

На правах рукописи



Гусаров Роман Николаевич

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛН ЦУНАМИ НА ПОРТОВЫЕ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

2.1.6. – Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель:

Кантаржи Измаил Григорьевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Нуднер Игорь Сергеевич
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ», им. Д.Ф. Устинова», кафедра Об«Высшая математика», профессор

Зайцев Андрей Иванович
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (СКБ САМИ ДВО РАН), директор

Ведущая организация:

Акционерное Общество «Центральный научно-исследовательский институт транспортного строительства» (АО ЦНИИТС)

Защита состоится «20» февраля 2024 г. в 15:30 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ауд. № 9 «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бестужева А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из самых разрушительных катастроф, которые происходят на планете, являются воздействия волн цунами на побережье. Данные явления происходят относительно редко, однако по своему масштабу превосходят многие из природных катаклизмов. Чрезвычайные ситуации, вызванные цунами, приводят к глобальным разрушениям зданий и сооружений, серьезным экономическим проблемам, а главное, к значительным человеческим жертвам.

Цунами являются волнами большого периода, составляющего от нескольких минут до нескольких часов и относятся к длинным волнам, длина которых во много раз превосходит высоту волны. Такие волны приводят к серьезным бедствиям, о которых в большинстве случаев невозможно заранее предупредить. В связи с этим, изучение такой серьезной проблемы, как волны цунами, и по сей день, остается важной научной задачей, решение которой поможет избежать многих человеческих жертв и глобальных разрушений. Воздействия волн цунами на береговые территории изучают во многих странах мира, в первую очередь в тех, где цунами представляют большую опасность для прибрежных населенных пунктов, но несмотря на международные научные труды в области волновых нагрузок на сооружения, до сих пор остается много вопросов, касающихся волн-цунами, их характеристик, поведения и воздействий на портовые гидротехнические сооружения.

Одним из способов, позволяющих узнать больше о цунами, может стать физическое моделирование волновых процессов. Создание уменьшенных копий волн цунами в лабораторных условиях может помочь более детально понять поведение таких волн на прибрежных территориях, проанализировать изменение формы волны при подходе ее к берегу, а также воспроизвести нагрузку в модельном масштабе от данных волн на портовые гидротехнические сооружения, что позволит укрепить проектируемые конструкции данных сооружений.

Степень разработанности темы исследования. На сегодняшний день, значительных успехов в области численного и физического моделирования волн цунами, а также теоретических исследованиях воздействий цунами на береговые территории добились отечественные и зарубежные ученые: И.С. Нуднер, Е.Н. Пелиновский, А.И. Зайцев, А.В. Алексева, А. А. Родин, И.И. Диденкулова, М.А. Носов, В.В. Лебедев, Н.Д. Беляев, Д.И. Щемелинин, К.К. Семенов, С. Synolakis, P. Madsen, H. Petit, A. Reniers, G. Klopman, T. Rossetto, W. Allsop, I. Chavet и др. Их научные труды внесли огромный вклад в изучение природы волн цунами и моделирование данного типа волн. Но на данный момент, остаются неясные моменты, касающиеся физического моделирования воздействий цунами и их взаимодействия с портовыми гидротехническими сооружениями. Так, несмотря на нормативную необходимость

проверки проектируемых гидротехнических сооружений на воздействия волн цунами, пока нет универсального способа и методик для воспроизведения различных видов волн цунами в лабораторных условиях. Данный факт усложняет проектирование портовых гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах, что приводит к недостаточной защищенности акваторий и береговых населенных пунктов.

Цель исследования. Цель работы заключается в повышении надежности портовых гидротехнических сооружений, которые находятся под воздействием волн цунами, путем создания универсального метода моделирования воздействия волн-цунами в лабораторных условиях.

Задачи исследования. Для достижения цели диссертационных исследований, были сформулированы следующие, необходимые к выполнению, задачи:

- анализ существующей литературы с целью определения текущего состояния проблемы исследований, а также подготовки теоретического материала для проведения научных исследований, на основе изучения отечественных и иностранных научных статей, нормативной документации, сборников конференций и диссертационных работ;

- изучение методик проведения эксперимента по моделированию волновых воздействий, а также способов получения волн в лабораторных условиях;

- разработка проекта экспериментальной установки для реализации опытов по физическому моделированию волн цунами, а также сборка и монтаж экспериментальной установки в лаборатории гидравлики в НИУ МГСУ;

- проведение тестирования методик физического моделирования на подготовленной экспериментальной установке и первых испытаний с целью проверки надежности установки;

- проведение серий тестовых опытов с целью получения моделей волн цунами в лотке в различных условиях, измерение характеристик полученных волн и анализ результатов экспериментов;

- анализ существующих методов расчета портовых гидротехнических сооружений на воздействия от цунами волн с учетом результатов физического моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана, реализована и запатентована экспериментальная установка - универсальный генератор волн типа цунами различной формы, позволяющая воспроизводить цунами сейсмического происхождения и оползневые цунами;

- на основании анализа результатов тестовых опытов подготовлены универсальные методики для проведения экспериментов по воспроизведению волн цунами;

- выполнен анализ и сопоставление форм полученных моделей волн цунами при различных глубинах воды, а также при различных способах моделирования;

- подготовлены рекомендации к расчету портовых гидротехнических сооружений типа вертикальной стенки по определению нагрузки от цунами.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость диссертационной работы состоит из следующих составляющих:

- представлены универсальные методики проведения эксперимента по моделированию воздействий цунами, а также рекомендации по проведению опытов. Методики позволяют моделировать волны типа сейсмических волн цунами и волны типа оползневых волн цунами;

- разработаны рекомендации к расчету портовых гидротехнических сооружений типа вертикальной стенки от цунами волн. На данный момент СП 292.1325800.2017. «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» рассматривает только один расчетный случай при определении давления на вертикальную стену – при гребне волны. Разработанное дополнение, добавляет случай при впадине, так как при воздействии цунами от сейсмической активности, перед ударной волной у сооружения образуется желоб (впадина), при которой происходит обратное движение потока воды, что несет опасность обратного опрокидывания и разрушения конструкции для оградительного сооружения.

Практическая значимость работы. Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке и реализации экспериментальной установки с волновым генератором, способным моделировать воздействия волн-цунами на модели гидротехнических сооружений. Благодаря созданному цунами-генератору в лаборатории НИУ МГСУ становится возможным более подробно изучить поведение длинных волн, а также определять нагрузки от цунами на береговые сооружения. Это позволит укрепить и защитить уязвимые акватории и прибрежные территории в цунамиопасных районах России.

Методология и методы исследования. Основным методом, который был использован при научных исследованиях – экспериментально-аналитический. Исследования цунами строились на базовых волновых теориях, а исследования в области физического моделирования опирались на уже апробированные методики экспериментальных исследований. Все результаты, полученные во время испытаний в НИУ МГСУ, были зафиксированы на современные измерительные приборы.

За время научных исследований, была предложена универсальная пошаговая методика лабораторных испытаний по моделированию цунами, позволяющая проводить испытания в данной области, а также после тщательного анализа существующих расчетов, было подготовлено предложение по определению нагрузки на сооружение при впадине цунами, когда потоки воды двигаются в противоположную сторону от берега.

Личный вклад соискателя. Соискателем был произведен анализ научной литературы в области проводимых исследований, а также сформулированы задачи исследований. На

протяжении научной работы соискатель самостоятельно подготовил проект экспериментальной установки по моделированию волн цунами, а также произвел сборку и монтаж установки в гидравлический лоток НИУ МГСУ. После разработки установки, соискателем были проведены серии опытов с различными условиями для получения более точных моделей цунами. После выполнения всех экспериментов были выполнены анализ и обобщение полученных экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту.

1. Универсальный генератор волн типа цунами различной формы и происхождения;
2. Универсальные методики проведения экспериментов по моделированию волн цунами сейсмического и оползневого происхождения в лабораторных условиях;
3. Результаты экспериментальных исследований по изучению формы и высоты сейсмических и оползневых волн цунами;
4. Предложение по расчету гидротехнических сооружений вертикального типа на нагрузки от цунами волн.

Степень достоверности результатов исследования. Все проведенные исследования волн-цунами опираются на фундаментальные теории волн. Экспериментальные исследования построены на основных положениях теории подобия, а также уже апробированных методиках экспериментальных исследований. Результаты проведенных экспериментов, были получены при помощи современных измерительных приборов. Достоверность и результативность представленных решений подтверждена в тексте диссертационной работы и продемонстрирована описанием результатов проведенных работ.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований были представлены в 11 опубликованных научных статьях, а также доложены на следующих научных конференциях и семинарах: III-й Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (г. Москва, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 2020); IV-й Всероссийский научно-практический семинар, посвященный 100-летию НИУ МГСУ «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (г. Москва, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 2021); Всероссийская научная конференция «Моря России: Год науки и технологий в РФ — Десятилетие наук об океане ООН» (г. Севастополь, ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», 2021); Всероссийская конференция с международным участием «XXIX береговая конференция: натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования» (г. Калининград, Балтийский федеральный университет им. И. Канта (БФИ), 2022); XXV Международная научная Конференция «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2022) (г. Москва, Московский

государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 2022); V Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (г. Москва, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 2022); Всероссийская научная конференция «Моря России: Вызовы отечественной науки» (г. Севастополь, ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», 2022).

Соискатель представил результаты исследования на Всероссийском инженерном конкурсе 22/23 и стал лауреатом полуфинала.

Публикации. Материалы диссертации достаточно полно изложены в 11 научных публикациях, 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 (Перечень рецензируемых научных изданий), 1 работа опубликована в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и 7 работ опубликовано в других научных журналах и изданиях.

В диссертационной работе используются результаты научных работ, выполненных соискателем лично и в соавторстве. Список опубликованных научных статей Гусарова Р.Н. представлен в приложении А – Список публикаций по теме диссертационного исследования.

На разработанный генератор волн типа цунами различной формы был получен патент, как на полезную модель, что позволяет применять его в различных хозяйственно-договорных работах и в области проектирования сооружений (№ патента – 220024). Патент на разработанную экспериментальную установку представлен в приложении Б – Документы по патенту на разработанную экспериментальную установку.

Структура и объем диссертационной работы. Подготовленная диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, и двух приложений. Список литературы включает в себя 203 позиции, в том числе 79 на иностранном языке. Диссертационная работа изложена на 207 страницах и включает в себя 101 рисунок и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены основные направления и вопросы, которым посвящена диссертация и обоснована актуальность исследования. Проведен анализ теории, на которой основываются проводимые научные исследования.

Представлено три основных взаимосвязанных составляющих, вокруг которых происходит построение диссертационной работы.

Первая составляющая — это цунами, как природное явление, представляющее большую опасность для береговых территорий. Исследования теории показали, что цунами могут быть

непредсказуемы, имеют много различных видов проявления, а также были и остаются актуальными на территории России, в связи с большой береговой протяженностью в районах Тихого океана, где и происходят данные катаклизмы.

Вторая составляющая — это цунами-защитные портовые гидротехнические сооружения. Приведен обзор оградительных и берегозащитных сооружений, способных защищать уязвимые акватории. На основе проанализированной информации, можно утверждать, что исследования, расчеты, проектирование и строительство гидротехнических сооружений в опасных районах являются важными направлениями борьбы с угрозой цунами.

Третья составляющая — это физическое моделирование волновых воздействий. Показаны основные аспекты физического моделирования волновых воздействий, что демонстрирует важность и серьезность данного направления. Представлена информация, обосновывающая необходимость проведения физического моделирования цунами и подтверждено, что на данный момент нормативная документация по моделированию в лабораториях воздействий таких волн, как цунами, недостаточна. Недостаток универсальных рекомендаций, а также единой методики проведения эксперимента может сказываться на качестве проводимых испытаний, а в дальнейшем и на надежности возводимых конструкций.

Проведенный анализ показал, что в данный момент вопросы, связанные с цунами, цунами-защитными портовыми гидротехническими сооружениями и физическим моделированием цунами являются актуальными, из чего можно сделать основной вывод, что диссертационное исследование является важным в научном и практическом отношении для соответствующих областей науки, проектирования и строительства.

Во **второй главе** рассматривается подробно физическое моделирование цунами, а также представлена информация о пути создания экспериментальной установки под названием «универсальный генератор волн типа цунами различной формы». На основе теоретической составляющей данной главы и обзора наиболее перспективных способов воспроизведения цунами можно сделать следующие утверждения:

1. Физическое моделирование — это важный инструмент, необходимый для исследований цунами, оно помогает получить решения для нескольких задач. Первая это определить прочность и устойчивость сооружения, подверженного воздействию цунами, второе это калибровка результатов численного моделирования цунами;

2. Форма цунами отличается в зависимости от источника, порождающего волну. Цунами, порожденное оползнем или падением метеорита, представляет собой одиночную волну — солитон, а цунами, вызванные сейсмикой, представляют из себя, так называемые, N-волны. В научных трудах, Tadepalli, S. и Synolakis, C. E. предложили рассматривать N-волны в двух вариантах: LDN (leading-depression – впереди понижение уровня) и LEN (leading-elevation –

впереди повышение уровня). Было установлено, что от зоны сейсмического очага LDN волны распространяются к берегу, а LEN волны – в открытое море (рисунок 1). LDN волны Tadepalli, S. и Synolakis, C. E. разделили на 2 вида: обобщенная N-волна (the generalized N-wave) и равнобедренная N-волна (the isosceles N-wave) (рисунок 2).

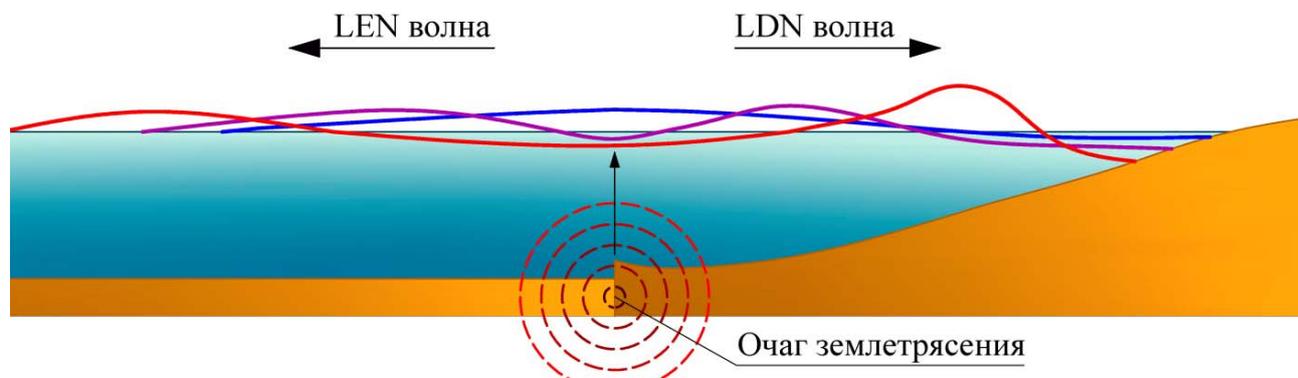


Рисунок 1 – Схема распространения LDN и LEN волн, синяя линия – 1 этап, фиолетовая линия – 2 этап, красная линия – 3 этап

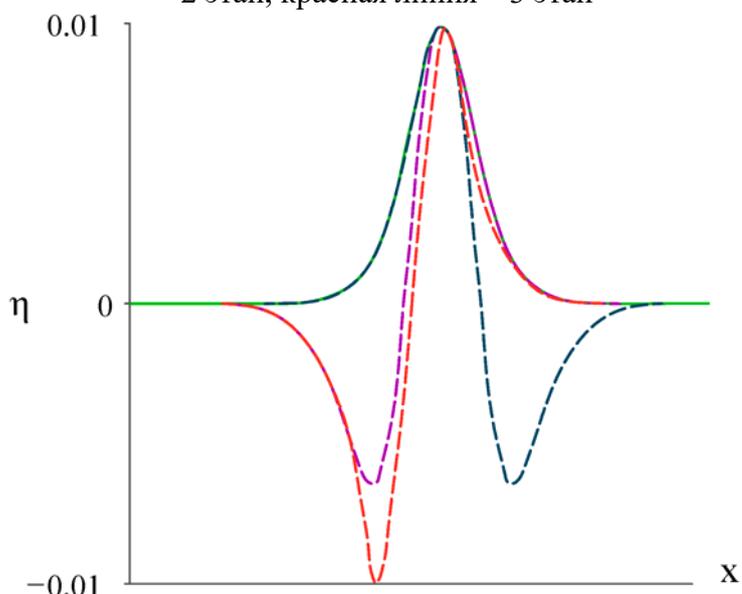


Рисунок 2 – Сопоставление волновых профилей, зеленый график – профиль одиночной волны, фиолетовый график – обобщенная LDN-волна, красный график – равнобедренная LDN-волна, синий график – LEN-волна

3. В связи с различной формой реальных цунами, следует внимательно относиться к выбору способа моделирования волны, так как методы по большей части ориентированы на создание определенного вида цунами. Так метод «скользящего блока», моделирует оползневые цунами (солитоны), а метод пневматического генератора справляется с моделированием сейсмических цунами (N-волн).

4. В случае моделирования цунами основными силами выступают силы тяжести и инерционные силы. Поэтому моделирование должно проводиться в соответствии с критерием Фруда (Fr).

Основным результатом работ, представленных во второй главе, является созданный универсальный генератор волн типа цунами различной формы в НИУ МГСУ (рисунок 3, 4). Работа по проектированию и сборке данной экспериментальной установки велась, опираясь на вышеперечисленные утверждения, благодаря этому было учтено много важных моментов при выборе методик моделирования и разработке конструкции установки.

Волновой генератор представляет собой следующую конструкцию: с одной стороны гидравлического лотка расположен универсальный сборный волнопродуктор – резервуар, соединенный с вакуумным насосом, к которому шарнирно прикреплена наклонная поверхность. На другой стороне лотка установлена наклонная поверхность, имитирующая береговой откос.

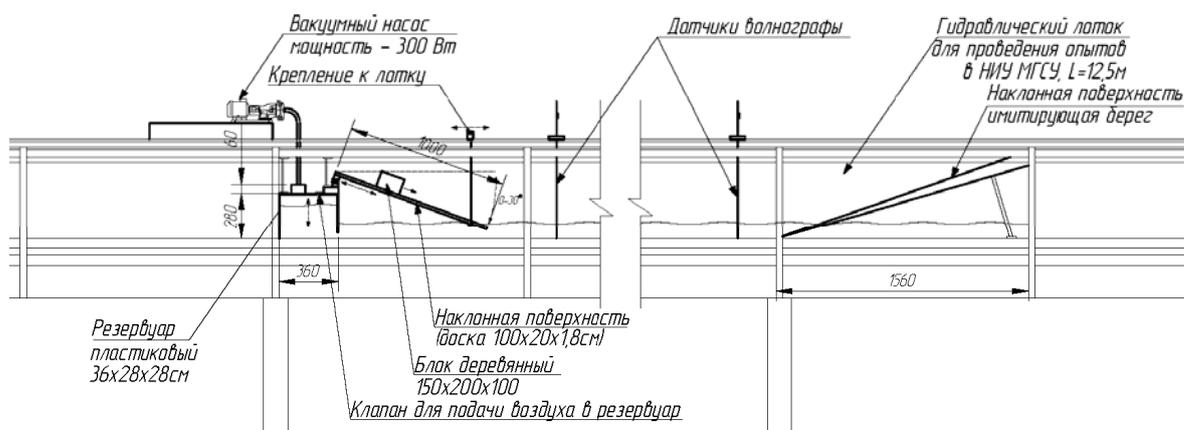


Рисунок 3 – Фрагмент чертежа универсального генератора волн типа цунами различной формы

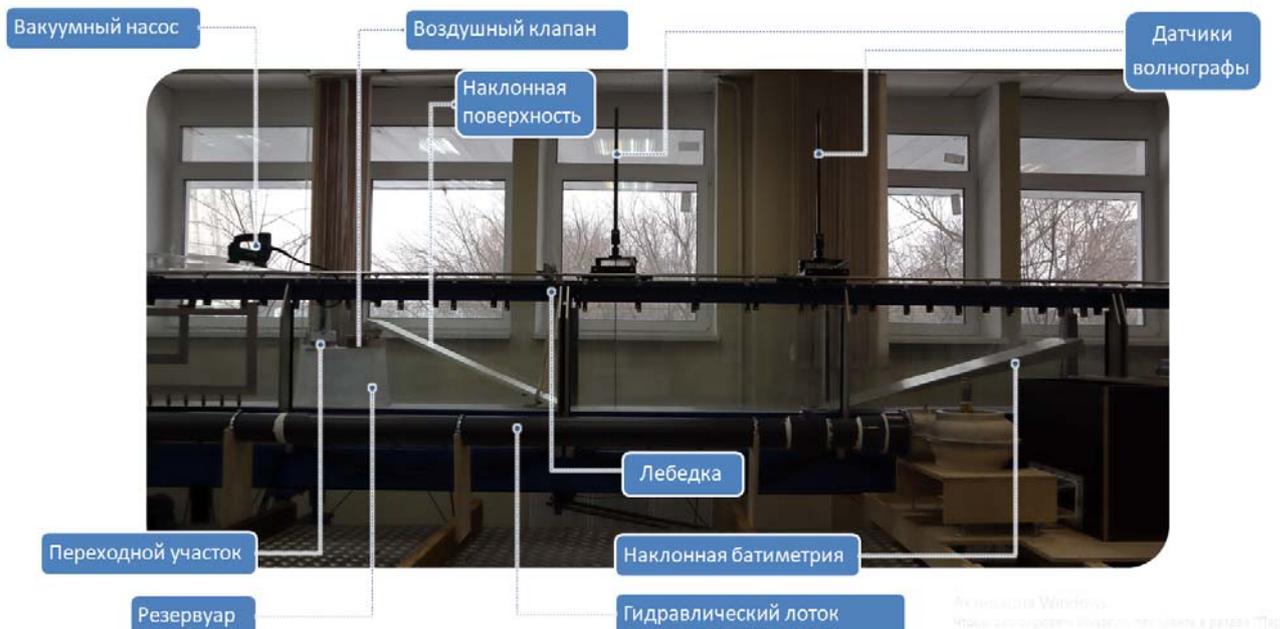


Рисунок 4 – Реализованный универсальный генератор волн типа цунами различной формы

Часть генератора способна воспроизводить волны типа цунами, вызванные оползнями или другими падающими объектами в воду (солитоны), путем размещения в лотке поднимающейся и опускающейся наклонной поверхности с перемещающимся креплением к лотку, что позволяет установить любой угол наклона поверхности от 0 до 90°, под которым

будет опускаться твердое тело в воду. Другая часть установки способна воспроизводить волны типа цунами от сейсмической активности (N-волны), благодаря перевернутому резервуару, подключенному к нему вакуумному насосу и воздушному клапану. При воспроизведении N-волны, наклонная поверхность, задействованная для моделирования оползневых цунами, поднимается и не мешает процессу моделирования, а при воспроизведении оползневого цунами, наоборот, выключается вакуумный насос и опускается наклонная поверхность.

Воспроизведение волн происходит по двум различным методикам моделирования:

Методика моделирования цунами от сейсмического воздействия:

В начале эксперимента включается вакуумный насос, откачивающий воздух из резервуара, вследствие чего, вода в нем начинает подниматься, а уровень воды в лотке начинает понижаться. Как и в реальных условиях цунами, уровень воды опускается ниже спокойного уровня, когда перед гребнем волны происходит понижение уровня воды в береговой зоне. Как только вода в резервуаре достигает верхних отметок, открывается воздушный клапан и при внезапном попадании воздуха в резервуар происходит освобождение набранного объема воды. При открытии клапана, на выпускном отверстии резервуара формируется волна. Методика показана на рисунке 5.

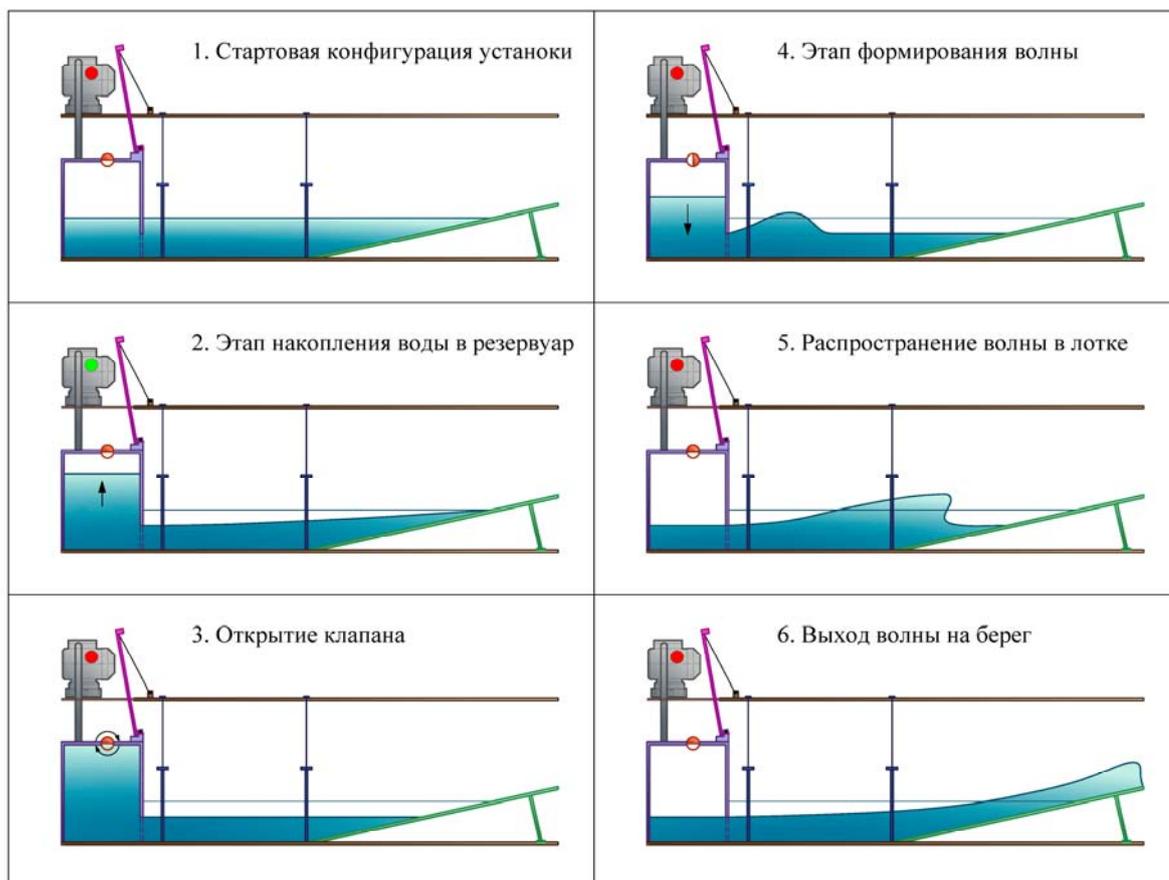


Рисунок 5 – Методика моделирования цунами от сейсмического воздействия

Методика моделирования волн типа цунами оползневого типа

В начале эксперимента происходит опускание наклонной поверхности и ее фиксация при определенном угле наклона. После установки определенного угла наклона, по поверхности запускают блок, сползающий в воду. При соприкосновении блока с водой образуется волна. Методика показана на рисунке 6.

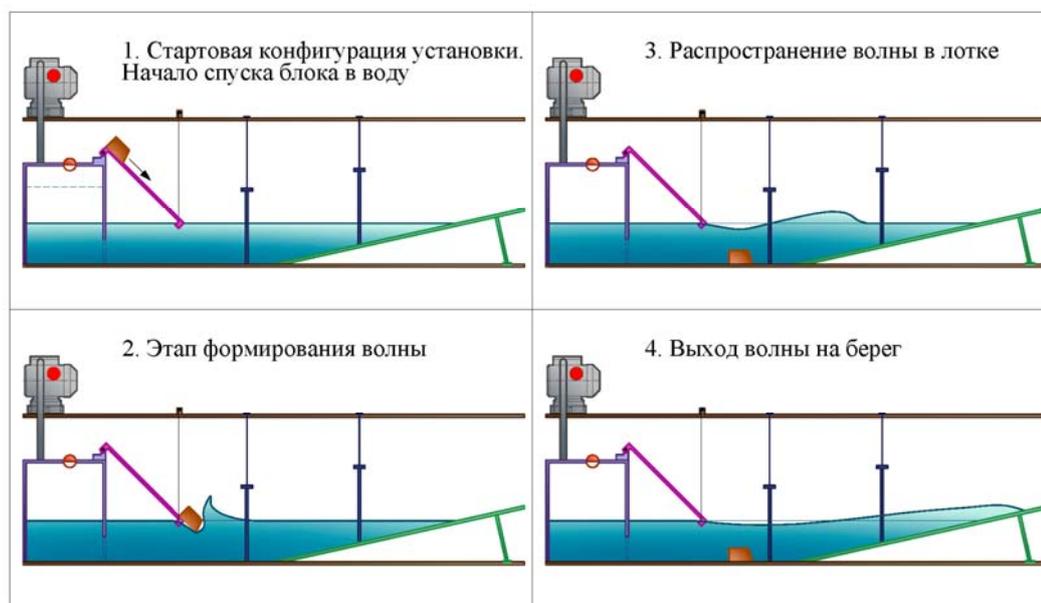


Рисунок 6 – Методика моделирования цунами от оползня

Разработанный генератор волн является портативной комплексной установкой, позволяющей моделировать и измерять различные виды цунами. За счет простой конструкции, экспериментальная установка легка в сборке и разборке, что положительно влияет на экономическую составляющую эксперимента, а также не создает сильных нагрузок на гидравлический лоток. Данные преимущества, а главное универсальность в плане моделирования различных видов цунами, делают установку полезной для изучения природы цунами, а также проверки нагрузок от цунами на гидротехнические сооружения.

В **третьей главе** представлены основные экспериментальные исследования цунами, проведенные в НИУ МГСУ, благодаря разработанной экспериментальной установке. В данной главе описаны следующие экспериментальные работы:

1. Апробация методик. Во время опытов были апробированы обе методики моделирования цунами, заявленные при разработке экспериментальной установки, а также была проверена конструкция генератора волн на надежность и устойчивость;

2. Усовершенствование установки. В процессе проведения первых опытов, было произведено усовершенствование части волнового генератора, ответственной за моделирование сейсмических цунами. Был подобран более мощный насос, способный полностью откачивать воздух из резервуара, тем самым полностью наполняя его водой, что привело к генерации более крупных волн.

3. Исследование зависимости формы и высоты сейсмических волн от глубины воды. Был проведен теоретический и экспериментальный анализ трансформации цунами на подходе к берегу. Эксперименты позволили изучить форму и поведение волн при различной глубине воды. Так при глубине 5см была неоднократно получена ударная волна типа бора (рисунок 7) , а при большей глубине в 10см были получены кноидальные волны (рисунок 8), сопоставимые с реальными цунами в открытом море;

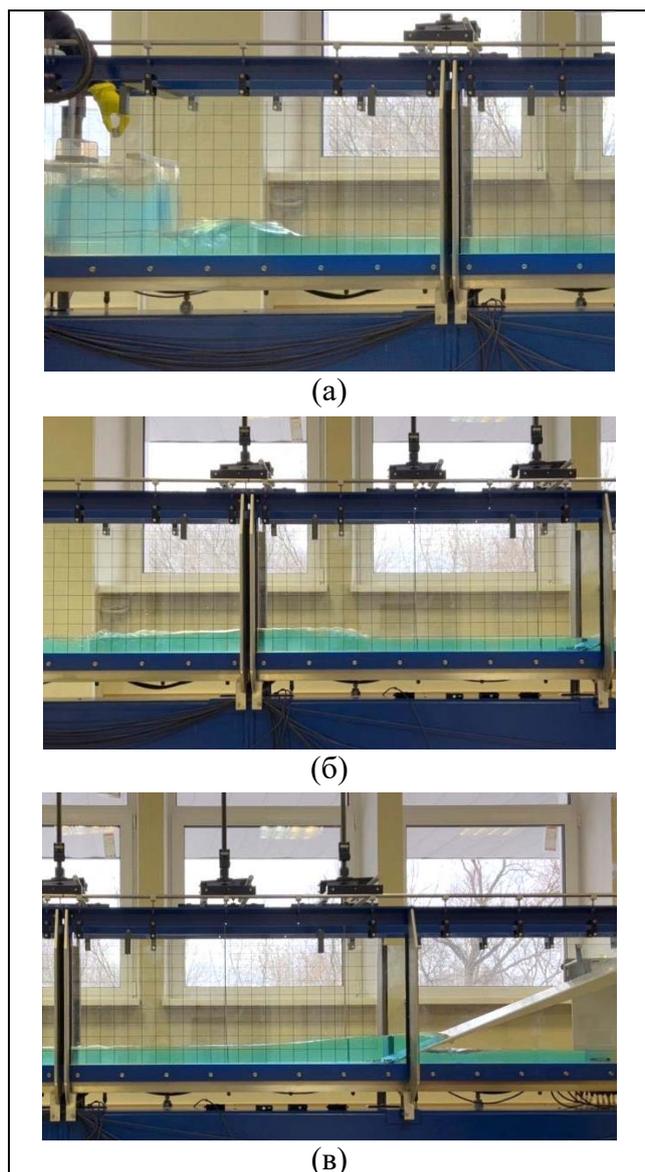


Рисунок 7 – Формирование (а), распространение (б) и накат на берег (в) волны при глубине 5см

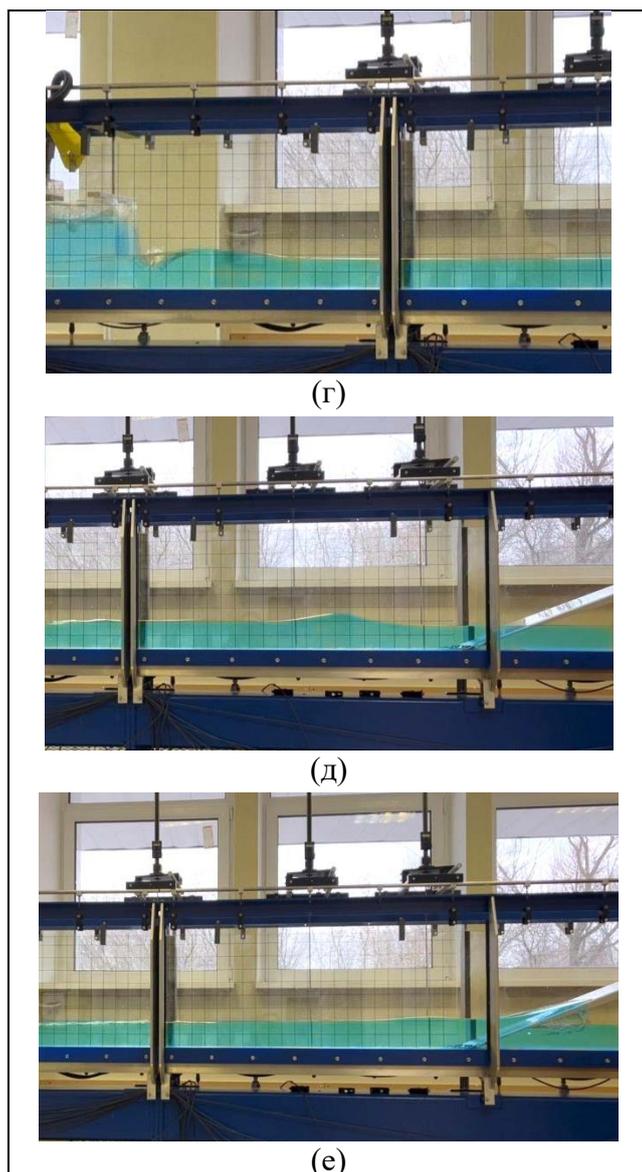


Рисунок 8 – Формирование (г), распространение (д) и накат на берег (е) волны при глубине 10см

Результаты опытов были сопоставлены с теоретическими наблюдениями и на основании анализа изменения параметров волны, таких как характеристическая скорость и скорость деформации волны при уменьшении глубины воды, было получено теоретическое обоснование процессов, происходящих во время экспериментов. В соответствии с научными трудами А.А.

Родина, Е.Н. Пелиновского и И.И. Диденкуловой, скорость деформации волны определяется отношением характеристической скорости V , которая находится из выражения (1), к скорости распространения волны c , которая находится из выражения (2):

$$V = 3\sqrt{gH_d} - 2\sqrt{gh} \quad (1)$$

$$c = \sqrt{gh}, \quad (2)$$

где:

H_d – полная глубина, сумма глубины невозмущенной воды h и смещения водной поверхности при волнении η .

Построенные графики зависимости скорости деформации волны от значения локальной глубины в волне (отношению полной глубины H_d к глубине невозмущенной воды h) и скорости деформации волны от глубины воды, представленные на рисунках 9, 10, показали, что при меньшей глубине воды, скорость деформации выше, в связи с этим, волна быстрее трансформируется из кноидальной в ударный волновой бор, что и происходило в экспериментах.

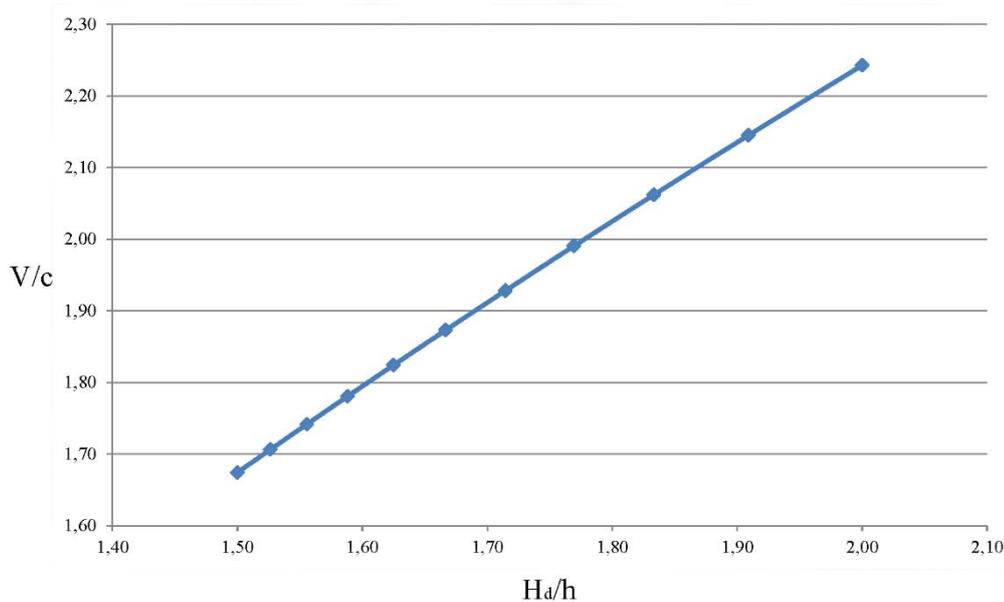


Рисунок 9 – График зависимости скорости деформации волны от значения локальной глубины в волне (при глубинах воды от 5 до 10м)

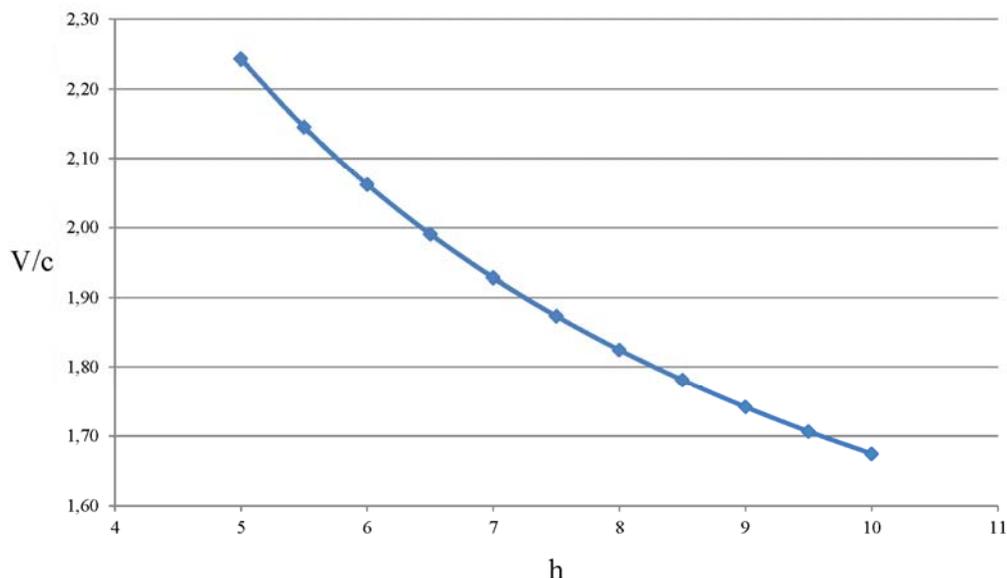


Рисунок 10 – График зависимости скорости деформации волны от глубины воды (на промежутке глубин от 5 до 10м)

4. Исследование изменения формы волны от параметров экспериментальной установки. Исследования зависимости формы и высоты волны от габаритов сечения воздушного клапана подтвердили, что при увеличении габаритов клапана, волновой профиль имеет большую крутизну, что влияет и на размеры отраженных волн (рисунок 11). Также было проверено влияние увеличения выпускного отверстия на высоту полученных волн, однако, при большем выпускном отверстии волны получились более мелкие.

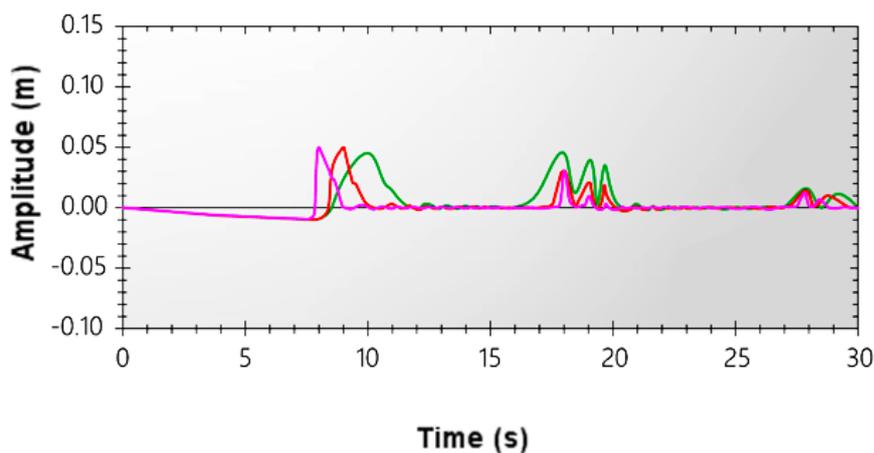


Рисунок 11 – Записи водной поверхности при трех различных воздушных клапанах, с площадями 3,5см² (зеленая линия), 7см² (красная линия), 10,5см² (фиолетовая линия).

5. Исследование влияния отражения волн. Проведена серия опытов, посвященная отражениям N-волн, в ходе которой была показана важность эффекта отражения от откоса, имитирующего берег, повторных отражений от волнового генератора, а также важность учета столкновения отраженной волны с последующей подходящей волной. В реальных условиях

отраженные и сталкивающиеся волны могут быть опасными для судов, находящихся в зоне действия цунами (рисунок 12).

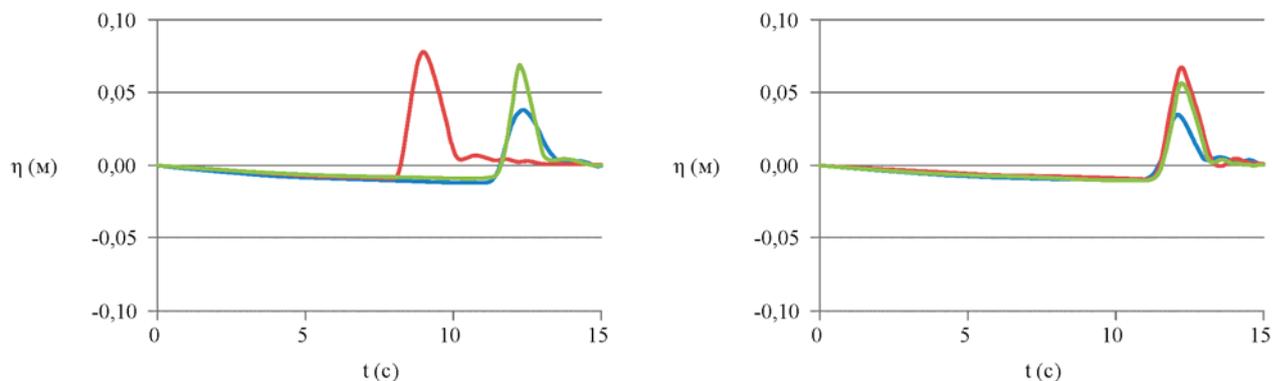


Рисунок 12 – Сравнение записей волнографа при моделировании цунами в начальных условиях (синий график) в условиях отражения от берегового откоса (красный график) и повторного отражения от генератора волн (зеленый график).

6. Исследования по моделированию оползневых цунами. Отдельным исследованием стала, проведенная серия опытов по моделированию оползневых цунами в зависимости от угла наклона поверхности, по которой происходит опускание твердого блока в воду. Результаты опытов (рисунок 13) показали, что при большем угле наклона получаются менее крупные волны, что связано с направлением движения блока.

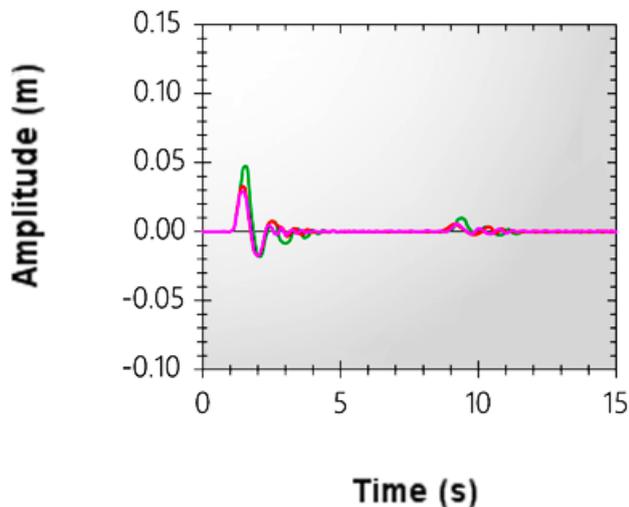


Рисунок 13 – Запись уровня воды при моделировании оползневых цунами при различных углах наклона поверхности, по которой соскальзывает твердое тело

7. Сопоставление моделей одиночной волны и N-волны. В ходе исследований были экспериментально показаны основные различия двух типов волн (рисунок 14). Как и в теории, было подтверждено, что N-волны начинаются с впадины, а солитоны с повышения уровня воды, а также что за гребнями волн уровень N-волны возвращается сразу к спокойному уровню, а у одиночной волны следует впадина.

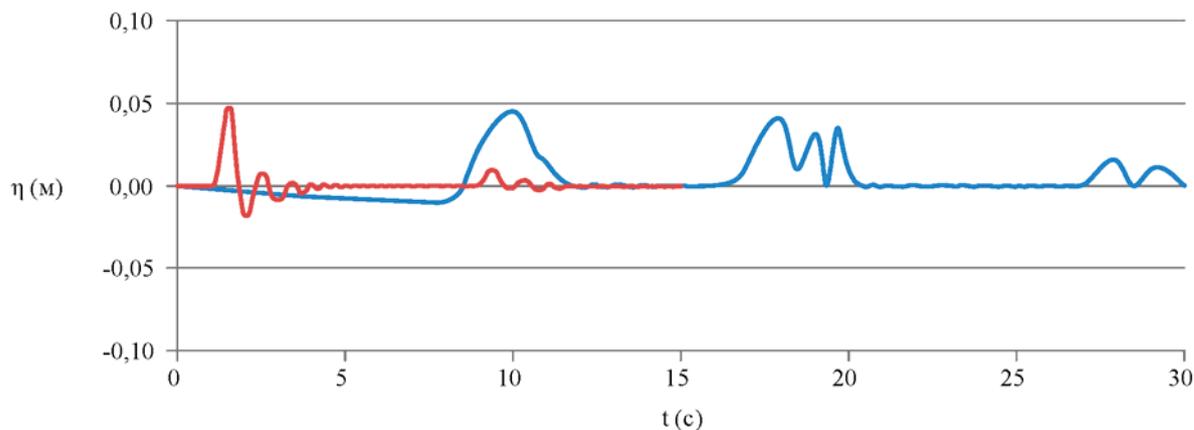


Рисунок 14 – Сопоставление показаний волнографов при генерировании оползневой цунами (красный график) и цунами сейсмического происхождения (синий график)

8. Сопоставление с зарубежными и отечественными исследованиями по моделированию цунами, а также с реальными записями цунами. Модели сгенерированных цунами сейсмического происхождения в НИУ МГСУ были сопоставлены с реальными записями цунами, произошедшими в Никарагуа и Окушире (рисунок 15). Модели цунами от оползней были сопоставлены с результатом зарубежного моделирования оползневой цунами на озере Аксья (Исландия), произошедшем в 2014 году, с результатами численного и физического моделирования солитонов в Ганновере (Германия), с моделями волн в исследованиях, которые описал V. Neller в своих работах и полученных с помощью скользящего блока, а также с результатами исследований, проведенных в Королевском университете в Кингстоне (рисунок 16).

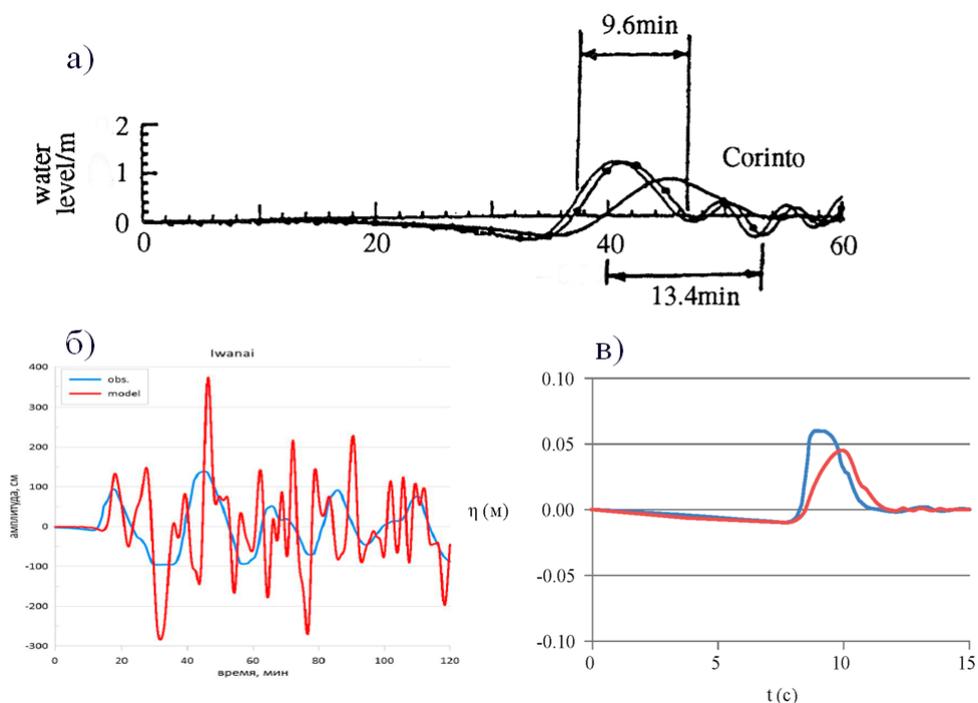


Рисунок 15 – Сравнение моделей сейсмических цунами с существующими записями волн, (а) профиль поверхности воды при цунами в 1992 году в Коринто, (б) существующая запись (синий график) и численное моделирование (красный график) Окуширского цунами, (в) записи цунами сейсмического характера в НИУ МГСУ

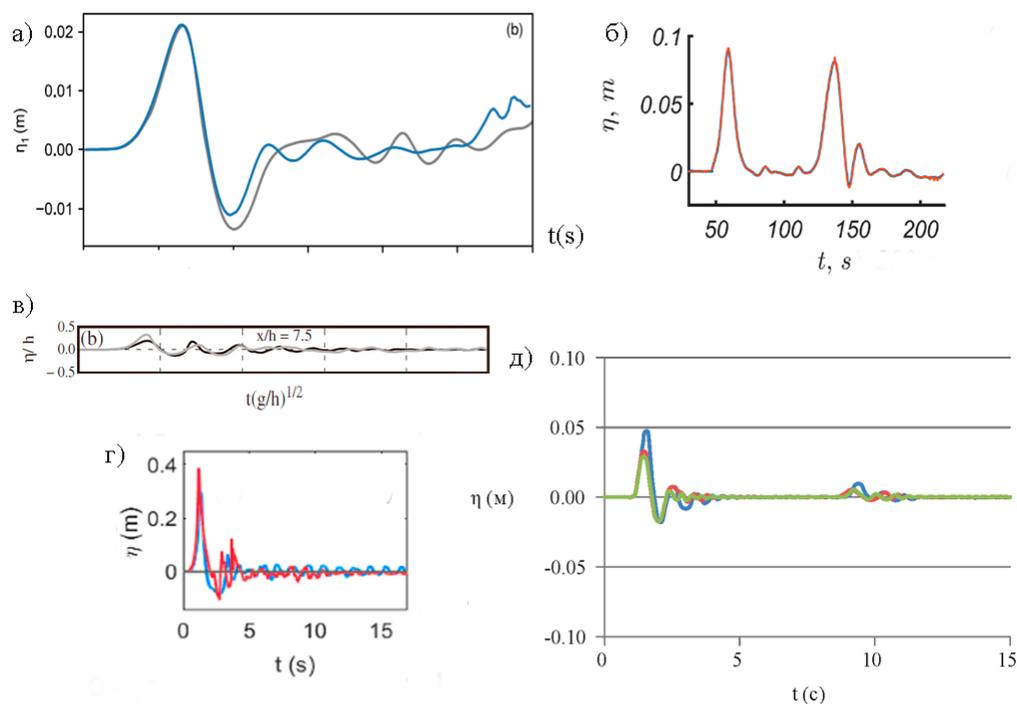


Рисунок 16 – Сопоставление моделей цунами от оползней с моделями других аналогичных опытов, (а) запись модели цунами от оползня на озере Аксья, (б) результаты физических исследований по моделированию солитонов в Ганновере (в) запись моделей волн методом скользящего блока в работах V. Heller, (г) записи, полученные в Королевском университете в Кингстоне, (д) записи оползневых цунами в НИУ МГСУ

Проведя сравнительный анализ, подтверждено, что универсальный генератор волн типа цунами различной формы воспроизводит N-волны и одиночные волны, подобные по форме реальным цунами и сопоставимые с моделями зарубежных исследований.

В четвертой главе диссертации рассматриваются основные вопросы проектирования гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах. Были разобраны следующие важные составляющие: рекомендации по сбору исходных данных для начала проектирования, методика по определению параметров цунами в прибрежной зоне и на самом берегу, методика расчета гидротехнических сооружений на примере конструкций сплошного типа.

Важным является сравнение методик расчета нагрузок от цунами и расчета нагрузок от других видов волн, таких как стоячие, разбивающиеся и прибойные волны. Были проанализированы расчеты горизонтальных и вертикальных удельных нагрузок, а также эпюры давления волны на вертикальную стенку при воздействии каждого из видов волновых воздействий, на основе чего, были сделаны выводы и рекомендации по дополнению необходимой информацией СП 292.1325800.2017 и СП 38.13330.2018. Значимым моментом в сравнении методик стало рассмотрение нагрузок от стоячих волн. В соответствии с СП 38.13330.2018, в расчетах нагрузок от стоячих волн на гидротехнические сооружения вертикального типа, часть расчета посвящена моменту воздействия ложбины волны, когда потоки воды двигаются в противоположную сторону от берега. На основании сравнительного

анализа, было сделано предположение, что подобный расчет необходим и для определения нагрузок на гидротехнические сооружения от волн цунами LDN типа, воздействие которых начинается с понижения уровня воды (отлива). В связи с этим, было решено провести дополнительное исследование по изучению стоячих волн и более детального сравнения их с волнами цунами, на основании которого было разработано и представлено обоснованное дополнение к расчету сооружений типа вертикальной стенки для определения давления на вертикальную стенку при ложбине цунами.

В связи с различиями условных обозначений в научной литературе и нормативных документах, в предложенном дополнении к расчету, введены следующие изменения по обозначениям волновых характеристик, в соответствии с СП 292.1325800.2017:

1. Глубина воды – d (ранее по тексту обозначение h);
2. Высота волны - h (ранее по тексту обозначение H).

Для определения эпюры давления при впадине волны цунами следует определить значения давления в трех точках, первая из которых $z = 0$ – уровень спокойной поверхности, вторая $z = \eta_t$ – минимальный уровень при впадине волны и третья $z = d_f$ – уровень у основания вертикальной стенки. Точка спокойного уровня и точка у основания сооружения уже использовались в расчете при гребне волны, поэтому их положение не изменится, что касается точки минимального уровня при впадине волны, то тут нужно учитывать форму цунами. Исходя из описания N-волн, существуют обобщенная LDN волна, впадина имеет отличную амплитуду от гребня (рисунок 17) и равнобедренная LDN волна, амплитуда впадины и гребня волны равны (рисунок 18).

Учитывая особенности LDN волн, минимальное значение волновой поверхности у стенки η_t будет определяться следующим выражением (3):

$$\eta_t = k_{tN} h \quad (3)$$

где k_{tN} – вводимый поправочный коэффициент, равный:

- для равнобедренной LDN волны $k_{tN} = 1$;
- для обобщенной LDN волны $0 < k_{tN} < 1$.

Во втором случае, для обобщенной волны, точное значение коэффициента k_{tN} будет равно отношению амплитуды впадины волны к амплитуде гребня.

Тогда значения давления в точках при впадине волны цунами будут определяться следующими формулами (4, 5, 6):

$$z = 0, p = 0, \quad (4)$$

$$z = \eta_t, p = -\rho g \eta_t \quad (5)$$

$$z = d_f, p = -k_{fN} \rho g h \quad (6)$$

где k_{fN} – вводимый поправочный коэффициент, который определяется в соответствии с методом Goda для полного диапазона волновых воздействий (7):

$$k_{fN} = 1 - \frac{d_f}{d} \left(1 - \frac{1}{\cosh 2\pi d / \lambda} \right) \quad (7)$$

где λ – длина волны.

Значения горизонтальной P_{xt} и вертикальной P_{zt} удельных нагрузок будут определяться по площадям построенных эпюр давления волны на вертикальную стенку (рисунок 17).

Для подтверждения предложенного расчета по определению значений горизонтальной P_{xt} и вертикальной P_{zt} удельных нагрузок при впадении волны цунами, были рассчитаны нагрузки на примере реальных волн цунами, зарегистрированных в морском порту Корсаков (Сахалинская область). Для расчетов был принят наиболее опасный случай, когда цунами является равнобедренной LDN волной, т.е. амплитуда гребня равна амплитуде впадины и коэффициент $k_{tN} = 1$. Результаты расчетов при воздействии впадин волн, высотой 0,67м, 1м и 1,2м представлены на рисунке 18.

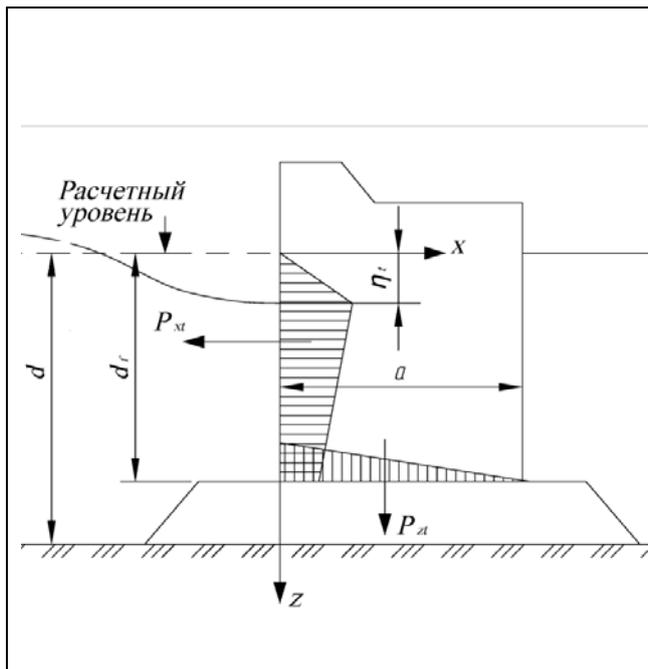


Рисунок 17 – Эпюры давления цунами на вертикальную стенку при впадении волны

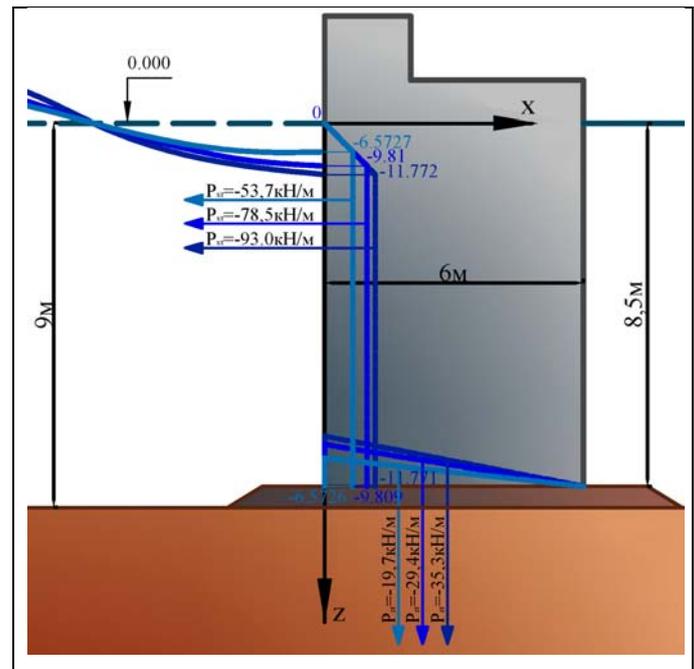


Рисунок 18 – Результаты расчета нагрузок при впадении волны цунами, голубым цветом – волна, высотой 0,67м, синим цветом – волна, высотой 1м, темно-синим цветом – волна, высотой 1,2м

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами диссертационной работы, была выполнена совокупность экспериментально-аналитических исследований по изучению поведения цунами волн, их физическому моделированию и воздействию на портовые гидротехнические

сооружения. По проведенным исследованиям и полученным результатам были сделаны следующие выводы:

1. При физическом моделировании цунами важно учитывать различие формы волн в зависимости от источника возникновения. Также следует учитывать изменение формы цунами при изменении глубины воды.

2. Разработана экспериментальная установка - универсальный генератор волн типа цунами различной формы на базе лаборатории гидравлики в НИУ МГСУ, которая позволяет моделировать различные волны цунами в зависимости от их источника возникновения и глубины воды.

3. Экспериментальные исследования формы различных видов цунами в зависимости от источника возникновения подтверждают различия между формой волн цунами, вызванных землетрясениями и формой волн цунами, вызванных оползнями.

4. Экспериментальные исследования по изменению формы смоделированных цунами, при различной глубине воды, а также подготовленное теоретическое обоснование процессов трансформации волны на подходе к берегу, подтверждают влияние глубины воды на форму волн цунами.

5. Сопоставительные анализы между полученными волнами с помощью разработанной экспериментальной установки, реальными записями волн цунами, а также смоделированными волнами аналогичных отечественных и зарубежных исследований, подтверждают, что разработанный универсальный генератор волн позволяет моделировать оползневые и сейсмические волны цунами.

6. Основой для разработки портового гидротехнического сооружения является правильный подбор исходных данных. Правильная оценка рельефа дна акватории и правильно определенные нагрузки, позволяют спроектировать и построить надежную конструкцию в наиболее подходящем месте и защитить акватории и береговые территории от воздействий цунами.

7. Подготовлены рекомендации по дополнению необходимой уточняющей информацией пунктов СП 292.1325800.2017 и СП 38.13330.2018 по расчетам горизонтальных и вертикальных удельных нагрузок от волн цунами, разбивающихся волн, прибойных волн и стоячих волн.

8. Разработано дополнение к расчету СП 292.1325800.2017 по определению горизонтальной P_{xt} и вертикальной P_{zt} удельных нагрузок от волн цунами сейсмического происхождения (N-волны) на гидротехнические сооружения вертикального типа, при котором рассматривается момент впадины волны, воздействующей на сооружение.

9. Проведено расчетное тестирование представленного дополнения к СП 292.1325800.2017, на примере наиболее крупных волн, зарегистрированных в морском порту

Корсаков, в ходе которой были определены нагрузки для расчетных случаев воздействия гребня и впадины каждой волны и сопоставлены результаты.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертации

1. Разработанный генератор волн типа цунами различной формы, показал отличные результаты моделирования цунами волн различной формы, что позволяет рекомендовать его для проверки нагрузок от волн цунами на проектируемые портовые гидротехнические сооружения. Была подана заявка в Федеральную службу по интеллектуальной собственности РФ на получения патента на разработанную экспериментальную установку и уже на сегодняшний день, разработанный генератор волн типа цунами различной формы является запатентованной полезной моделью, что позволяет применять его в различных хозяйственно-договорных работах и в области проектирования сооружений.

2. Разделение методик проектирования различных видов волн цунами, а также наблюдения и выводы при проведении опытов, позволяют дать рекомендации по расширению норм и правил физического моделирования, представленных в Приложении Е, СП №292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования».

3. Представленная теоретическая информация об N-волнах, рекомендуется к добавлению в нормативную документацию, а также в методические материалы по видам цунами волн.

4. Рекомендуется дополнить пункты СП 292.1325800.2017 и СП 38.13330.2018, уточняющей информацией как производить расчет горизонтальной P_{xc} и вертикальной P_{zc} удельных нагрузок, информацией по коэффициенту μ , зависящему от ширины сооружения и высоты постели сооружения, а также по случаям расчета с возвышающейся над дном постелью и верхом постели над уровнем дна.

5. Предложенное дополнение по определению нагрузок от волны цунами на сооружения типа вертикальной стенки, при котором рассматривается момент впадины волны перед сооружением, рекомендуется включить в раздел 7 СП №292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования».

6. Актуальными также являются дальнейшие экспериментальные исследования по исследованию поведения волн цунами и форм данных волн. Для увеличения характеристик волн, рекомендуется испытать разработанный генератор волн в гидравлическом лотке, больших размеров. Также рекомендуется провести дополнительные исследования по измерению заплеска волны в зависимости от крутизны берегового откоса.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Публикации в научных изданиях ВАК:**

1. Кантаржи И.Г. Воздействие длинных волн на береговые гидротехнические сооружения / И.Г. Кантаржи, Н.А. Губина, Р.Н. Гусаров // Гидротехническое строительство. – 2021.– № 2. – С. 48–52.
2. Гусаров Р.Н. Физическое моделирование длинных волн / Р.Н. Гусаров // Гидротехническое строительство. – 2022.– № 5. – С. 50–53.
3. Гусаров Р.Н. Экспериментальные исследования длинных волн в НИУ МГСУ / Р.Н. Гусаров, И.Г. Кантаржи, Г.В. Волгин // Гидротехническое строительство. – 2023.– № 1. – С. 47–52.

Публикации в научных изданиях Scopus:

4. Kantarzhi, I.G. Effects of Long Waves on Coastal Hydraulic Structures / I.G. Kantarzhi, N.A. Gubina, R.N. Gusarov // Power Technology and Engineering. – 2021.– Vol. 55. – №2. – P. 219–222.

Публикации в других научных журналах и изданиях:

5. Кантаржи И.Г. Воздействие длинных волн на береговые гидротехнические сооружения /И.Г. Кантаржи, Н.А. Губина, Р.Н. Гусаров // Сборник тезисов докладов III Всероссийского научно-практического семинара. Москва. – 2020. – С.45.
6. Гусаров Р.Н. Физическое моделирование волн цунами методом пневматического цунамигенератора / Р.Н. Гусаров // Моря России: Год науки и технологий в РФ - Десятилетие наук об океане ООН. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Севастополь. – 2021. – С.235–236.
7. Гусаров Р.Н. Физическое моделирование длинных волн / Р.Н. Гусаров // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. Сборник тезисов докладов IV Всероссийского научно-практического семинара. Москва. – 2021. – С.68.
8. Гусаров Р.Н. Теоретические и практические исследования волн цунами / Р.Н. Гусаров, И.Г. Кантаржи // Моря России: Вызовы отечественной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Севастополь. – 2022. – С.73–74.
9. Гусаров Р.Н. Теоретические и практические исследования длинных волн в НИУ МГСУ / Р.Н. Гусаров, И.Г. Кантаржи, Г.В. Волгин // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРАВЛИКИ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА. Сборник тезисов докладов V Всероссийского научно-практического семинара. Москва. – 2022. – С.91.
10. Гусаров Р.Н. Лабораторные исследования волн цунами в НИУ МГСУ / Р.Н. Гусаров, И.Г. Кантаржи // XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования - в

практику берегопользования. Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием. Калининград. – 2022. – С.215–218.

11. Гусаров Р.Н. Опыт и задачи физического моделирования волн цунами/ Р. Н. Гусаров, И.Г. Кантаржи // Геориск . – 2022. – Том 16 – №1. – С.8–19.

Свидетельства, патенты и другие виды интеллектуальной собственности, зарегистрированные в установленном порядке:

1. Патент на полезную модель №220024 Универсальный генератор волн типа цунами различной формы. Авторы: Р.Н. Гусаров, И.Г. Кантаржи. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).