То же, $n=0,09$			126 м	10,6 с	
	6				72 м	8,0 с	
	7	То же без экранов			90 м	9,0 с	
	8				72 м	8,0 с	
	9				90 м	9,0 с	
	10				126 м	10,6 с	
	11	То же с более широкой волновой камерой			72 м	8,0 с	
	12				90 м	9,0 с	
	13	Откосно-ступенчатая сквозная конструкция			126 м	10,6 с	
	14				72 м	8,0 с	
	15				90 м	9,0 с	
	16				126 м	10,6 с	
2	17	Откосно-ступенчатая конструкция (изменение волнового режима)	1:30	6,0 м	96 м	9,8 с	+0,21 м БС/ 5%
	18				91,5 м	9,1 с	
	19				84 м	8,4 с	
	20				75 м	7,6 с	
	21				66 м	6,7 с	
3	22	Откосно-ступенчатая конструкция (изменение $n$ )	1:30	6,0 м	96 м	9,8 с	+0,21 м БС/ 5%
	23						
	24						
	25						
26							
4	27	Откосно-ступенчатая конструкция (изменение $V_{вк}^{**}$ )	1:30	6,0 м	96 м	9,8 с	+0,21 м БС/ 5%
	28		1:35	6,0 м	96 м	9,8 с	+0,21 м БС/ 5%
	29		1:45	6,0 м	96 м	9,8 с	+0,21 м БС/ 5%

\* –  $n$  – сквозность конструкции;  
 \*\* –  $V_{вк}$  – объем волновой камеры.

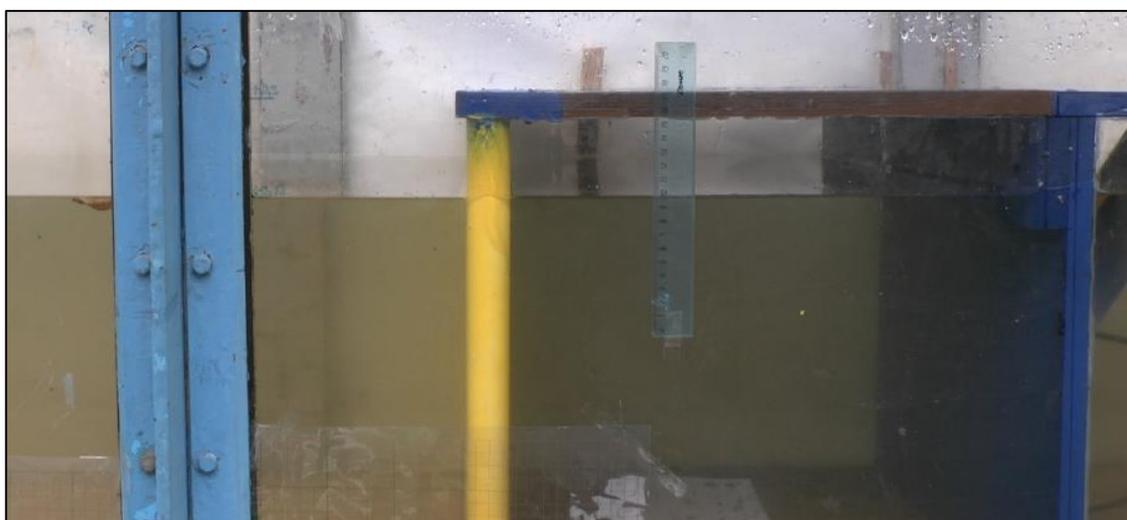
Всего в волновом лотке было проведено четыре серии опытов: в первой сравнивались различные типы конструкций (рисунок 4), во второй оценивалась работа откосно-ступенчатой конструкции при различных волновых условиях

(рисунок 5), в третьей серии изменялась сквозность (рисунок 6), в четвертой - объем волновой камеры (рисунок 7).

а)



б)



в)



Рисунок 4 - Вид моделей в опытах первой серии

а)



б)



в)

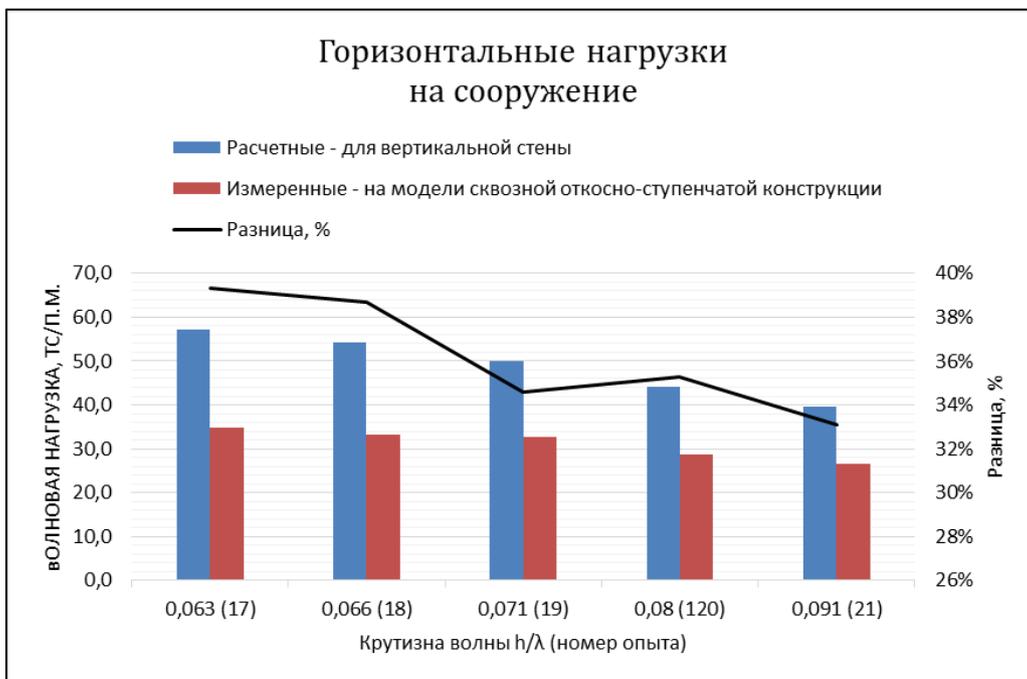


Рисунок 5 - Вид моделей и некоторые результаты опытов второй серии

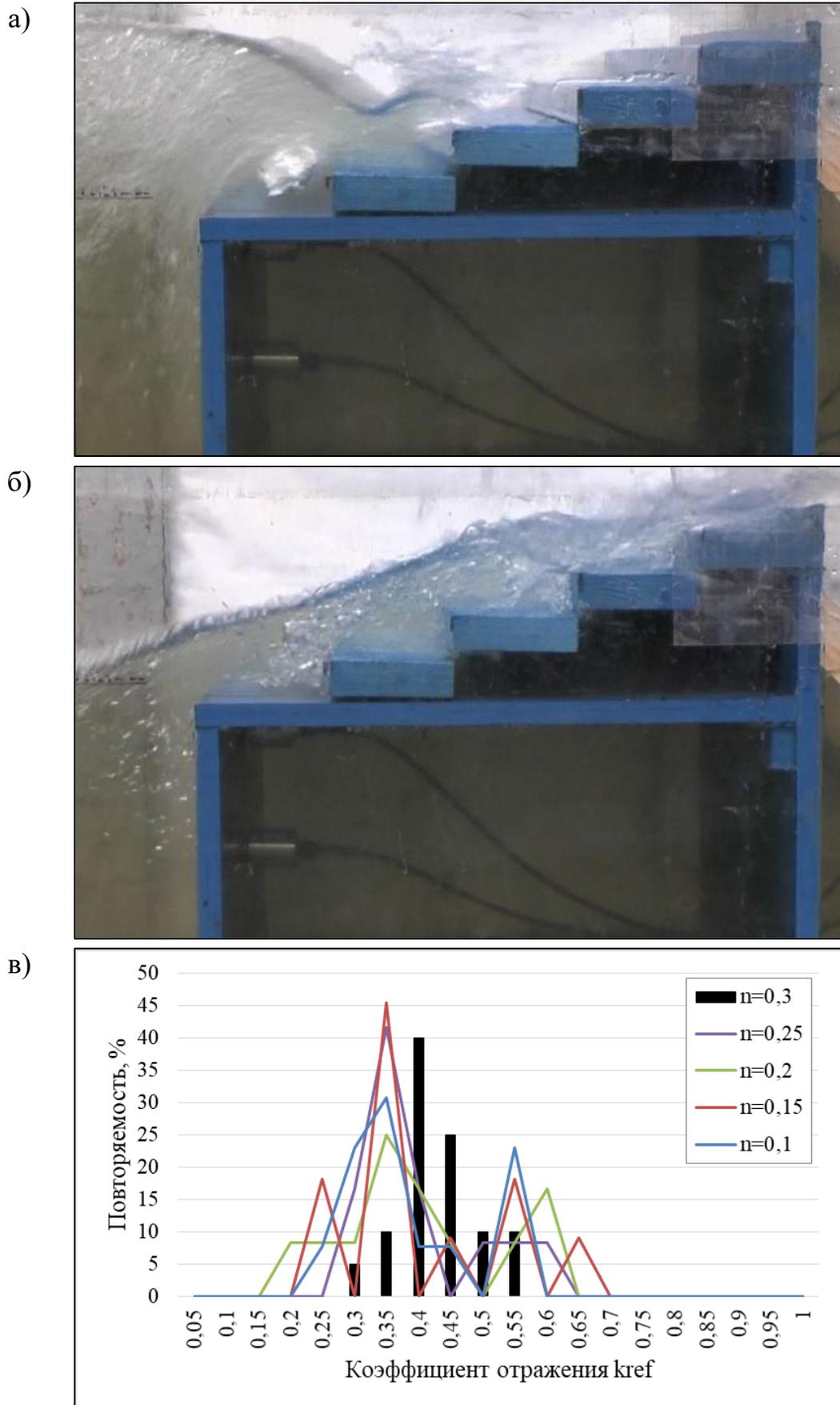


Рисунок 6 - Вид моделей и некоторые результаты опытов третьей серии

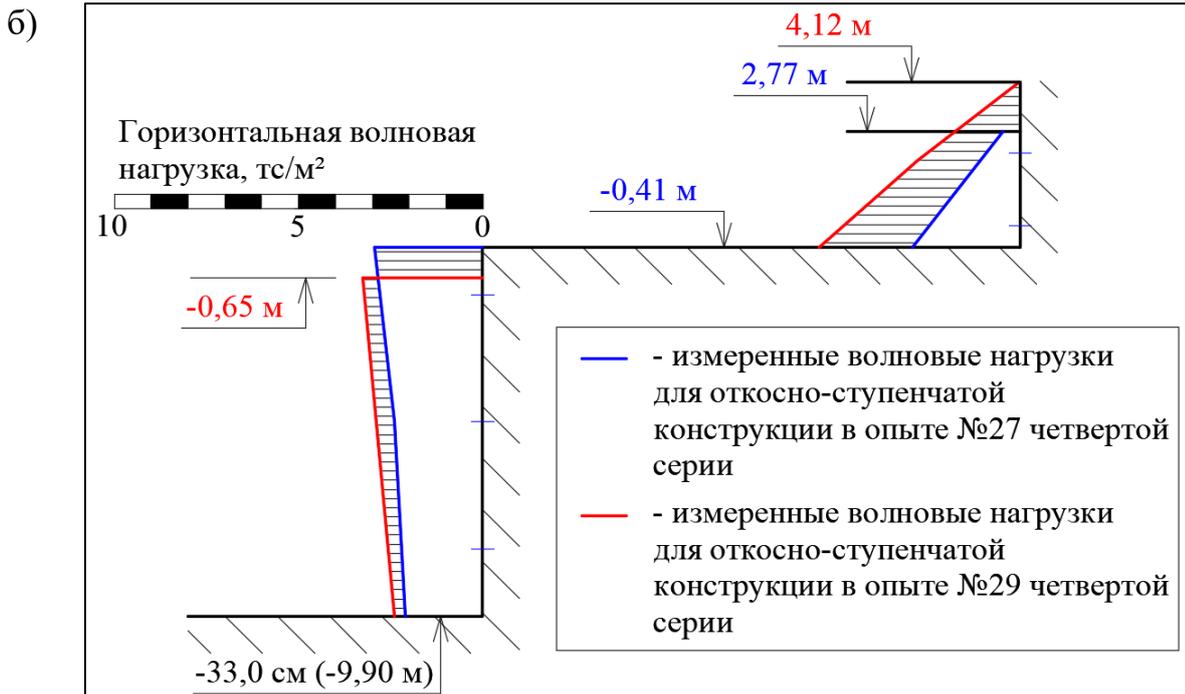
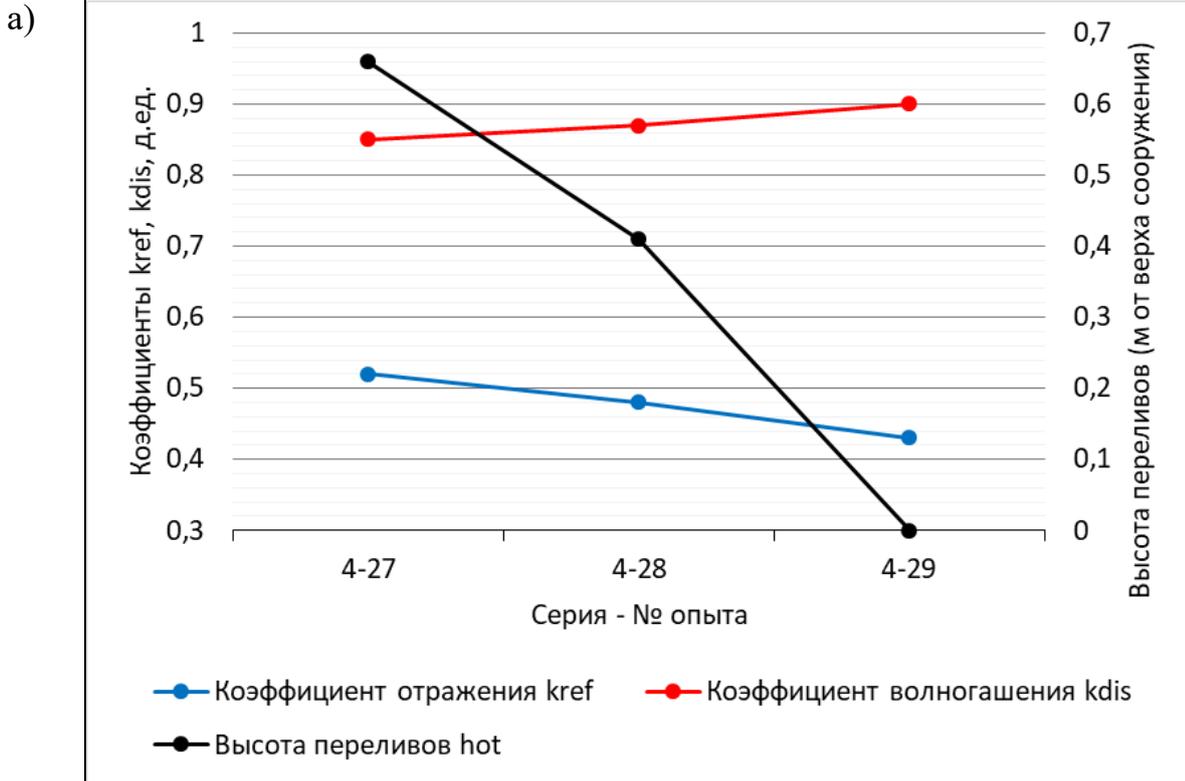


Рисунок 7 – Некоторые результаты опытов четвертой серии

В ходе экспериментальных исследований было выполнено обоснование оптимальных параметров оградительного островного сооружения. Также были определены критерии максимальной эффективности работы волновой камеры сквозной откосно-ступенчатой конструкции (рисунок 8).

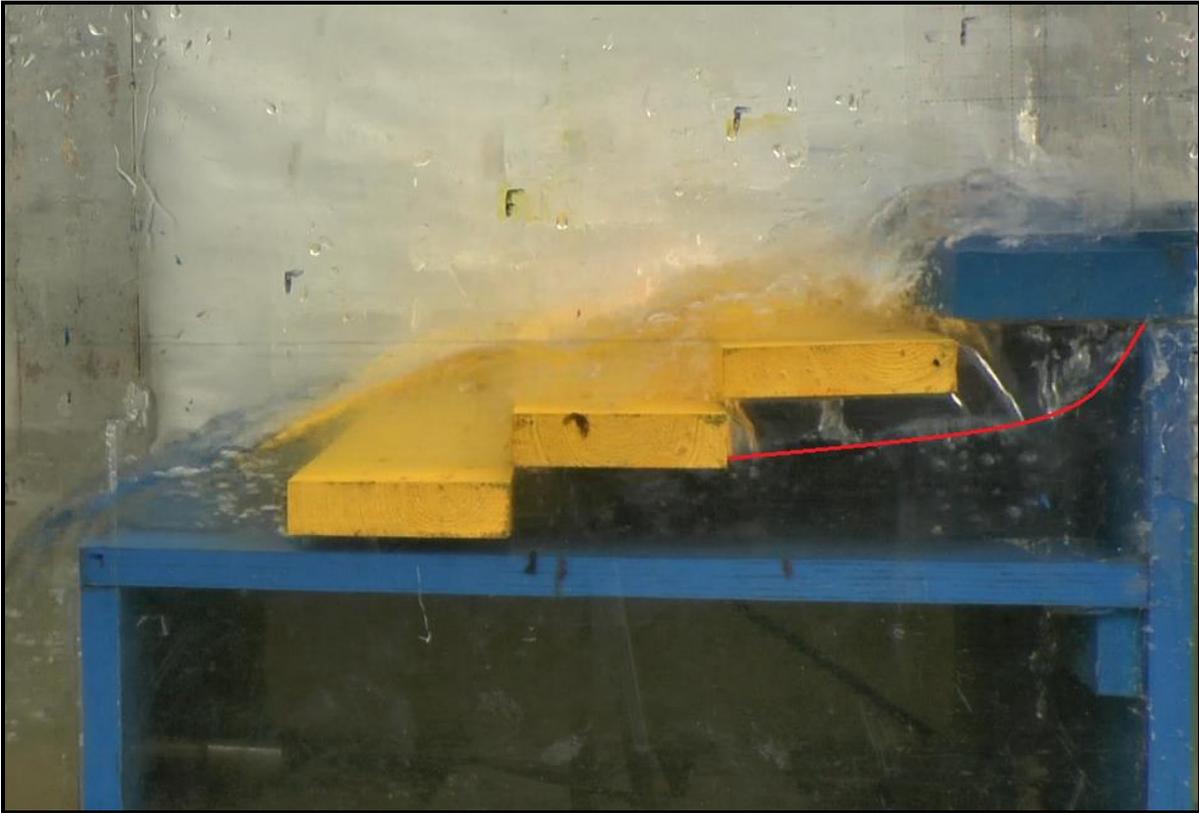


Рисунок 8 – Положение линии свободной поверхности воды в волновой камере при накате волн, характеризующее максимальную эффективность работы волновой камеры

**В пятой главе** приведены разработанные методические рекомендации для научного обоснования: определен порядок выбора ключевых параметров островного сооружения, объем необходимых экспериментальных исследований, предложены меры по оптимизации конструктивных решений проектируемого острова, в том числе - на этапе выполнения исследований на физических моделях.

## 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 двумерных моделях и приведенные выше в настоящей работе;

– 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 и 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Вялый Е. А., Макаров К. Н. Классификация и условия применения конструкций оградительных сооружений искусственных островов // Гидротехническое строительство. 2021. №7. С. 40-44.
2. Вялый Е. А., Макаров К. Н., Тлявлиная Г. В. Проницаемые конструкции искусственных островов // Гидротехническое строительство. 2021. №12. С. 21-28.
3. Макаров К. Н., Вялый Е. А. Искусственные острова на побережье города Сочи // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2021. №1 (264). С. 18-22.

### **Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus:**

4. Vyaly E. A., Makarov K. N. Classification and application of protective structures of artificial islands // Power Technology and Engineering. 2022. №55 (5). С. 667-671. DOI: 10.1007/s10749-022-01414-7.
5. Vyaly E. A., Makarov K. N., Tlyavlina G. V. Permeable constructions of artificial islands // Power Technology and Engineering. 2022. №56 (1). С. 52-58. DOI: 10.1007/s10749-023-01470-7.

### **Публикации в других научных изданиях:**

6. Вялый Е. А. Классификация конструкций искусственных островов В книге: Моря России: исследования береговой и шельфовой зон. Тезисы докладов всероссийской научной конференции (XXVIII береговая конференция). Севастополь, 2020. С. 247-248.
7. Вялый Е. А. Проектирование искусственных островных комплексов. Накопленный опыт и перспективы В сборнике: Строительство в прибрежных курортных регионах. Материалы XI Международной научно-практической конференции. Под научной редакцией К.Н. Макарова. 2020. С. 78-81.
8. Макаров К. Н., Вялый Е. А. Моделирование деформаций откосов искусственного намывного острова // Гидротехника. 2020. Вып. 1 (58). С. 30-33.
9. Вялый Е. А., Макаров К. Н., Тлявлиная Г. В. Проницаемые конструкции искусственных островов В книге: Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. Сборник тезисов докладов IV Всероссийского научно-практического семинара. Москва, 2021. С. 21-22.
10. Вялый Е. А., Макаров К. Н. Методика математического моделирования волнения на акваториях островных сооружений В книге: Моря России: Год науки и технологий в РФ - Десятилетие наук об океане ООН. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Севастополь, 2021. С. 375-377.

11. 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. DOI: 10.22449/2413-5577.

12. 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.

13. Макаров К. Н., Вялый Е.А. Применимость природного камня в современной морской гидротехнике В сборнике: Олимпийское наследие и крупно-масштабные мероприятия: влияние на экономику, экологию и социокультурную сферу принимающих дестинаций. Материалы XIII Международной научно-практической конференции в рамках Международного туристского форума. Под общей редакцией И.В. Гайдамашко. Сочи, 2022. С. 165-168.

14. Вялый Е.А., Макаров К. Н. Классификация и критерии применимости конструкций искусственных островов в прибрежной зоне моря // Совершенствование методов проектирования инженерной инфраструктуры прибрежных регионов. Монография. Сочи: ФГБОУ ВО «СГУ», 2023. С. 4-18.

15. Вялый Е.А. Физическое моделирование островных сооружений В книге: Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. Сборник тезисов докладов VI Всероссийского научно-практического семинара. Москва, 2023. С. 37-38.