

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Гусаров Роман Николаевич

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛН ЦУНАМИ НА ПОРТОВЫЕ  
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

2.1.6. – Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Кантаржи Измаил Григорьевич

Москва – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
ГЛАВА 1. ОБЗОР И АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	15
1.1. Введение .....	15
1.2. Общие сведения о волнах цунами.....	15
1.2.1 .Классификация волн цунами .....	18
1.2.2. Физика и особенности волн цунами .....	26
1.3. Актуальность цунами в России .....	34
1.4. Гидротехнические сооружения, защищающие от цунами волн .....	41
1.4.1. Оградительные гидротехнические сооружения .....	42
1.4.2. Берегозащитные гидротехнические сооружения .....	44
1.4.3. Нормативы для проектирования гидротехнических сооружений, находящихся в цунамиопасных районах.....	47
1.5. Физическое моделирование волновых воздействий .....	48
1.6. Выводы по первой главе.....	53
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ .....	55
2.1. Введение .....	55
2.2. Физическое моделирование цунами .....	55
2.2.1 .Обзор существующих методов физического моделирования цунами. 56	56
2.2.2. Специфика моделирования цунами. Одиночные волны и N-волны ....	62
2.2.3. Основные вопросы физического моделирования.....	68
2.3. Экспериментальная установка на базе гидравлической лаборатории НИУ МГСУ.....	73

2.3.1. Идея создания универсального генератора волн типа цунами различной формы .....	73
2.3.2. Описание установки .....	74
2.3.3. Принятые методики моделирования и их преимущества.....	76
2.3.4. Разработка проекта экспериментальной установки .....	78
2.3.5. Описание оборудования и измерительных систем.....	83
2.3.5.1. Оборудование, используемое в экспериментах.....	83
2.3.5.2. Измерительные приборы, используемые в экспериментах.....	86
2.4. Выводы ко второй главе .....	88
<b>ГЛАВА 3. ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>91</b>
3.1. Введение .....	91
3.2. Программа экспериментов.....	91
3.3. Первые опыты, проверка методики моделирования цунами, вызванных сейсмической активностью.....	92
3.4. Усовершенствование экспериментальной установки и увеличение высоты полученных моделей волн .....	94
3.5. Исследование зависимости формы и высоты смоделированных волн от глубины воды .....	97
3.5.1. Трансформация волн цунами на подходе к берегу .....	97
3.5.2. Изменение формы волны в теории длинных волн.....	100
3.5.2.1. Парадокс длинных волн.....	105
3.5.3. Эксперименты в НИУ МГСУ по изучению формы волн цунами .....	107
3.5.4. Обоснование полученных экспериментальных данных теоретическими наблюдениями .....	116

3.6. Исследование зависимости формы и высоты смоделированных волн от габаритов сечения воздушного клапана в экспериментальной установке. ....	120
3.7. Исследование эффекта отражения смоделированных волн.....	123
3.8. Опыты по моделированию цунами от оползней... ..	126
3.8.1. Общие сведения о моделировании цунами методом скользящего блока.....	126
3.8.2. Проведение серии опытов с изменением угла наклона поверхности, по которой опускается блок.....	128
3.8.3. Сравнение полученных результатов с моделями волн вызванных сейсмической активностью.....	131
3.9. Сравнение полученных результатов с реальными записями волн цунами и смоделированными волнами отечественных и зарубежных исследований ...	134
3.9.1. Сравнение полученных моделей волн цунами, вызванных землетрясением с реальными записями волн .....	134
3.9.2. Сравнение полученных моделей волн цунами, вызванных оползнями со смоделированными волнами отечественных и зарубежных исследований.....	137
3.10. Выводы к третьей главе.....	142
<b>ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЗОК ОТ ВОЛН ЦУНАМИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ.....</b>	<b>145</b>
4.1. Введение .....	145
4.2. Особенности проектирования и расчетов гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах .....	145
4.2.1 . Исходные данные для проектирования гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах .....	146



4.2.2. Особенности оценки цунами параметров в прибрежной зоне и на берегу. Определение обрушения волны.....	148
4.2.3. Накат на берег необрушенных цунами .....	149
4.2.3.1. Методика №1.....	149
4.2.3.2. Методика №2.....	150
4.2.4. Расчет нагрузок от воздействия цунами на необтекаемые гидротехнические сооружения.....	152
4.3. Сравнительный анализ расчета нагрузок от волн цунами на гидротехнические сооружения типа вертикальной стенки с аналогичными расчетами от других видов волн .....	154
4.4. Исследование сходства взаимодействия стоячих волн и цунами с гидротехническими сооружениями вертикального типа.....	159
4.5. Предложение по расчету эпюры давления при ложбине волны цунами.	163
4.6. Проверка предложенной методики на примере расчета нагрузок от волн цунами в морском порту Корсаков .....	166
4.7. Выводы к четвертой главе .....	171
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	177
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМАТИКЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	199
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ДОКУМЕНТЫ ПО ПАТЕНТУ НА РАЗРАБОТАННУЮ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНУЮ УСТАНОВКУ.....	201

## ВВЕДЕНИЕ

### **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. Алексеева, 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.**

Основной метод, 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 оползневоего 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.

### **Благодарности.**

Выражаю огромную благодарность научному руководителю, доктору технических наук, профессору кафедры Гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ Кантаржи Измаилу Григорьевичу за поддержку и помощь на протяжении всего пути научного исследования, представленного в диссертации; кандидату технических наук, доценту кафедры Гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ, заведующему лабораторией Гидравлики и гидромеханики Волгину Георгию Валентиновичу за предоставленную возможность проводить экспериментальные исследования и размещать экспериментальную установку в лаборатории Гидравлики и гидромеханики НИУ МГСУ; кандидату технических наук, заведующей НОЦ «Гидротехника» Шунько Наталье Владимировне за предоставленную возможность использования оборудования для экспериментальных исследований.

Отдельная благодарность кандидату технических наук, доценту кафедры Гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ Пиляеву Сергею Ивановичу за руководство и поддержку при написании выпускной квалификационной работы в магистратуре, которая послужила основой для выбора направления научных исследований, представленных в диссертации.

Не могу не отметить, что на протяжении обучения в аспирантуре, проведения всех научных исследований и подготовки диссертационной работы я чувствовал невероятную поддержку от близких людей, которые были рядом в трудную минуту, верили в меня и помогали во всем. Огромная благодарность Гусаровой Нине Петровне, Гусарову Николаю Григорьевичу, Гусаровой Ирине Николаевне, Плиеву Алану Иналовичу, Савушкиной Валентине Петровне, Долгушеву Тимофею Владимировичу, Ратковичу Евгению Львовичу, Долгушевой Вере Витальевне, Мишиной Яне Сергеевне, Сахибгареевой Диане Руслановне,

Березину Евгению Кирилловичу и Демянику Виктору Вячеславовичу за то, что были со мной в этот непростой, ответственный и очень важный период моей жизни.

# ГЛАВА 1. ОБЗОР И АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1 Введение

В первой главе диссертации приведен обзор информации по выбранной тематике, представлены современные представления о природе и опасности волн цунами, их взаимодействия с гидротехническими сооружениями, расположенными в цунамиопасных районах, также даны основы физического моделирования волновых воздействий. Представлена основная научная информация, послужившая фундаментом для подготовки следующих глав диссертации, раскрывается актуальность диссертационного исследования и обсуждается ряд трудностей, связанных с проектированием гидротехнических сооружений в местах воздействия волн цунами и с физическим моделированием данного явления. Эти проблемы и служат главными причинами проведения, представленных в работе, исследований.

## 1.2 Общие сведения о волнах цунами

Опасные природные катастрофы являются неотъемлемой частью нашего мира. Их масштабность очень сложно описать какими-либо словами или передать на фотографиях или видеосъемке, а их воздействия бывают настолько серьезными, что обычный человек, не сталкивающийся никогда с этими явлениями, не сможет даже представить, к каким последствиям приводят данные катастрофы. Одними из таких стихийных бедствий являются волны цунами, способные привести к большим разрушениям зданий, сооружений, а бывает и целых городов, а главное, к человеческим жертвам среди населения.

Цунами в переводе с японского языка означает «большая волна в гавани», это длинные гравитационные волны, период которых достигает от нескольких минут до нескольких часов, а длина волны во много раз превосходит глубину воды в месте образования волны. Так, длина волны цунами может достигать 2000 км, а скорость волн в открытом океане достигает более 700 км/час. Когда волна приближается к суше, скорость сильно уменьшается, также уменьшается и длина

волны по мере уменьшения глубины воды, а высота волны, наоборот возрастает (рисунок 1.1) [1, 2, 3, 4].

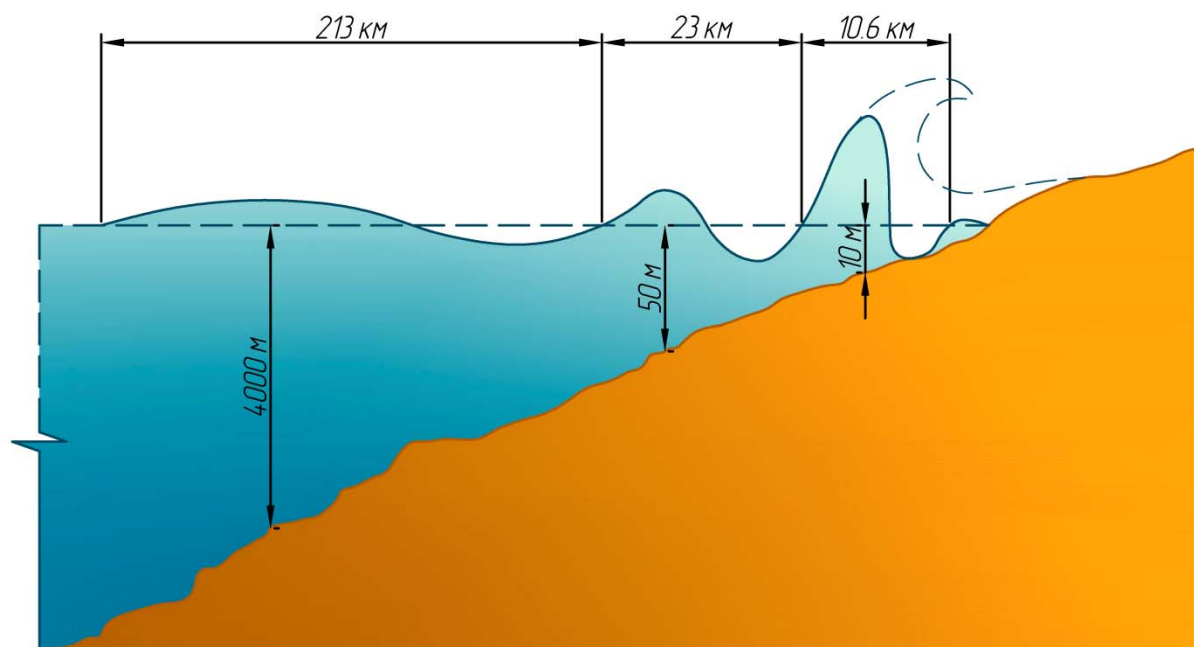


Рисунок 1.1 – Изменение характеристик волны цунами по мере ее приближения к берегу (адаптировано из [5])

Основная опасность цунами заключается в трех факторах: быстрое затопление береговых участков суши, силовое воздействие волны на здания и сооружения, а также эрозия берега. Большая масса воды, обрушающаяся на берег с большой скоростью, способна разрушать здания и сооружения. Бывали случаи, когда волна перемещала целые дома, разрушала капитальные сооружения, такие как мосты, причалы и ограждения [1, 2].

В большинстве случаев цунами не является одиночной волной, а представляет целую серию волн, первая из которых не является самой крупной. В истории были и такие моменты, когда после первой волны, люди возвращались на берег и оказывались в ловушке, потому что последующие волны были крупнее и опаснее первой ударившей волны. Последующие волны опасны и еще по одной причине, возвращающийся к берегу поток воды уже несет в себе обломки

строений, мусора, сооружений, судов, автомобилей, деревьев и других различных предметов, унесенных в океан при отливе первой волны.

Исследование такого явления как цунами, является актуальным направлением исследований в современной науке. На сегодняшний день известны около 2500 волн цунами за всю историю [4, 6]. Согласно материалам центра географических данных NOAA [7], только за последние сто лет было зафиксировано 141 случай возникновения цунами, 123 из которых привели к существенным последствиям и принесли серьезный ущерб. В XXI веке произошло уже больше 10 страшных событий [4], связанных с воздействием цунами на береговые территории. Был нанесен серьезный ущерб прибрежным территориям, разрушены сотни домов, а жертвами стали сотни тысяч человек.

Основные места образования цунами расположены на окраинах Тихого океана (рисунок 1.2). Источники возникновения волн цунами образуют периметр, по которому расположены места с наиболее высокими показателями сейсмической и вулканической активностей в Тихом океане, данный периметр получил название «огненное кольцо» [8, 9]. Помимо Тихого океана, опасность возникновения цунами присутствует в Индийском и Атлантическом океане, а также в Средиземном, Карибском и Черном морях.

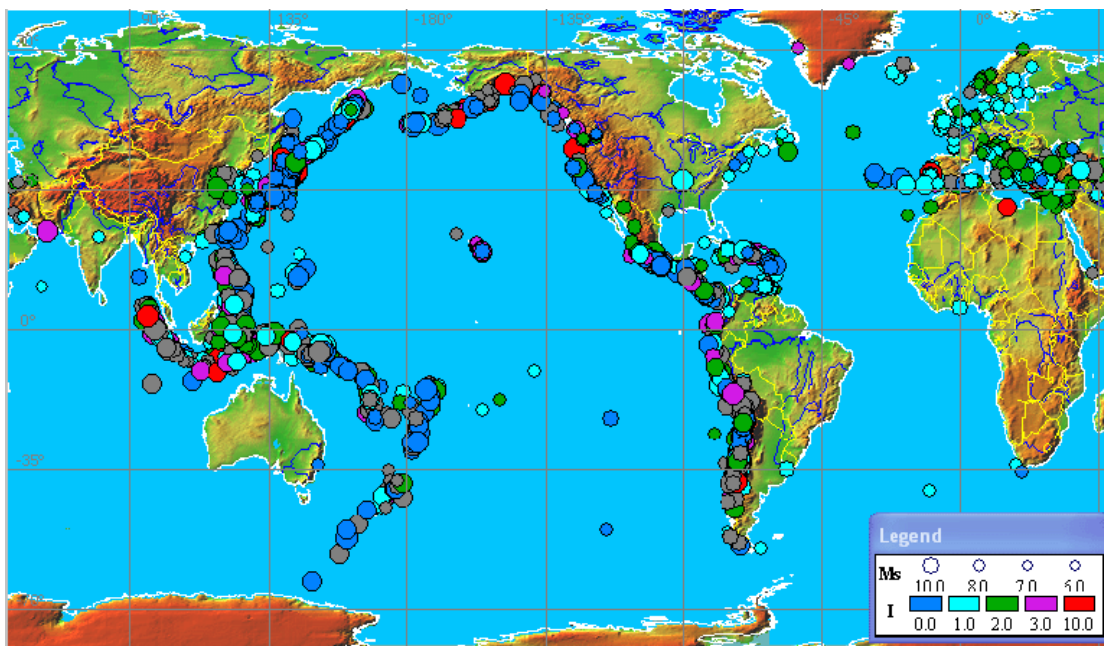


Рисунок 1.2 – Источники возникновения волн цунами в период с 1628 г. по 2006 г. [10]

### 1.2.1 Классификация волн цунами

В зависимости от источника, порождающего волну, цунами разделяют:

- **Сейсмические цунами.** Подводные землетрясения, магнитудой более 7 баллов по шкале Рихтера, являются самой распространенной причиной возникновения цунами (происходит приблизительно в 82% случаев). При подводном землетрясении, на поверхности воды начинают появляться волны, высотой 1-2 м, которые распространяются со скоростью более 100 м/с. В процессе землетрясения происходят изменения дна океана (смещение), в результате чего, одна часть дна океана опускается, а другая поднимается, что порождает вертикальные колебания толщи воды (рисунок 1.3) [11].

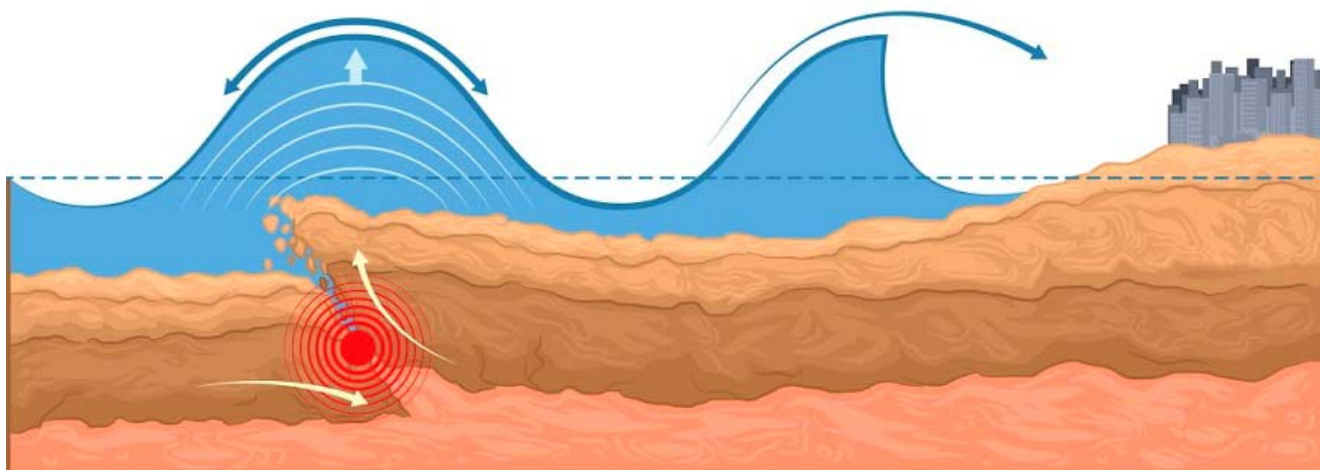


Рисунок 1.3 – Цунами, возникшее в результате землетрясения (адаптировано из [12])

Одним из наиболее известных примеров сейсмических цунами, было воздействия волн в 2004 году на целый ряд побережий различных стран в Индийском океане [13]. Катастрофа была вызвана землетрясением (рисунок 1.4), к северу от острова Симёлуэ (Индонезия). Волны, высотой более 15м (рисунок 1.5), достигли береговых территорий Тайланда, Индонезии, Индии, Шри-Ланка и других государств. Трагедия унесла жизни более 225 000 человек (по разным оценкам число погибших от 225 000 до 300 000 человек) [13].





Рисунок 1.4 – Карта распространения цунами 26 декабря 2004 года от источника формирования волн (эпицентра землетрясения) [14]



Рисунок 1.5 – Последствия цунами в Индийском океане в 2004 году [14]

Еще одним страшным примером сейсмического цунами, являются события, произошедшие в Японии 11 марта 2011 года [15, 16]. Вызванное землетрясением недалеко от восточного побережья острова Хонсю, цунами (рисунок 1.6) ударило

по побережью Японии, сметая все на своем пути. Высота волны, зафиксированная в префектуре Мияги, составляла до 40,5м. Официальное число жертв данного цунами и землетрясения составило 15869 человек [15, 16].



Рисунок 1.6 – Цунами 2011 года в Японии [17]

- **Оползневые цунами.** Потoki, которые образуются, при подводных оползнях, а также обрушении камней и льда в воду, могут стать источником крупных волн цунами в прибрежной зоне [18, 19]. «Оползневые» цунами (рисунок 1.7), в отличие от цунами, сейсмического происхождения, характеризуются более локальным характером, также данные волны, чаще всего, имеют меньшую длину и период, чем цунами от землетрясения, в связи с этим быстро затухают. Однако по своей сокрушительной силе цунами от оползней ничуть не уступают сейсмическим цунами. Также «оползневые цунами» опасны и еще по одной причине, такие волны могут выйти на берег уже спустя несколько минут после того как произойдет оползень. Оползни составляют 6% случаев возникновения волн цунами [18, 19].



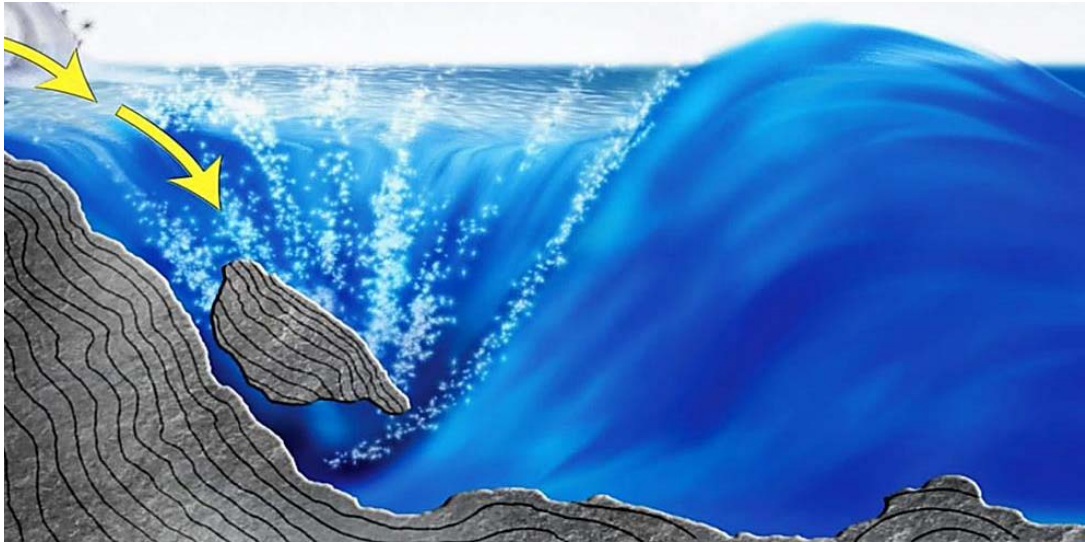


Рисунок 1.7 – Цунами, возникшее в результате оползня (адаптировано из [20])

Известным примером оползневого цунами послужили события, произошедшие в заливе Литуйя 9 июля 1958 года [21]. Мегацунами, образовавшиеся в результате оползня 30 миллионов кубических метров льда и камней, является, по сей день, самой крупной волной в истории человечества, ее высота (высота заплеска) составляла более 500м. Волна, двигалась по заливу со скоростью 160 км/час, поднимаясь вверх по склонам, достигала деревьев, растущих на высоте 524 метра (рисунок 1.8). Жертвами катастрофы стали 5 человек [21].

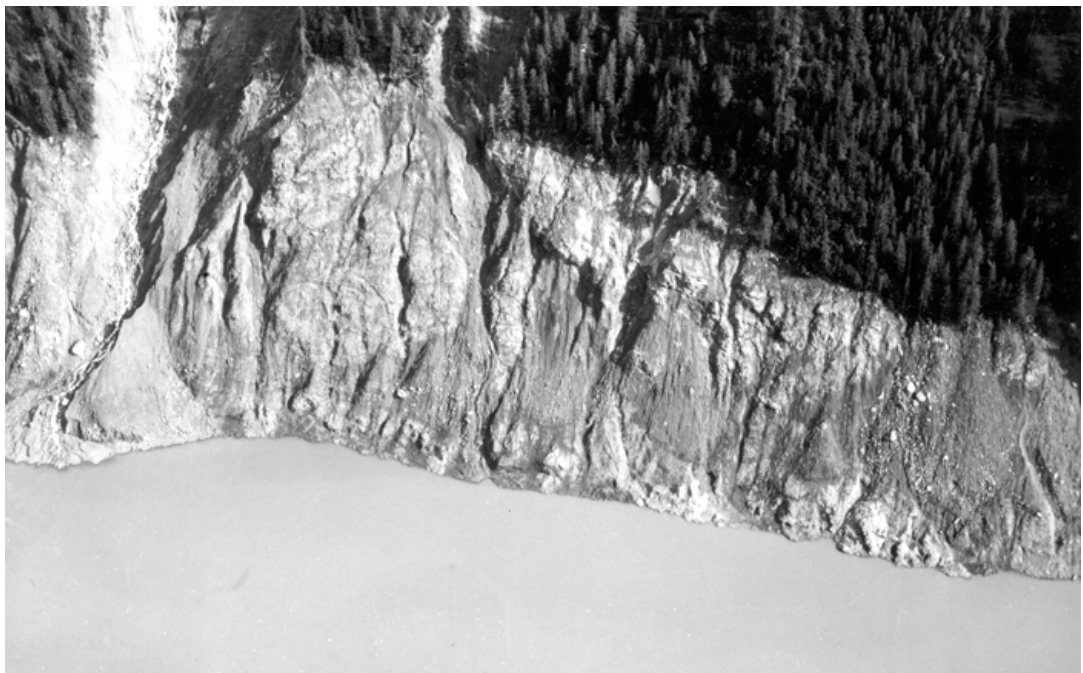


Рисунок 1.8 – Южный берег залива Литуйя после воздействия цунами [22]

- **Цунами, вызванные извержением подводных вулканов.** При извержении подводного вулкана (рисунок 1.9) [23, 24], расположенного вблизи берега или на отдельном острове, происходит выброс большого количества энергии, которая воздействует на окружающую толщу воды в океане. Помимо энергии происходит заполнение кратера извергнутым материалом, который соприкасается и выталкивает огромный объем воды, тем самым образуя гигантскую волну. Волны цунами от извержений вулканов составляют 5% случаев от общего числа цунами [23, 24].

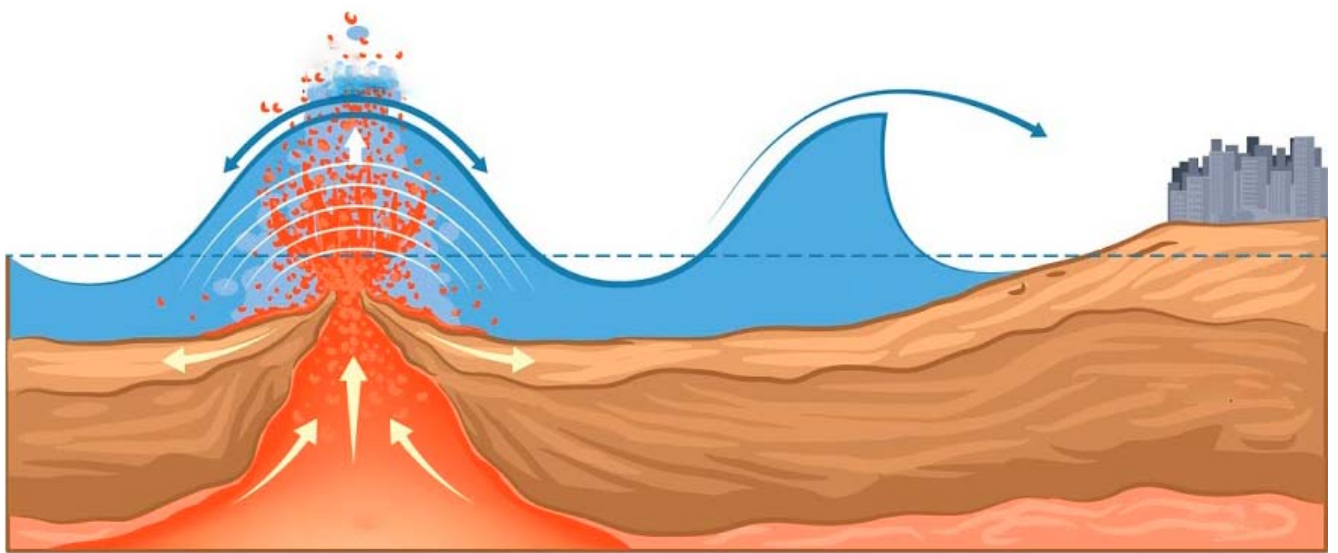


Рисунок 1.9 – Цунами, возникшее в результате извержения вулкана (адаптировано из [12])

Примером данного типа цунами являются волны, образованные от извержения вулкана Кракатау в 1883 году (рисунок 1.10) [25, 26, 27]. При извержении вулкана происходили мощные взрывы, порождающие гигантские волны, каждая из которых, обрушивалась на близлежащие острова. Когда вулкан окончательно раскололся и обвалился в океан, сформировалась самая крупная волна, высотой 42 м. Поток воды оказался настолько мощным, что смог выбросить на берег коралловый кусок дна, весом 600 т, а также перевернуть находящееся поблизости судно. Цунами разрушало 165 поселений на островах Ява и Суматра (Индонезия), а также унесло жизни более 30000 человек [25, 26, 27].



Рисунок 1.10 – Распространение цунами от извержения вулкана Кракатау [28]

- **Метеоцунами.** Изменения атмосферного давления, такие как холодный фронт, сильные грозы, тайфуны, ураганы или шквалы могут создать метеоцунами (рисунок 1.11) [6, 29, 30, 31], волны, сопоставимые по характеристикам с волнами цунами от других источников. Для того, чтобы появилось сильное метеоцунами требуется сочетание нескольких условий, первое - должны происходить интенсивные мелкомасштабные атмосферные колебания, которые распространяются в одном определенном направлении и с одинаковой скоростью, второе - подходящая топография рельефа дна, способствующая созданию и распространению волновых колебаний на определенном участке. Метеорологические цунами составляют 3% от общего числа данных волн [6, 29, 30, 31].



Рисунок 1.11 – Метеорологическое цунами (адаптировано из [32])

В связи со спецификой комплекса условий образования метеорологических цунами, данные явления происходят регулярно в одних и тех же местах. Одно из таких мест это портовый городок Века-Луки (Хорватия), 21 июня 1978 года на город обрушилось метеоцунами [29]. В течение нескольких часов город периодически заливало водой, уровень которой то поднимался на 1,5-2 метра выше причалов и набережных (рисунок 1.12), то наоборот опускался, обнажая дно акватории (рисунок 1.13).





Рисунок 1.12 – Цунами в городе Века-Луки. Повышение уровня воды [29]



Рисунок 1.13 – Цунами в городе Века-Луки. Понижение уровня воды [29]

Помимо основных перечисленных источников образования волн цунами, также есть еще другие факторы образования волн цунами:

- **Цунами, вызванное деятельностью человека.** С XX века в мире была развита атомная энергетика. Люди создали оружие невероятной разрушительной силы, которое также способно вызвать волны типа цунами. В целях обеспечения

безопасности, на сегодняшний день, запрещается проводить подводные испытания атомного оружия [33].

- **Цунами, вызванное падением метеоритов.** Космические тела, сталкивающиеся с нашей планетой, также могут быть причиной возникновения цунами. Метеориты могут достигать диаметров более ста, а порой и тысячи метров, при падении такого тела в океан, могут образоваться крупные волны. Однако до падения метеорит может потерять большую часть своей энергии и не принести особого вреда [33].

Также цунами разделяют по масштабу области, на которую распространяется разрушительное воздействие волн. По данному критерию различают следующие типы цунами:

- **Локальные цунами.** Данный тип представляет собой те волновые воздействия, разрушительная сила которых, проявляется в пределах 100 км от источника [4, 34].

- **Региональные цунами.** Цунами, воздействия которых приводят к разрушениям на расстоянии вплоть до 1000 км от источника возникновения [4].

- **Трансокеанские цунами (телецунами или удаленные).** Когда расстояние, на котором происходят разрушительные последствия цунами, превышает 1000 км, то данный тип волн является удаленным [4, 35].

Большая часть волн цунами относятся к первым двум типам, телецунами более редкое явление, но представляет собой большую опасность, чем локальные и региональные цунами, так как такие волны способны пересекать океаны, сохраняя свой разрушительный потенциал. Именно, сохранение способности разрушать все на своем пути, передвигаясь на большие расстояния, является отличительной чертой цунами от других природных явлений.

### 1.2.2 Физика и особенности волн цунами

Волны цунами по своей природе отличаются от других волн, начиная с источника возникновения, заканчивая своим поведением в прибрежных зонах. Как было сказано ранее, период цунами попадает в диапазон от нескольких минут

до нескольких часов, что располагает данный тип волн между группой ветровых волн и волн зыби, а также группой штормовых нагонов и приливов (рисунок 1.14) [6].

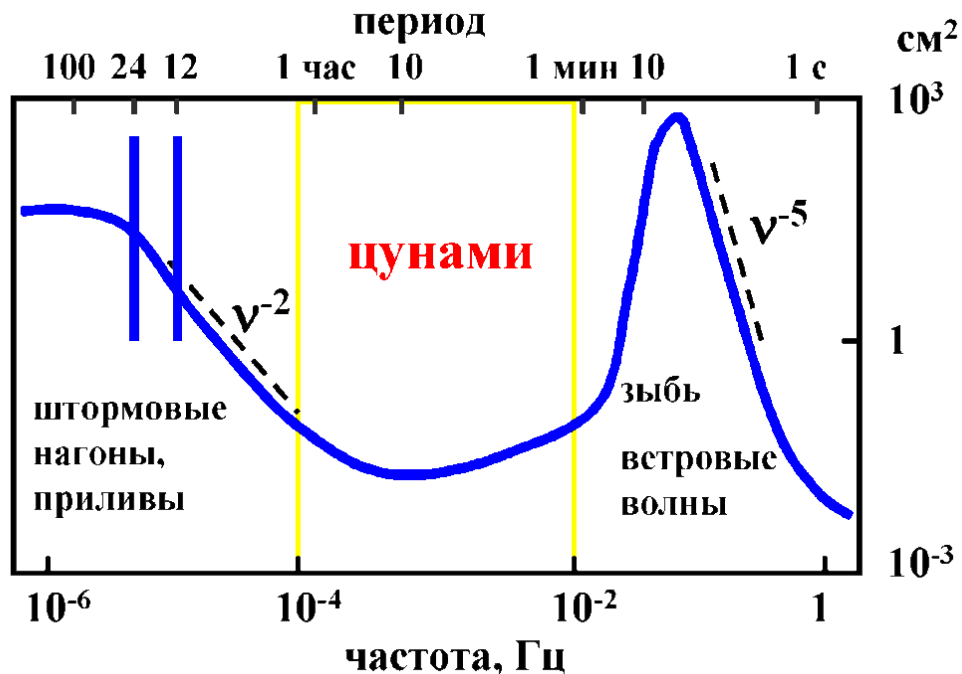


Рисунок 1.14 – Спектр гравитационных поверхностных волн [6]

В гидродинамике цунами описываются как длинные гравитационные волны. Длинными волнами являются такие волны, расстояния между гребнями (длина волны) которых, значительно превышает глубину воды ( $\lambda \gg h$ ). Скорость распространения длинных волн определяется глубиной воды  $h$  и ускорением свободного падения  $g$  по формуле (1.1) [36]:

$$c = \sqrt{gh}, \quad (1.1)$$

Так при больших глубинах порядка  $h=1$  км, волны цунами будут распространяться со скоростью равной 100 м/с (360 км/ч), при глубине  $h=4$  км, скорость будет равна 200 м/с (720 км/ч), при таких скоростях волна может в кратчайшие сроки добраться от источника возникновения до береговых территорий. Служба спасения и оповещения, при получении сигнала о землетрясении или подводной вулканической активности (т. е., получив сведения о возможном источнике возникновения цунами), производит расчет времени, за которое волна цунами доберется до берега по формуле (1.2) [36]:

$$c(x, y) = \sqrt{gh(x, y)}, \quad (1.2)$$

где  $x$  и  $y$  это координаты точки эпицентра на картах глубин океана [36] (рисунок 1.15).

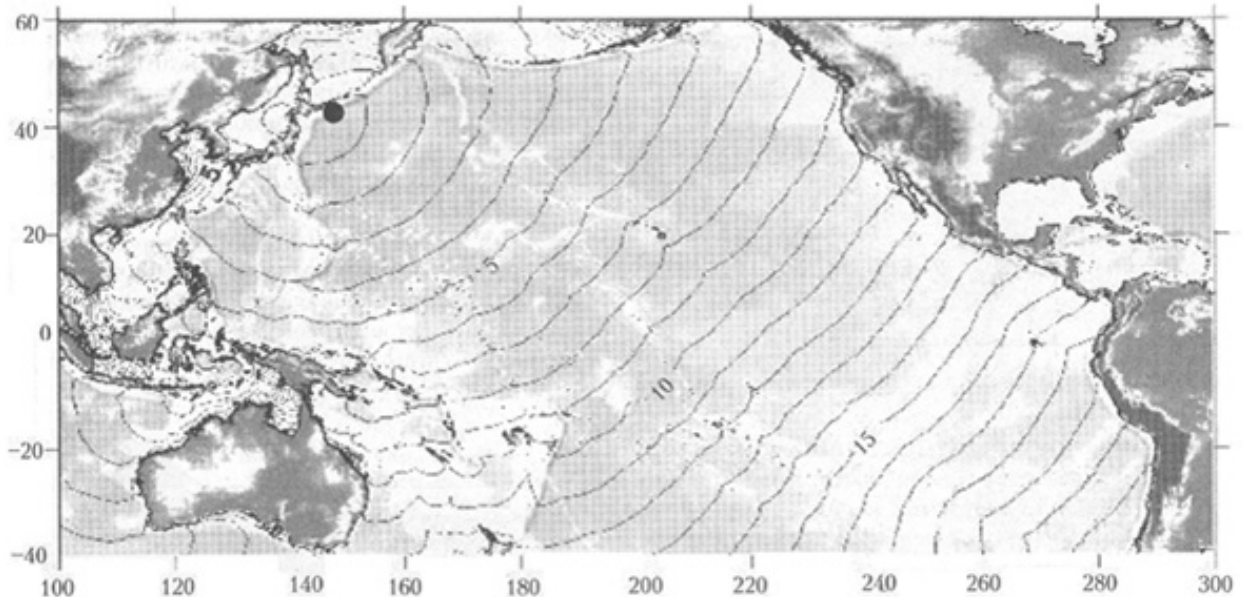


Рисунок 1.15 – Пример расчета времени распространения цунами. Изолинии на карте обозначают часы, а источник возникновения показан черной точкой [36]

Период  $T$  длинных волн попадает в диапазон от  $10^2$  до  $10^4$  с [4, 6].

С помощью формулы (1.3), зная период и скорость распространения волны, можно получить длину волн [36]:

$$\lambda = T\sqrt{gh}, \quad (1.3)$$

При глубине воды 1 км и диапазоне периодов, указанном ранее, длина волны будет равна от 10 до 1000 км, при глубине 4 км длины будут достигать от 20 до 2000 км [4, 6].

Высота длинных волн в открытом океане составляет около 1 м и, очень редко, может превысить данное значение, поэтому длинные волны не несут большой опасности на открытых водных пространствах и, как правило, почти незаметны для судов в открытом океане. Хотя бывают и исключения, так в эпицентре землетрясения, амплитуда сдвига толщи воды может достичь более 10 м, однако и в такой ситуации амплитуда волн будет много меньше глубины воды в месте источника колебаний. При выходе цунами на прибрежные акватории происходит изменение характеристик волны (уменьшается скорость,



увеличивается высота) за счет уменьшения глубины воды и изменения рельефа дна. Это является одной из особенностей цунами. В теории длинных волн связь между глубиной воды на акватории и такими характеристиками как скорость горизонтального течения  $U$  и амплитуда волны  $\xi$  описывается законом Грина (закон «1/4») по формуле (1.4) и законом для скорости течений (закон «3/4») по формуле (1.5) [6].

$$Q \sim \xi^2 c \sim \xi^2 \sqrt{h} \sim \xi h^{1/4} = \text{const} \quad (1.4)$$

$$Q \sim U^2 h c \sim U^2 h^{3/2} \sim U h^{3/4} = \text{const} \quad (1.5)$$

Закон Грина, подтверждает, что уменьшение глубины воды в прибрежной зоне увеличивает высоту волны цунами (рисунок 1.16), также и наоборот при большей глубине волна становится меньше. Скорость горизонтального течения также возрастает и это происходит значительно быстрее роста амплитуды волны, в связи с этим опасность от цунами угрожает не только береговым территориям, а еще и судам, находящимся в береговых зонах [6].

$$W \sim \xi^2 \quad Q \sim \xi^2 c \sim \xi^2 \sqrt{h} = \text{const}$$

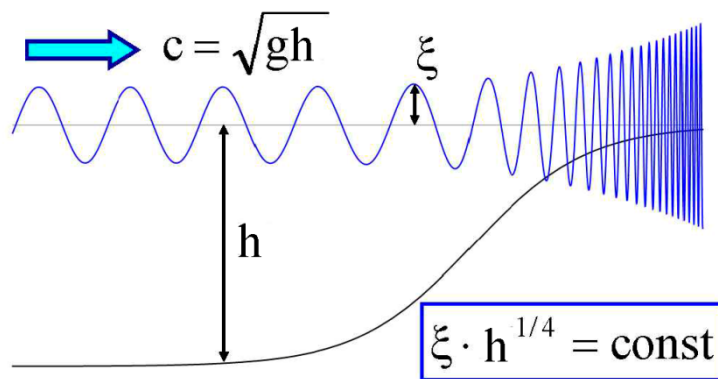


Рисунок 1.16 – Закон Грина и закон  $3/4$  (адаптировано из [6])

Также особенностью волны цунами является сохранение разрушительного потенциала при прохождении волной больших расстояний (рисунок 1.17). Амплитуда волны при прохождении больших расстояний изменяется в соответствии с выражением (1.6) [6]:

$$\xi(r) = \frac{1}{\sqrt{r}}, \quad (1.6)$$

где  $r$  – расстояние от эпицентра.

Энергия волны, согласно закону сохранения, будет находиться в соответствии со следующим выражением (1.7) [6]:

$$W \sim \xi^2 r = \text{const}, \quad (1.7)$$

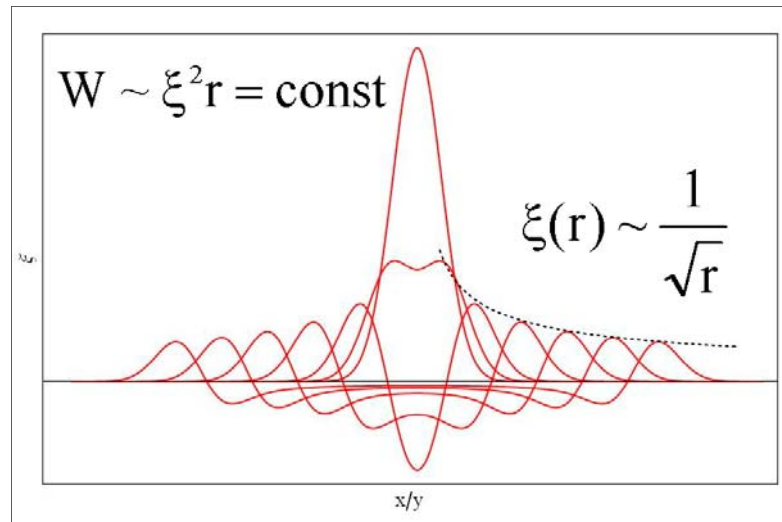


Рисунок 1.17 – Волновые профили в последовательные моменты времени [6]

При движении в океане с ровной поверхностью дна волна все же начинает затухать, ее энергия начнет уменьшаться, также начнет уменьшаться высота волны, согласно тому же выражению (1.6). Данный процесс затухания еще называют «геометрическое расхождение волны». Помимо данного процесса, волна может затухать и рассеиваться на неоднородном рельефе дна.

При воздействии волны на крутой берег цунами отражаются, что может привести к увеличению высоты цунами на берегу. Если берег представляет из себя почти вертикальную стенку (скальный клиф), то коэффициент отражения волны будет приближен к 1. На пологом берегу выход цунами на мелкую воду сопровождается ее обрушением. При высоте волны  $H$  близкой к глубине воды  $h$  происходит существенное увеличение разницы между скоростью движения в гребне и подошве волны. Так, гребень волны, двигаясь со скоростью  $\sqrt{g(h+H)}$ , «догоняет» подошву волны, которая движется со скоростью  $\sqrt{gh}$ , и в этот момент происходит обрушение волнового фронта [36] (рисунок 1.18).

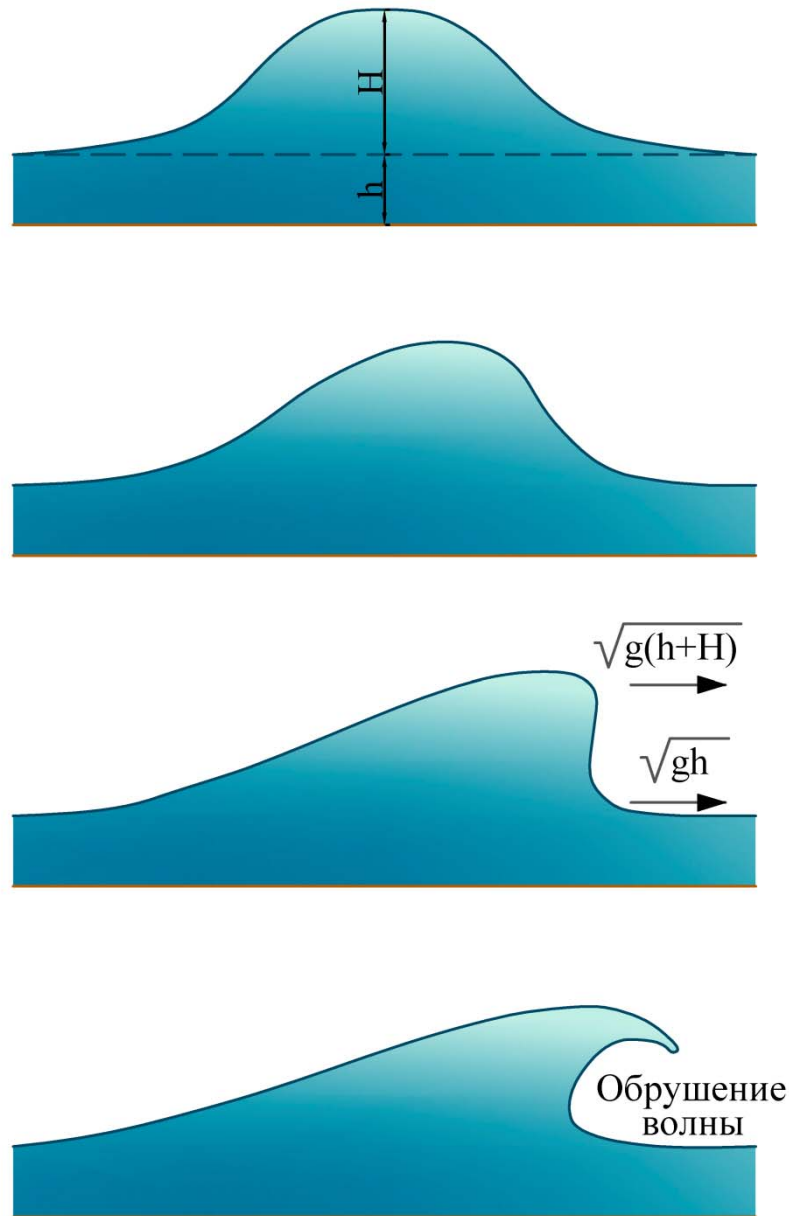


Рисунок 1.18 – Схема обрушения цунами на мелкой воде (адаптировано из [36])

Траектория цунами подвержена такому явлению как преломление. Коэффициентом преломления длинных волн является скорость  $\sqrt{gh}$ . Так как при подходе волны к прибрежной зоне уменьшается скорость движения волны при уменьшении глубины воды, то траектория волны всегда будет изменять свое направление в сторону мелкой воды [36].

Еще одной особенностью цунами является то, что при ее движении, происходит фокусирование волны и изменения формы за счет рельефа дна, т.е.

неровности возвышения и впадины на морском дне изменяют направление распространения волн.

Если предположить, что существует источник, распространяющий волновой луч в направлении  $N(S)$  (рисунок 1.19) то при одинаковой скорости распространения траектория луча будет представлять прямую линию. Если же скорость изменяется, то траектория луча будет отклоняться от прямого направления и переходить в кривую, которая характеризуется распределением скоростей [6].

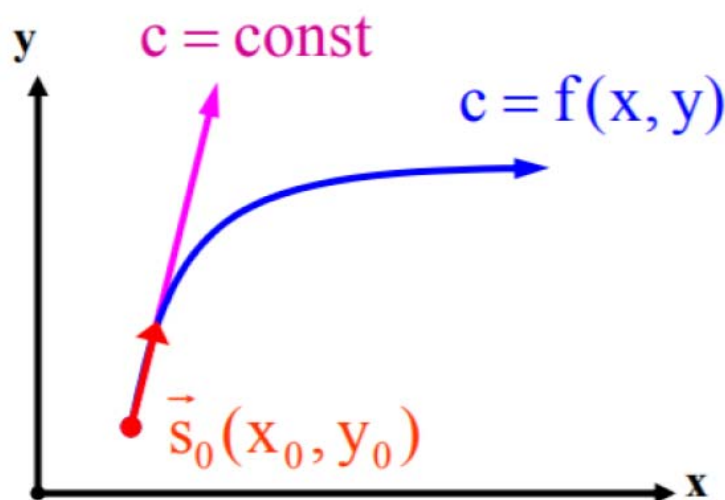


Рисунок 1.19 – Траектория луча  $N(S)$  то при постоянной и изменяющейся скорости [6]

В соответствии с геометрической оптикой, по закону Снеллиуса [4, 6, 37] распространяющийся луч в одной среде, где показатель преломления равен одному значению, попадает в другую среду, с показателем преломления, отличным от первой среды. Тогда отношение угла преломления к углу падения (1.7) будет иметь следующий вид [6]:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2} \quad (1.7)$$

По закону Снеллиуса, значение, равное отношению синуса угла падения к скорости распространения света в среде будет постоянным. Изменение направления векторов лучей, при изменяющемся показателе преломления является таким эффектом, как рефракция. При падении луча на среду, у которой показатель преломления выше, под критическим углом возникает исчезновение

преломленного луча и останется отраженный луч, направленный по криволинейной траектории. Такие процессы происходят и в тех средах, где показатель преломления изменяется равномерно и плавно – этот эффект называется отражением от высокоскоростной области (рисунок 1.20) [6].

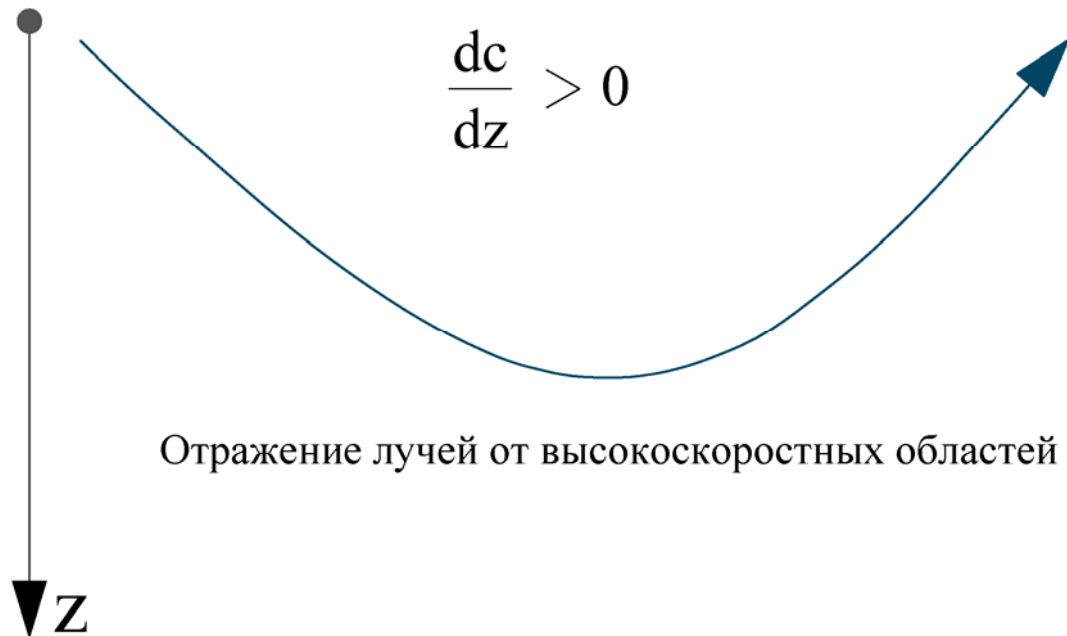


Рисунок 1.20 – Схема отражения луча траектории (адаптировано из [6])

Описанные процессы также свойственны и для движения воды над донной поверхностью с переменной глубиной воды. При донном возвышении происходит уменьшение глубины воды, в этот момент скорость движения частиц воды, по аналогии со скоростью лучей, будет подвержена изменениям, при этом произойдет изменится форма фронта волны. Траектория движения частиц будут направляться в одну точку, сходятся, по аналогии с собирающей линзой в оптике. А при впадине на дне происходит, расхождение траекторий движения и это уже будет напоминать рассеивающуюся линзу. И учитывая, что у цунами волн есть точечный источник, траектория распространения волны, при прохождении неровностей донной поверхности и изменении при этом лучей движения частиц воды, будет изменяться (рисунок 1.21) [6].

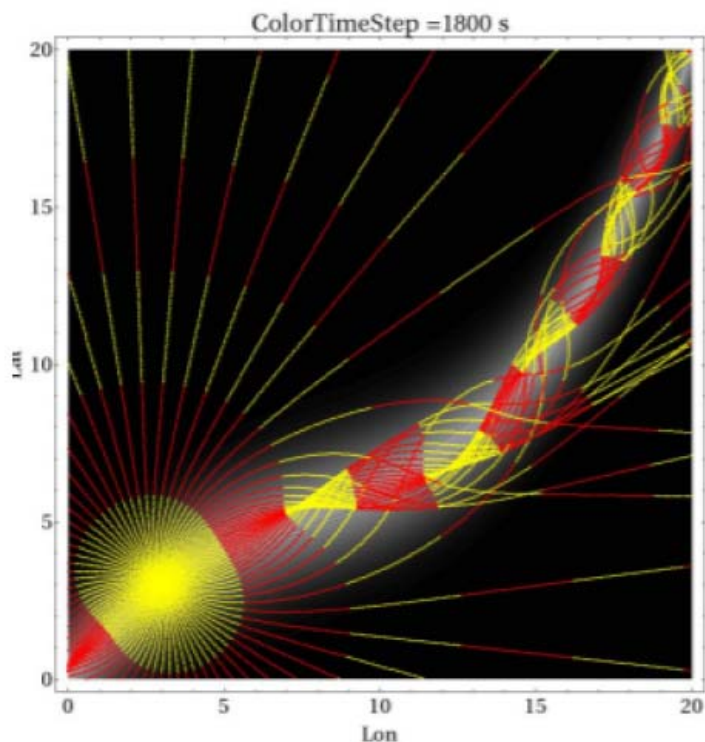


Рисунок 1.21 – Распространяющиеся лучи движения частиц воды при прохождении подводного возвышения [6]

Основной отличительной чертой цунами от ветровых волн является вовлечение в процесс движения всей толщи воды, расположенной над очагом источника (чаще всего землетрясение). При этом высота волн на мелководье может достигать от 5 до 15 м. В результате этот процесс приведет к тому, что колебания водной поверхности протяженностью более 100 км, распространяясь со скоростью более 360 км/ч, приближаясь к берегу и попадая в прибрежную зону, образуют волну высотой до 30 м. После обрушения такая волна может пройти далеко вглубь населенных береговых территорий и нанести непоправимый ущерб зданиям и сооружениям, находящимся на расстоянии более 3 км от уреза воды [36].

### 1.3 Актуальность цунами в России

В Российской Федерации существует много мест, которые подвергаются воздействию цунами волн. Территория нашей страны характеризуется большой протяженностью береговой линии. Основным местом проявления цунами активности является Дальневосточное побережье. На береговые территории Охотского, Берингова и Японского морей не раз воздействовали цунами. Сегодня,

для данных регионах, насчитывается более 100 зафиксированных случаев проявления цунами [38]. Также существует опасность проявления волн цунами и на Черном, Азовском, Каспийском морях, а также на озере Байкал.

Появляется все больше и больше факторов, которые увеличивают цунамиопасность. Например, побережье полуострова Камчатка, которое омывается Охотским морем, подвергается сильным приливам, высотой вплоть до 13 м, помимо этого в самом море находятся подводные вулканы с малоизученной активностью, что может быть серьезной опасностью. Также существует информация и об оползневых цунами, воздействие которых, происходит на внутренних водных пространствах страны [39, 40, 41, 42]. Одно из таких цунами произошло в 2018 году на реке Бурея [39, 41, 42], вертикальный заплеск данной волны был равен 90 м.

### **Наиболее известные цунами России**

- Цунами 17 октября 1737 года. Первое зарегистрированное цунами в России произошло вблизи южного побережья полуострова Камчатки. Произошедшее землетрясение, магнитудой 9,3 балла, вызвало цунами, высота которого составила 20-30 метров [39, 43, 44]. Российский путешественник и исследователь Крашенинников С.П. в своих книгах [39, 45], оценил волну в 63 метра (или 30 сажень) высотой, которая уничтожала все на своем пути, погибло много людей и были разрушены местные поселения. Волна обладало такой силой, что смыла верхние геологические породы грунта в зоне действия Второго Курильского пролива, обнажив глубоко залегающие породы. Немецкий исследователь Георг Стеллер в своих трудах [39, 46, 47, 48] описал найденные вырванные с корнями деревья, на высоте около 70м от уреза воды.

- Цунами 23 декабря 1854 года. Катастрофа произошла на восточном побережье полуострова Идзу. Цуг из 10 волн обрушился на город Симоду [39, 49]. Было разрушено много домов, а жертвами цунами стали 122 человека. Недалеко от побережья стоял флагман Российского флота, фрегат «Диана». Во время воздействия волн поток воды развернул, стоящий на якоре, парусный фрегат

около 40 раз, повреждения корабля были колоссальные, в связи с этим корабль затонул, когда его буксировали в ремонтный док. По большей части, высота волн составила от 4 до 6м, но в городе Ирум, были зафиксированы высоты волн до 16 метров [39].

- Цунами 1923 года [39, 50, 51]. В 1923 году, также вблизи полуострова Камчатка, произошло несколько разрушительных воздействий цунами на береговые территории. Первое цунами произошло 4 февраля, его причиной стало землетрясение, магнитудой 8,3-8,5 балла с эпицентром, расположенным на глубине 15 км. Землетрясение произошло по причине столкновения Тихоокеанской и Евразийской плит. Три волны, образованные в результате землетрясения, достигали высоты до 8м. В течение 10 минут произошел отлив, который обнажил дно Калыгирьского залива, вода отошла от берега на расстояние 2км, затем последовала ударная волна, огромная масса воды в считанные минуты обрушилась на берег, сметая все на своем пути. По официальным источникам, жертвами данного цунами стало 3 человека, были разрушены несколько заводов, под удар попали здания и сооружения, расположенные на Дембиевской косе. Максимальный подъем уровня воды был около 30 м, его зафиксировали в 50км к юго-западу от Усть-Камчатска. Далее, спустя несколько месяцев, произошло похожее событие, 14 апреля в результате землетрясения, магнитудой 6,8-7,3 балла, на береговые территории обрушились волны, высотой до 12м. Цунами прошло вглубь полуострова на расстояние более 8км. Жертвами апрельского цунами стали 36 человек. Первая волна вышла на берег спустя 15 минут после землетрясения, под удар попал завод Усть-Камчатска, спустя еще 15 минут пришла вторая волна, высотой более 11м, которая обрушилась на поселения Дембиевской косы и дома в Усть-Камчатске [39, 50, 51]

- Цунами 5 ноября 1952 года [52, 53, 54, 55]. Данное событие является самым масштабным проявлением цунами на территории России. Источником волн стало землетрясение, произошедшее в 3.58 утра по местному времени, магнитудой 8,5 балла. Эпицентр находился в 200км от города Петропавловск-



Камчатский и в 350км от города Северо-Курильск. Зона эпицентра землетрясения, была растянута вдоль юго-восточного побережья полуострова Камчатка, что подтверждается равномерно распределенной сейсмической активностью (от 6 до 7 баллов на протяжении расстояния 700км), при глубине залегания очага 22 км. За счет серьезной протяженности землетрясение не привело к жертвам и разрушением прибрежных городов и поселений, но породило крупное цунами. Волны, высотой до 20м, обрушились на юго-восточное побережье полуострова Камчатка и Северные Курильские острова, в результате чего, были разрушено большинство населенных пунктов на береговых территориях. Основной удар пришелся на город Северо-Курильск, расположенный на острове Парамушир, население города составляло около 6000 человек. По геодезическим данным, вертикальный заплеск волн составил от 9 до 10м. очевидцы сообщали, что видели волны, высотой более 12м. В 4 утра жители города проснулись от подземных толчков, вызванных землетрясением, которые продолжались на протяжении 30 минут. Для людей это было привычное явление, в связи с этим многие жители оставались дома, некоторые жители обратили внимание, что произошел отлив, вода отошла от суши на более чем 500м, заметив это они направились на ближайшие возвышенности. За отливом, примерно спустя 35-40 минут после землетрясения, на город обрушилась первая волна, высотой с пятиэтажный дом, началась паника, люди не сразу поняли, что происходит. Тех, кто полез на крыши, смыло в океан, успели спастись только те жители, кто добрался до ближайших сопок. После прохождения первой волны, часть жителей, которые спаслись, решили вернуться в город, чтобы спасти какие-либо уцелевшие вещи, это оказалось большой ошибкой, так как через 20 минут после первой волны на город обрушилась еще более крупная волна. Те жители, кто спустился в город, оказались в ловушке. Последняя третья волна оказалась менее крупной, ее высота составила от 5 до 8м и вынесла на берег большое количество обломков зданий, строений и различных предметов. Разрушения были страшными, город был почти полностью стерт (рисунок 1.22) [39, 52, 53, 54, 55].



Рисунок 1.22 – Последствия цунами в Северо-Курильске [56]

Город был абсолютно не готов к воздействию цунами. Главным упущением, оказалось полное отсутствия систем оповещения и предупреждения об опасности со стороны моря. По официальным материалам, в результате цунами погибло около 2000 человек. Некоторые исследователи происшествия по сей день считают, что по официальным данным были не учтены военнослужащие и приехавшие на заработки работники [39, 52, 53, 54, 55].

В город Петропавловск-Камчатский пришли волны, высотой около 15 метров, со стороны Халатырковского пляжа и прошли вглубь незаселенных территорий на расстояние 2км. Также цунами ворвалось в Авачинскую бухту, где высота волны уменьшилась до 5м. В городе было затоплена территория городского рынка, стадиона, областной больницы, педагогического университета и Комсомольской площади. Несмотря на большие затопленные территории в городе никто не пострадал. Однако на другой стороне от Петропавловска-Камчатского, в Авачинской бухте [39, 51], цунами разрушило большинство береговых поселений, а их жители были унесены в море.

События, произошедшие в Северо-Курильске и Петропавловске-Камчатском, послужили большим уроком и примером халатности в ситуациях

опасных для жизни населения. Это дало большой сдвиг в научных исследованиях цунами, произошло серьезное развитие систем регистрации данного типа волн, а также наблюдений за их природой. Не менее важным стал запуск службы по предупреждению о цунами (СПЦ) на Дальнем Востоке [57, 58, 59].

- Цунами 11 декабря 2018 года [39, 41, 60, 61, 62]. Оползневое цунами произошло в районе водохранилища Бурейской ГЭС (Хабаровский край). Почти в три часа дня по местному времени, на левом берегу реки Буря, произошел громадный оползень, включающий в себя каменные глыбы и небольшое количество глинистого грунта. Большая каменная масса пробилась лед, толщиной местами 80 см и образовала барьер на протяжении 800м. Ширина, образовавшийся запруды составила до 620м, а высота до 46м. Во время схождения, камни, размерами 1-2 метра, выбрасывало на сотни метров. Оползень произошел в связи с большой крутизной склона и залегающими трещиноватыми породами. Резкое смещение большого объема пород в глубокое водохранилище вызвало сильное цунами оползневого типа, высота заплеска которого на расстоянии почти 3км от источника составила 90м. Волна прошла вглубь реки Средний Сандар на 3,75км, а по высоте она вышла на отметку 78м от уреза воды в водохранилище. При воздействии на противоположный берег волна прошла вверх почти на расстояние 1км, дойдя до отметки 56м от уреза воды. Большая масса воды сломала стволы деревьев, оставляя за собой расколотые пни (рисунок 1.23). Большая часть вырванных деревьев была вынесена потоком обратно в водохранилище[39, 41, 60, 61, 62].



Рисунок 1.23 – Снесенные водным потоком стволы деревьев на берегах Бурейского водохранилища [63]

Учитывая перечисленные катастрофы, произошедшие на территории России, а также то, что в настоящее время идет активное развитие Дальневосточного побережья, в т.ч. полуострова Сахалин, расширение береговых территорий, городов и поселений, экономический анализ новых территорий побережий морей и океанов, строительство крупных транспортных и промышленных морских узлов, добыча полезных ископаемых в морях, можно сделать вывод, что изучение волн цунами и их воздействия на побережья Российской Федерации является на сегодняшний день актуальными и необходимыми исследованиями. Создание надежной защиты для береговых населенных территорий, расположенных в зонах цунамиопасности остается первостепенной задачей. Одним из решений данной проблемы является строительство защитных гидротехнических сооружений, способных воспринимать высокие нагрузки, такие как от волн цунами, однако пробелы в знаниях о поведении волн цунами, создают много неопределенных моментов в проектировании цунами-защитных гидротехнических сооружений.

#### 1.4 Гидротехнические сооружения, защищающие от цунами

Одним из наиболее надежных способов борьбы с волнами цунами, а также уменьшения разрушений от данного типа волн является возведение гидротехнических сооружений, которые воспринимают удар от волн и спасают акватории портов, а также береговые территории от разрушительного потенциала данного типа волн. Гидротехнические сооружения, защищающие от цунами, подразделяются на два типа:

- Оградительные сооружения (рисунок 1.24 а), основной целью которых, является защита акваторий портов от волновых воздействий;
- Берегозащитные сооружения (рисунок 1.24 б), основной целью которых, является защита береговых территорий от разрушительных волновых воздействий.



(а)



(б)

Рисунок 1.24 – Гидротехнические сооружения, защищающие от цунами волн: а – оградительное сооружение в порту Сарафово, Болгария [64], б – берегозащитное сооружение в рыбацком порту Осабе, Япония [65]

Оба типа сооружений, при проектировании, рассчитывают на нагрузки от воздействий цунами, имеют конструкцию и конфигурацию в плане, в зависимости от специфики берегового контура и рельефа в месте возведения сооружений.

Цунамизащитным сооружениям необходимо иметь большой запас устойчивости и прочности. Сооружения должны хорошо сопротивляться статическому и динамическому действиям водных потоков, в том числе и при переливах через верхнюю часть сооружения. Поэтому передняя, тыльная и

верхняя поверхность сооружения должны иметь крепкие и не подверженные размыванию покрытия.

### 1.4.1 Оградительные гидротехнические сооружения

Оградительные сооружения входят в состав портовых сооружений и выполняют функцию защиты от волновых нагрузок [66, 67]. Оградительные сооружения разделяют на:

- Внешние, когда сооружение защищает территорию порта от всего водного пространства, где расположен порт;
- Внутренние, когда сооружения располагаются внутри акватории и защищают отдельные участки от волновых колебаний, возникающих на огороженном портовом пространстве.

Существует два основных вида оградительных сооружений:

- Молы, представляют собой защитные оградительные сооружения, которые одним концом примыкают к береговой полосе, а другим расположены в море (рисунок 1.24 а). С внутренней стороны мола могут располагаться причалы.
- Волноломами называются такие сооружения, которые по конструкции схожи с молем, но, в отличии от них, никак не связаны с берегом (рисунок 1.25) [66, 67].



Рисунок 1.25 – Волнолом в гавани Портленда (Англия) [68]



По типу поперечного сечения оградительные сооружения подразделяют [66, 67]:

- Сооружения откосного типа (рисунок 1.26). Сооружения, возведение которых, происходит за счет отсыпки камня в воду, наброски бетонных массивов или монолитных фасонных блоков.
- Сооружения вертикального типа (рисунок 1.27). Данный тип сооружений представляет собой массивные стены, которые возводятся из пустотелых железобетонных блоков, заполняемых песком или бетонных массивов.
- Сооружения комбинированного типа (рисунок 1.28). Такие сооружения совмещают в себе два первых типа, образуя единую конструкцию.

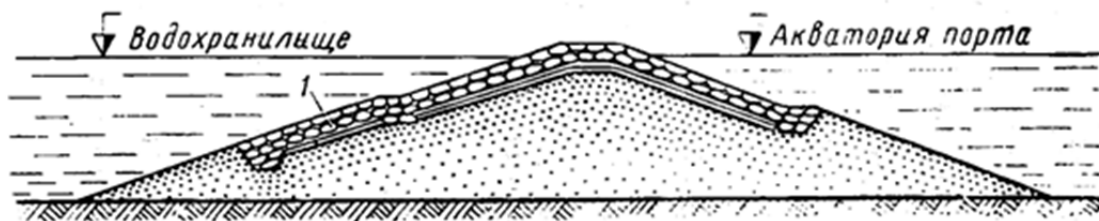


Рисунок 1.26– Оградительные сооружения откосного типа (адаптировано из [69])

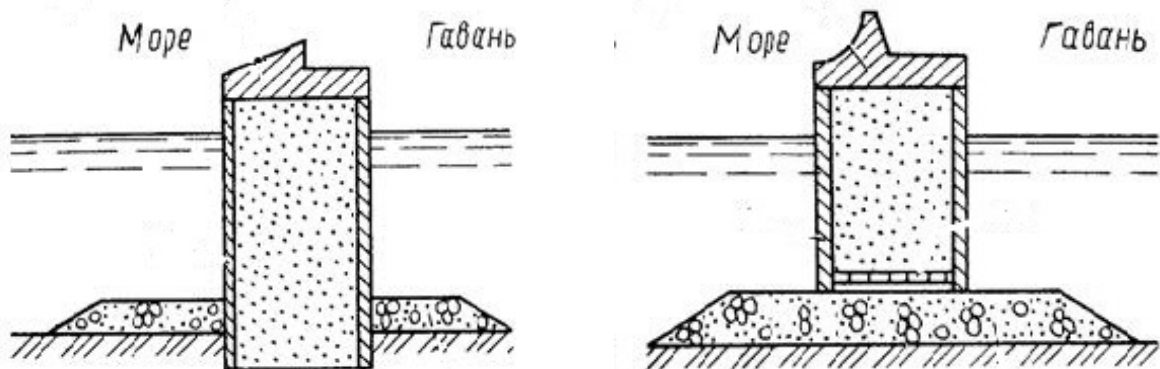


Рисунок 1.27 – Оградительные сооружения вертикального типа (адаптировано из [70])

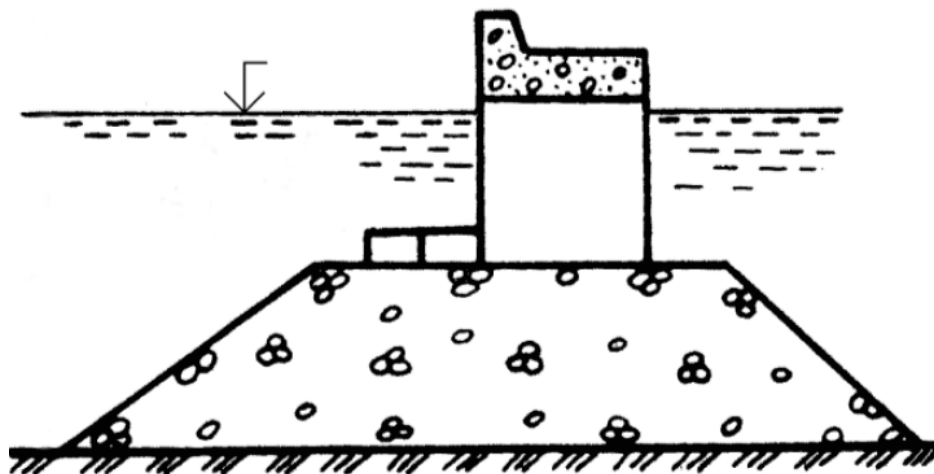


Рисунок 1.28 – Оградительные сооружения смешанного (комбинированного) типа (адаптировано из [71])

#### 1.4.2 Берегозащитные гидротехнические сооружения

Берегозащитные сооружения могут входить в состав портовых гидротехнических сооружений и служат для защиты береговых территорий от воздействий водных потоков. Такого рода сооружения представляют собой стены, валы, дамбы, которые возводят вдоль береговой полосы и возвышаются над берегом. В иностранной литературе к данным сооружениям применяется термин «sea wall», что в переводе означает «морские стены», это название подразумевает, что сооружения защищают береговые территории от всевозможных воздействий со стороны моря, к ним относятся в первую очередь волны, а также течения и ледовые нагрузки [66, 67].

При защите от волновых воздействий берегозащитные сооружения могут быть пассивными (сооружения, выполняющие пассивную роль защиты берегового откоса, это, как правило, морские стены откосного, ступенчатого типа), а также активными (сооружения, которые гасят энергию волнового потока, еще на подходе к берегу, такими сооружениями могут быть затопленные волноломы).

Одним из самых простых видов берегозащитных сооружений от цунами волн являются сооружения типа земляного вала (рисунок 1.29), расположенного на береговой территории или рядом с урезом воды на берегу. Со стороны моря



откос вала устраивают каменным мощением, а со стороны берега, как правило, сажают деревья. Сверху могут прокладывать железнодорожные или автомобильные трассы, в таких случаях берегозащитное сооружение может являться и автомобильной насыпью. Надежность и устойчивость сооружения при воздействии цунами, обуславливается габаритами поперечного сечения (шириной основания, углом заложения откосов и высотой) [72].

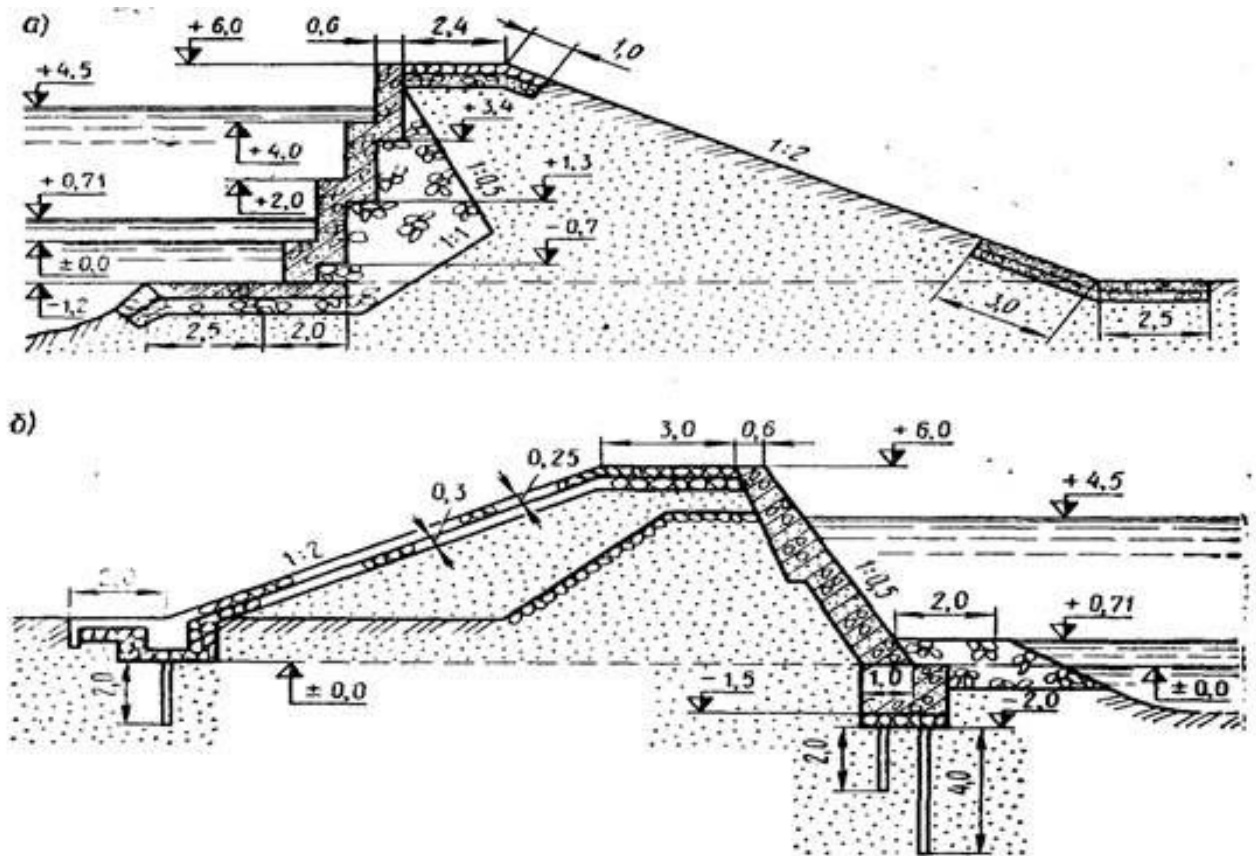


Рисунок 1.29 – Примеры берегозащитных стен-валов: а – откос ступенчатого типа, б – откос наклонный гладкий [72]

Для наибольшей защиты, в опасных регионах, могут возводить две, конструктивно не объединенных между собой преграды, каждая из которых представляет собой берегозащитное сооружение. В таких случаях сооружения могут располагаться в разных уровнях, и иметь отличные габариты друг от друга. Так, например, на рисунке 1.30, первое сооружение представляет из себя подпорную стенку из каменной кладки с бетонной верхней частью, которая расположена на отметке береговой территории, второе сооружение расположено дальше от берега и представляет из себя бетонную стену, возвышающуюся над

поверхностью территории. Вторая стена является препятствием для водного потока, надвигающегося со стороны моря, а также, при неблагоприятной ситуации и прохождении волны, может являться обратной преградой для задержки обломков, несущихся со стороны берега при обратном потоке волны.

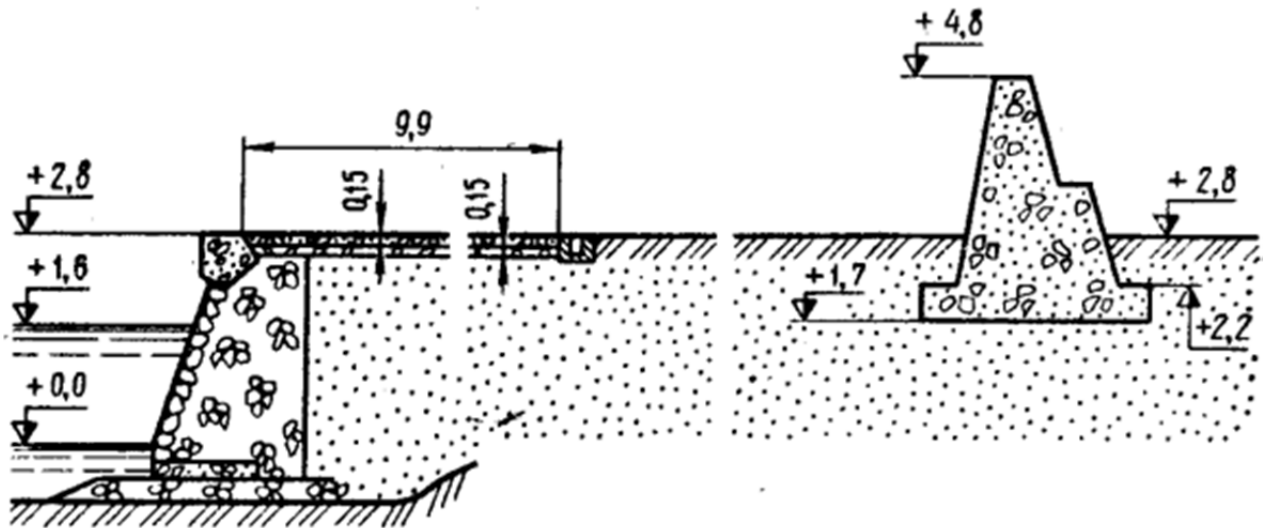


Рисунок 1.30 – Пример двух разделенных берегозащитных сооружений [72]

В некоторых случаях, берегозащитную стену от цунами выполняют из массива-гиганта с крупной бетонной армированной надстройкой, данная конструкция возводится на каменную постель (рисунок 1.31). В случае слабых грунтов, в месте возведения стенки, происходит его выемка и замена на песчаную подушку. Со стороны моря, на массив-гигант устанавливают каменную призму, защищенную набросанными фасонными бетонными блоками, за которыми еще дальше в сторону моря выполнен откос с защитой дна от размыва. При волновом воздействии на фасонные бетонные блоки происходит гашение энергии волны, результатом чего становится уменьшение высоты накатываемых на берег волн [72].

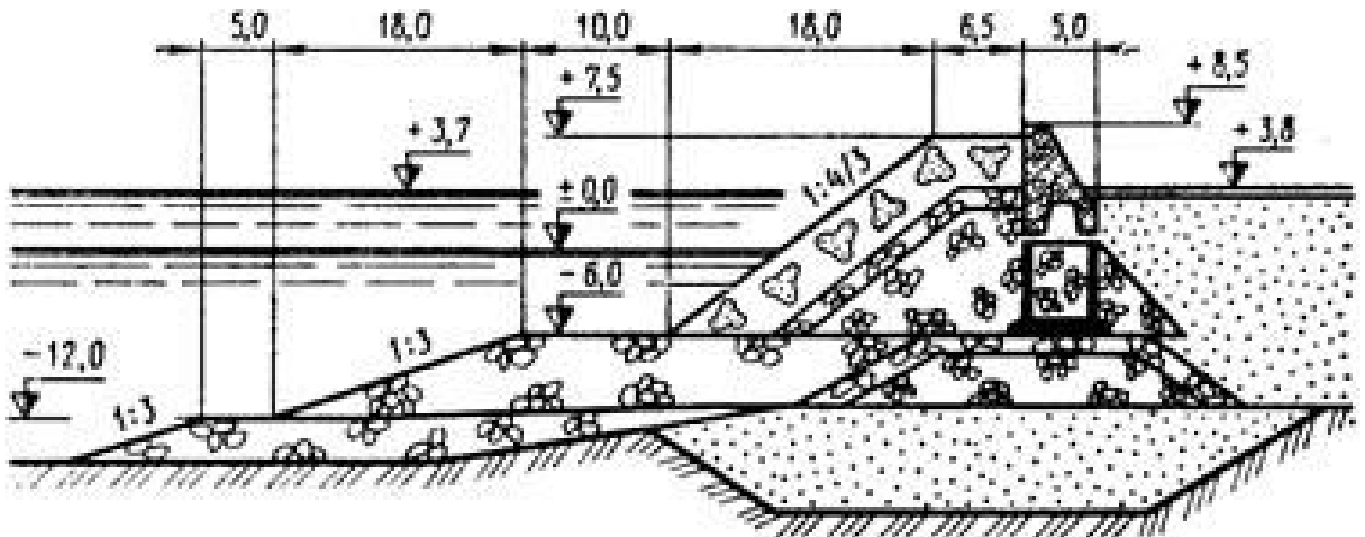


Рисунок 1.31 – Береговая стена из массива-гиганта [72]

На сегодняшний день возведение берегозащитных сооружений вертикального типа не является экономически выгодным решением, в связи с тем, что для обеспечения полной защиты берега от затопления требуются, как правило крупные стены, высота которых должна быть не меньше удвоенной высоты расчетной волны (для предотвращения также воздействий стоячих волн) [66, 72].

#### 1.4.3 Нормативы для проектирования гидротехнических сооружений, находящихся в цунамиопасных районах

На данный момент, в Российской Федерации, проектирование гидротехнических сооружений, находящихся в районах воздействия цунами волн, производится в соответствии со Сводом правил №292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» [73]. В данном нормативном документе обобщены все имеющиеся, на данный момент, знания о цунами, приведены требования к исходно-разрешительной документации, необходимой для проектирования сооружений, описаны методики расчета гидротехнических сооружений на воздействия обрушенных и необрушенных цунами. Также представлены рекомендации по планировке береговых территорий, подверженных цунамиопасности, что помогает уменьшить до минимума риск разрушений и затоплений при устройстве городских зданий и сооружений в районах воздействия цунами.

Важной частью свода правил является «Приложение А – Карты и таблица цунамиопасности побережий Российской Федерации», в котором предоставлены статистические данные многолетних исследований, благодаря которым, возможно более точно определять параметры задаваемой расчетной волны, одним из которых является параметр вертикального заплеска  $h_{100}$  (повторяемость 1 раз в 100 лет) [73].

Помимо этого, в своде правил представлен обязательный к применению, пункт 5.2.5., в котором сказано, что для гидротехнических сооружений, находящихся в районах воздействий цунами, значение вертикального заплеска  $h_{100}$  которых превышает 4 метра, необходимо выполнять физическое моделирование для уточнения нагрузок на сооружение. Также по данной теме приведено приложение Е «Требования к физическому моделированию цунами», в котором дано очень мало информации, разъясняющей порядок проведения, способы и методики экспериментов по воздействию цунами волн [73]. Во многих случаях проектирования и эксплуатации портовых гидротехнических сооружений, физическое моделирование необходимо, однако недостаток информации в нормативных документах осложняют проведение данных опытов, что негативно может сказаться на проверке сооружений, находящихся или строящихся в цунамиопасных районах.

В связи с вышесказанным, научные исследования в области физического моделирования, на сегодняшний день являются актуальными. Во многих странах, в том числе и в России, разрабатываются различные методы моделирования цунами волн в лабораторных условиях, для создания более реалистичного подобия воздействий данных волн на гидротехнические сооружения.

### **1.5 Физическое моделирование волновых воздействий**

Для определения и уточнения нагрузок от воздействия волн на портовые гидротехнические сооружения, используется метод физического моделирования. Физическое моделирование применяется для проверки надежности и устойчивости проектируемых сооружений, подверженных волновым нагрузкам,

для изучения взаимодействия волн с сооружениями, а также позволяет исследовать поведение волн и волновые поля. Как правило, применяется 3D-моделирование в волновых бассейнах (рисунок 1.32) и 2D-моделирование в волновых лотках (рисунок 1.33). Опыты проводятся в уменьшенных масштабах в диапазоне примерно 1:20 – 1:100 [74].



Рисунок 1.32 – 3D-моделирование в волновых бассейнах [74]



Рисунок 1.33 – 2D-моделирование в волновых лотках [74, 75]

Физическое моделирование при волновых воздействиях на гидротехнические сооружения ограничено габаритами моделируемых конструкций и габаритами бассейна для проведения опытов. В отдельных случаях применяется моделирование с изменением горизонтального или вертикального масштаба [74, 76, 77].

Физическое моделирование также проводится и для определения волнового режима на акватории порта при различных направлениях и характеристиках

исходных волн с учетом таких явлений как дифракция, рефракция и отражения волн. Основопологающим фактором при оценивании волнового режима на акватории является дифракция волн портовыми гидротехническими сооружениями [78, 79].

Во время лабораторных испытаний, измеряемыми величинами волнового воздействия являются:

- Средний уровень воды в бассейне или гидравлическом лотке;
- Параметры волны (высота, период, заплеск и т.д.);
- Давление в различных точках, на которые воздействует волна или поток;
- Скорость потока и течения;
- Профили волн;
- Профили берегового откоса, который подвержен воздействию волн или размыву.

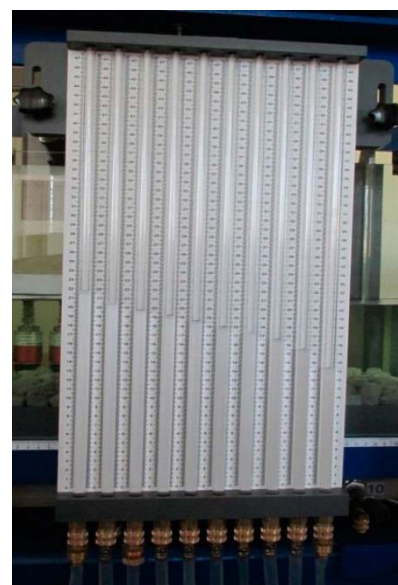
Фиксация данных величин происходит с помощью измерительного оборудования (рисунок 1.34), которым оснащены лаборатории, это в первую очередь датчики-волнографы, датчики давления и пьезометрические щиты.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 1.34 – Измерительное оборудование для физического моделирования: а – волнограф, б – датчики давления (адаптировано из [80]), в – пьезометрический щит давления (адаптировано из [80])



В процессе физического моделирования необходимо выполнение критериев динамического подобия. При моделировании волновых процессов основными действующими силами являются силы тяжести и инерции. В связи с этим моделирование должно производиться по параметру Фруда ( $Fr$ ) [74, 76].

Для натуре и модели следует соблюдать равенство (1.8) [74, 76]:

$$Fr_H = Fr_M = \frac{v_H^2}{gl_H} = \frac{v_M^2}{gl_M} \quad (1.8)$$

На сегодняшний день, в России, существуют несколько действующих крупных лабораторий, которые занимаются физическим моделированием различных волновых воздействий на гидротехнические сооружения. Одной из таких является АО "Морские берега" – ЦНИИС (рисунок 1.35) [81], расположенная в городе Сочи. Лаборатория оснащена бассейнами, гидравлическими лотками, а также всем необходимыми измерительными системами для фиксации смоделированных волн.

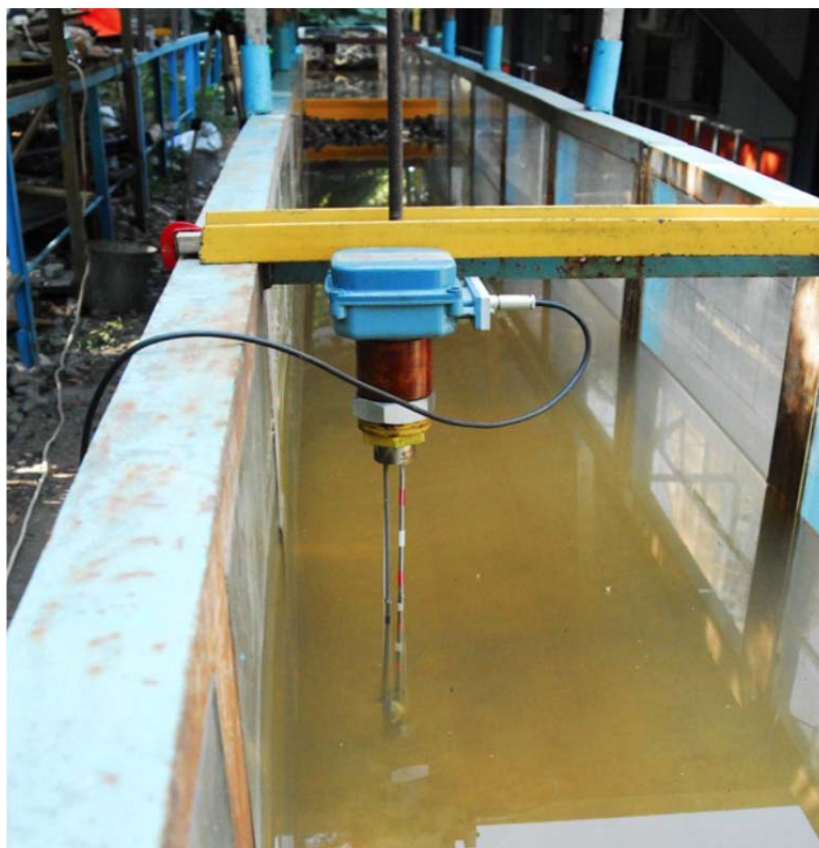


Рисунок 1.35 – Гидравлический лоток с измерительным оборудованием в лаборатории АО "Морские берега" [75]



Также, для изучения волновых воздействий и потоков есть несколько лабораторий в НИУ МГСУ (рисунок 1.36) [74, 76, 77], включающих в себя глубоководный гидравлический лоток и бассейн, мелководный гидравлический лоток, крупный мелководный бассейн, большой и малый грунтовые лотки и климатическую камеру, щитовые волнопродукторы и измерительное оборудование.



Рисунок 1.36 – Лаборатория по физическому моделированию в НИУ МГСУ [82]

В физическом моделировании волновых воздействий до сих пор остается ряд вопросов, касающийся поведения тех или иных волн в различных условиях, одним из таких случаев являются волны цунами. Помимо нормативного подтверждения необходимости моделирования данных волн при испытании проектируемых сооружений, существуют научный интерес к поведению цунами при их трансформации, обрушениях и воздействиях на береговые территории.

## 1.6 Выводы по главе 1

В Главе 1 рассмотрены основные направления и вопросы, которым посвящена диссертация, а также обоснована актуальность исследований. Проведен анализ теоретической информации, на которой основываются проводимые научные исследования.

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

Первая составляющая — это волны цунами - природное явление, представляющее большую опасность для береговых территорий. Исследования теоретической информации 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 различных типов оградительных и берегозащитных сооружений, которые способны защищать уязвимые акватории. На основе проанализированной информации, можно утверждать, что исследования, расчеты, проектирование и строительство гидротехнических сооружений в опасных районах на сегодняшний день являются важными направлениями борьбы с такой угрозой, как 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 волн, а также подтверждено, что на данный момент нормативная документация недостаточно дает понимания по самому моделированию в лабораторных условиях волновых воздействий таких волн, как цунами. 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 волнами цунами, цунамизащитными гидротехническими портовыми сооружениями и физическим моделированием цунами волн являются актуальными, из чего можно сделать основной вывод, что диссертационное исследование в будущем может быть важным в научном и практическом отношении для соответствующих областей науки, проектирования и строительства.

## ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ

### 2.1 Введение

Вторая глава диссертационного исследования состоит из двух основных частей.

Первая часть рассматривает физическое моделирование такого явления как цунами. Представлена теоретическая составляющая данного направления исследования, разобраны основные вопросы моделирования волн в лабораторных условиях, дан обзор наиболее перспективных и актуальных методов моделирования цунами волн, а также рассмотрена и проанализирована специфика моделирования различных видов цунами.

Вторая часть посвящена созданию экспериментальной лабораторной установки на базе гидравлической лаборатории НИУ МГСУ – Универсального волнового генератора волн типа цунами различных видов. Описан весь путь по реализации данной установки, а также дано подробное описание методик моделирования и соответствующего оборудования для опытов.

### 2.2 Физическое моделирование цунами

При исследованиях такого природного катаклизма как цунами, физическое моделирование предоставляет дополнительные сведения о поведении данных волн, изменениях их формы, а также взаимодействии их с гидротехническими сооружениями.

Подтверждение важности и необходимости проведения физического моделирования присутствует и в нормативной документации. Как было ранее отмечено, согласно пункту 5.2.5, лабораторные исследования необходимы для уточнения нагрузок на сооружения, расположенных в цунамиопасных районах, где параметр вертикального заплеска  $h_{100}$  превышает 4 метра [73].

Также, во многих случаях, лабораторные исследования по моделированию цунами помогают с дополнительной информацией к численному моделированию. Чаще всего данная информация о воздействии волн на гидротехнические

сооружения со сложной конструкцией и их разрушениях при цунами воздействии. Данную информацию получают при использовании метода численного моделирования «Computational fluid dynamics» (CFD) [83, 84], но как показывает практика, данные полученные численным моделированием в области цунами волн, также необходимо проверять физическим моделированием.

При физическом моделировании рекомендуется использовать знания, полученные в опыте физического и численного моделирования ветровых волн [83, 84]. Несмотря на разную природу образования, поведения и воздействий волн, присутствуют схожие моменты в самих процессах моделирования. В первую очередь схожесть касается фиксации данных, подбора измерительного оборудования, а также анализе и обработке полученных результатов экспериментов.

В основном физическое моделирование цунами помогает в получении решения для нескольких задач:

- Определение прочности и устойчивости сооружений при воздействии на них волновых нагрузок;
- Верификация численного моделирования цунами при заданных параметрах.

Точность моделирования зависит от правильного выбранного масштаба моделирования, а также от правильных предоставленных исходных данных для моделируемой волны.

### **2.2.1 Обзор существующих методов физического моделирования цунами**

Как было ранее сказано, во многих странах, в т.ч. в России, разрабатываются методы моделирования цунами в лаборатории для создания более реалистичной модели волн.

В XX в. большую работу по лабораторным исследованиям оползневых волн цунами проделал R.L. Wiegel [85, 86]. В своем исследовании он проводил испытания по моделированию волновых воздействий за счет погружения твердых

тел различных по массе, размеру и форме в воду, имитируя оползневые цунами. В ходе исследований было обнаружено, что за первым гребнем образуется впадина, амплитуда которой, как и условиях реальных цунами, от одного до трех раз больше первого гребня, а образовавшийся второй гребень волны имеет такую же амплитуду, как и глубина впадины.

Наиболее известными, на сегодняшний день, методами создания волн типа цунами в лаборатории являются:

- метод «скользящего блока». Он заключается в том, что одиночная волна образуется при спуске в воду твердотельного блока, соскальзывающего по наклонной поверхности (рисунок 2.1). Размеры, а также материал, из которого изготовлен блок, подбираются индивидуально для каждого испытания. Одними из самых известных экспериментов с использованием этого метода были опыты в гидродинамической лаборатории Имперского колледжа Лондона [87, 88, 89], цель которых заключалась в анализе расхождения результатов исследований, проведенных с использованием различных наклонных поверхностей и блоков. Также значительного успеха достигла научная группа в Университете штата Орегон [90, 91, 92]. Особенностью этих опытов было то, что вместо твердого блока для генерации волны использовался грунт - речная галька (рисунок 2.2). Результатом стал анализ скорости и формы распространения волн после контакта грунта с водой.

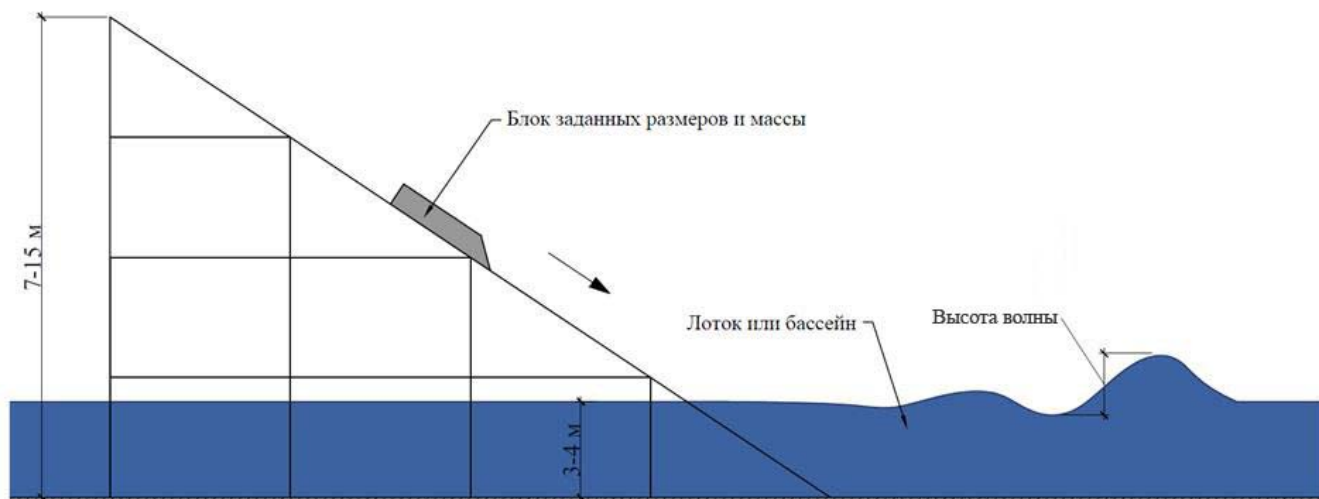


Рисунок 2.1 – Схема моделирования волн цунами методом «скользящего блока» [83]

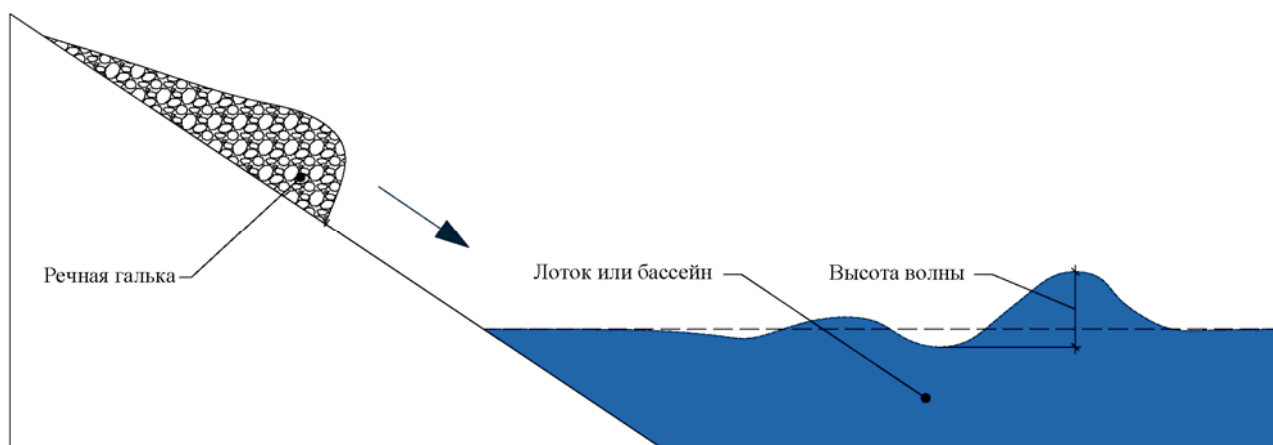


Рисунок 2.2 – Схема моделирования волн цунами с помощью речной гальки (адаптировано из [83])

- метод генерации волн с помощью лопастей и щитов. Волна воспроизводится за счет возвратно-поступательного движения лопаток (лопастей), закрепленных на дне лотка (рисунок 2.3). По такому же принципу моделируют волны с помощью щита (рисунок 2.4), занимающего все сечение лотка. Основные характеристики волн (высота и период) ограничиваются только глубиной лотка и движением щита. Испытания по этому методу проводились в Делфтском университете (Нидерланды). Для эксперимента был разработан лоток размерами  $300,0 \times 5,0 \times 9,5$  м, позволяющий моделировать волны высотой до 4,5 м [84, 93, 94]. Однако в процессе исследований было установлено, что характеристики волн, созданных в результате экспериментов, имеют расхождения с наблюдаемыми в природе волнами.



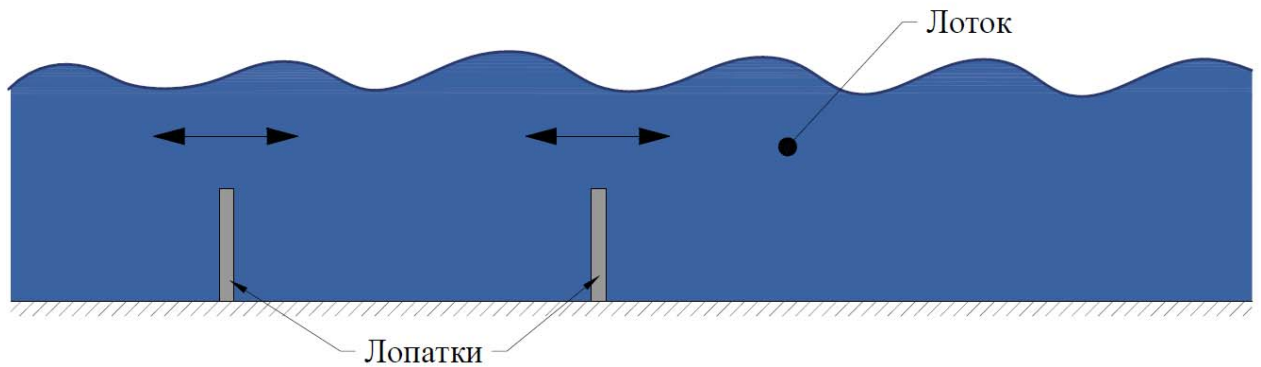


Рисунок 2.3 – Генерация волн цунами с помощью лопаток [83]

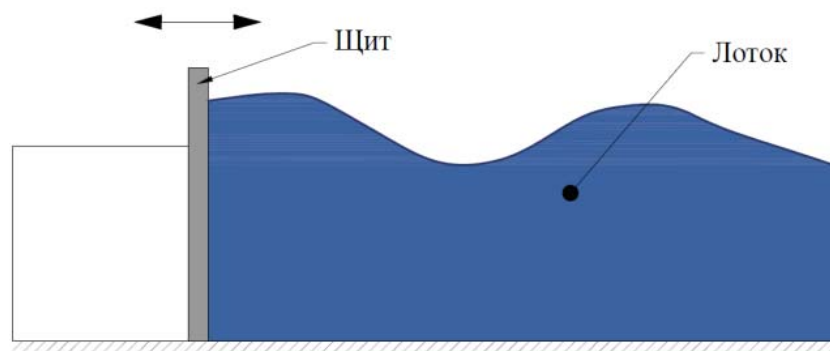


Рисунок 2.4 – Генерация волн цунами с помощью щита [83]

- моделирование цунами смещениями дна. В 1973 г. в Калифорнийском технологическом институте была разработана экспериментальная установка [95, 96], позволяющая моделировать деформацию (смещение) части дна, тем самым имитируя условия донного землетрясения, при котором образуются цунами. Успешно были смоделированы одиночные волны (солитоны), а также цуг волн (рисунок 2.5).

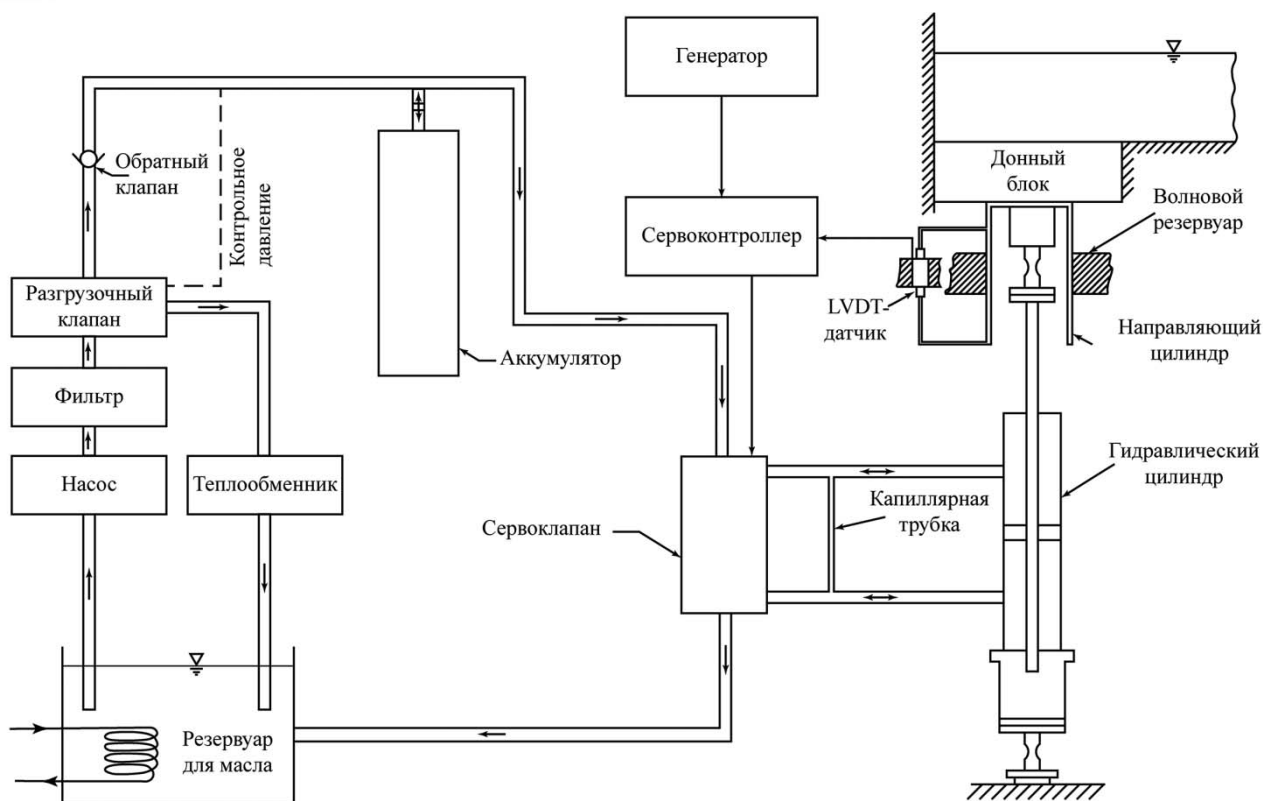


Рисунок 2.5 – Схема установки по моделированию цунами смещением дна  
(адаптировано из [95])

- метод пневмогенератора. Он был разработан в лаборатории Wallingford в 2008 г. Генерация волны происходит благодаря работе пневматического насоса [97, 98, 99, 100, 101, 102, 103]. Метод пневматического генератора цунами показал хорошие результаты. Смоделированные волны по своим характеристикам повторяют наблюдаемые в природе и описанные цунами. С помощью этого метода британские ученые смогли воспроизвести в лаборатории знаменитые волны цунами (рисунок 2.6), произошедшие в 2004 г. в Индийском океане и в 2011 г. у берегов Японии [104, 105].

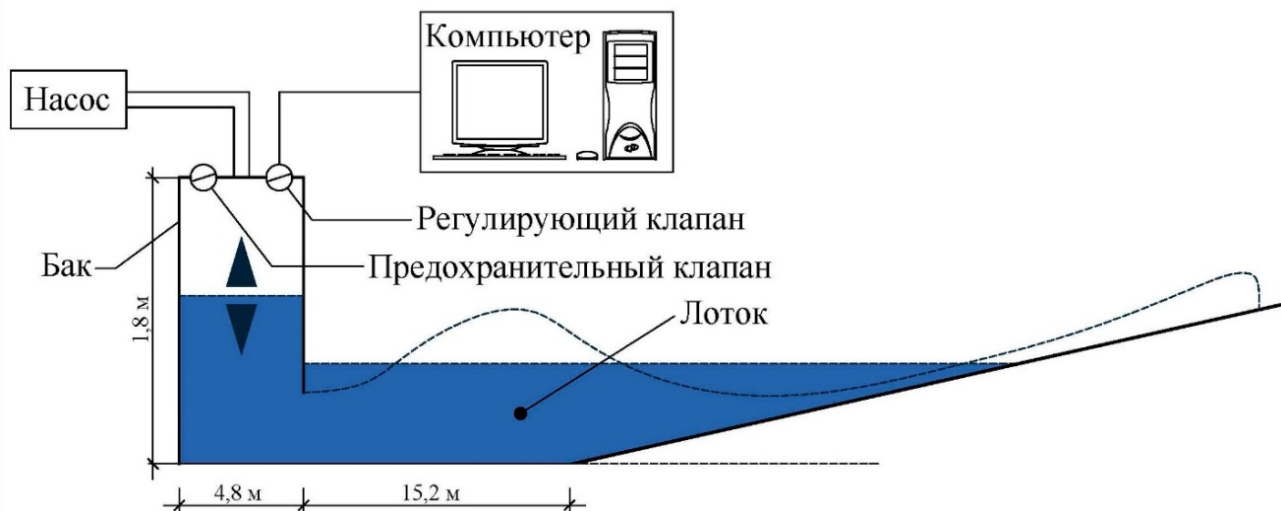


Рисунок 2.6 – Схема установки пневматического генератора цунами  
(адаптировано из [98])

В отечественной науке больших успехов достигла лаборатория «23 ГМПИ – филиала ОАО «31 ГПИСС» [106, 107, 108, 109, 110]. Создав экспериментальную установку (рисунок 2.7), моделирующую волны с помощью пневматического генератора, российские ученые провели серьезную работу в области физического и численного моделирования цунами [109, 110]. Были проведены исследования по размыву дна у гравитационных платформ от фронтального воздействия регулярных волн и течений [106, 108], а также на основании анализа результатов экспериментальных исследований, была разработана методика расчета экстремальных нагрузок, действующих на сооружение в течении прямого воздействия волны типа цунами [107]. Однако после ряда достижений, лаборатория, где находилась экспериментальная установка, была разрушена, в связи с закрытием организации «23 ГМПИ – филиала ОАО «31 ГПИСС». Данное событие было серьезной потерей для всех тех, кто занимается исследованием цунами в России.



Рисунок 2.7– Экспериментальная установка в лаборатории «23 ГМПИ – филиала ОАО «31 ГПИСС» [111]

### **2.2.2 Специфика моделирования цунами. Одиночные волны и N-волны**

Цунами, вызванное оползнем или падением метеорита, представляет из себя одиночную волну – солитон [18, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118]. Одиночная волна, при формировании начинается сразу с повышения уровня воды (рисунок 2.8).

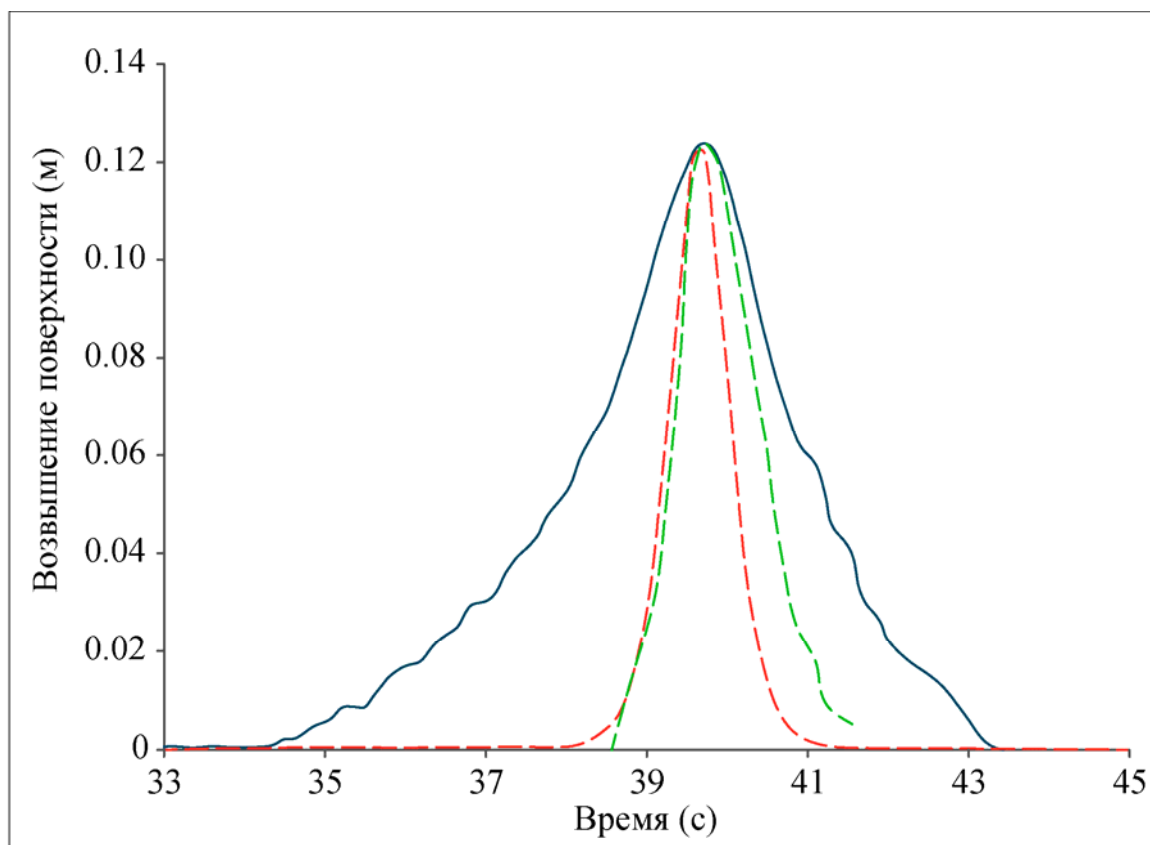


Рисунок 2.8 – Формы одиночной волны, полученные теоретическими и экспериментальными методами, синий график – экспериментально полученный профиль солитона, красный график – теоретически полученный профиль солитона в работе Boussinesq [117], зеленый график – экспериментально полученный профиль солитона в работе Synolakis [114, 115] (адаптировано из [118])

Английский ученый Madsen P.A. [116] в своих работах представил описание одиночных волн и дал основные уравнения, которыми задаются данные волны. Madsen писал, что непериодическая одиночная волна характеризуется наличием единственного гребня, амплитуда которого уменьшается до нуля при значении  $\chi \rightarrow \pm\infty$  [116]:

$$\eta(x, 0) = H \operatorname{sech}^2(K_S \chi), \quad (2.1)$$

где:

$\eta$  – уровень волновой поверхности;

$$K_S = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{3H}{4h}};$$

$$\chi = x - c_S t;$$

$H$  – высота волны;

$c_s = \sqrt{g(h + H)}$  – скорость одиночной волны.

Первыми, кто вывел данное решение, были Boussinesq [117] и Rayleigh [119], их целью было объяснение и подтверждение наблюдений, которые провел ученый Russell в 1844 году [120].

В физическом моделировании, идентичную по форме волну, возможно воспроизвести в лабораторных условиях с помощью методов скользящего блока или волнового щита [83, 87, 88, 89].

Однако, как ранее было сказано, большую часть цунами составляют волны сейсмического происхождения, которые отличаются по форме от оползневых цунами.

Сейсмические цунами представляют собой, так называемые, N-волны, упомянутые впервые в работах американских ученых Tadepalli, S. и Synolakis, C. E. в 1994 году [114, 115]. Специфичность N-волн,двигающихся к берегу, заключается в первоначальном понижении уровня воды – отливе (рисунки 2.9, 2.10) перед гребнем волны. При отливе, значительный объем воды может двигаться в противоположную сторону от берега, тем самым создавая желоб (впадину), перед ударной волной.



Рисунок 2.9 – Отлив перед ударной волной цунами [20]



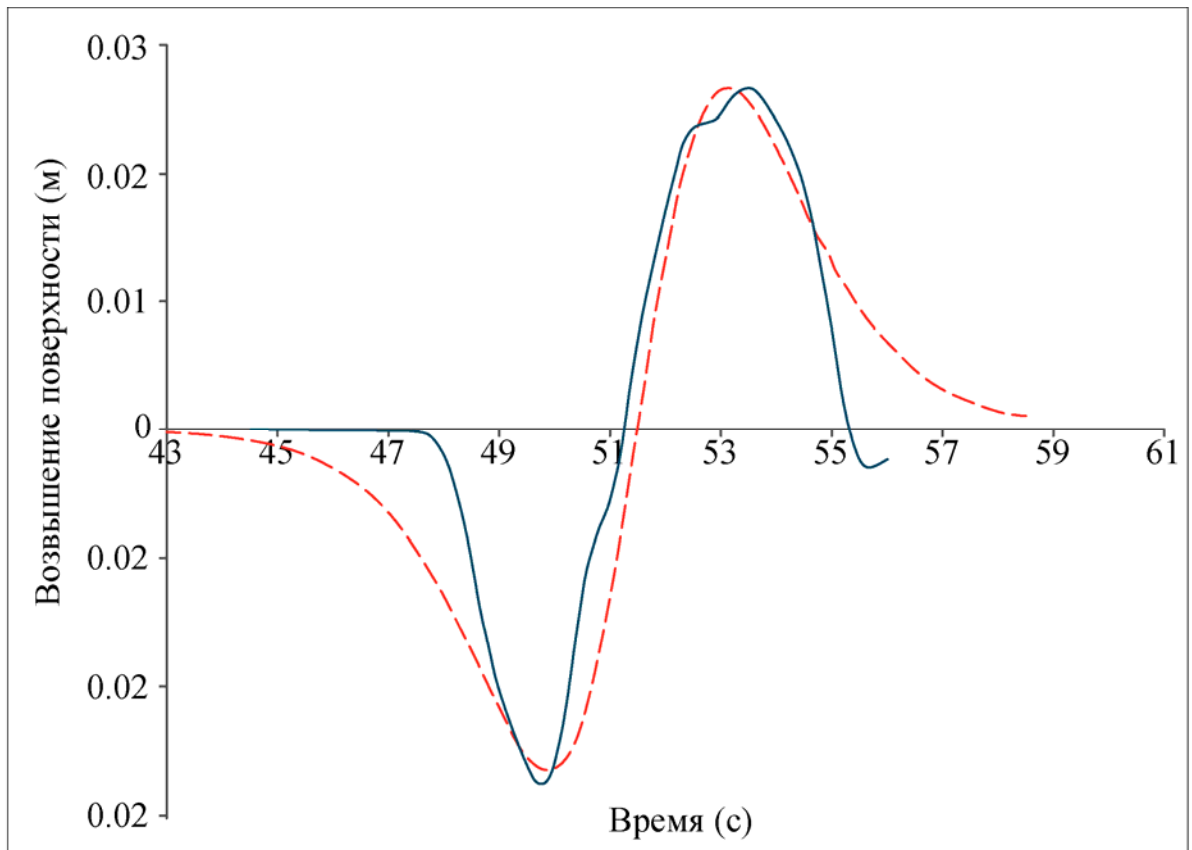


Рисунок 2.10 – Формы N-волны, полученные теоретическим и экспериментальным методами, синий график – экспериментально полученный профиль N-волны, красный график – теоретически полученный профиль N-волны (адаптировано из [118])

Tadepalli, S. и Synolakis, C. E. предложили в своих работах N-волны в двух вариантах: LDN (leading-depression – впереди понижение уровня) и LEN (leading-elevation – впереди повышение уровня) [114]. Было установлено, что от зоны сейсмического очага LDN волны распространяются к берегу, а LEN волны – в открытое море (рисунок 2.11).

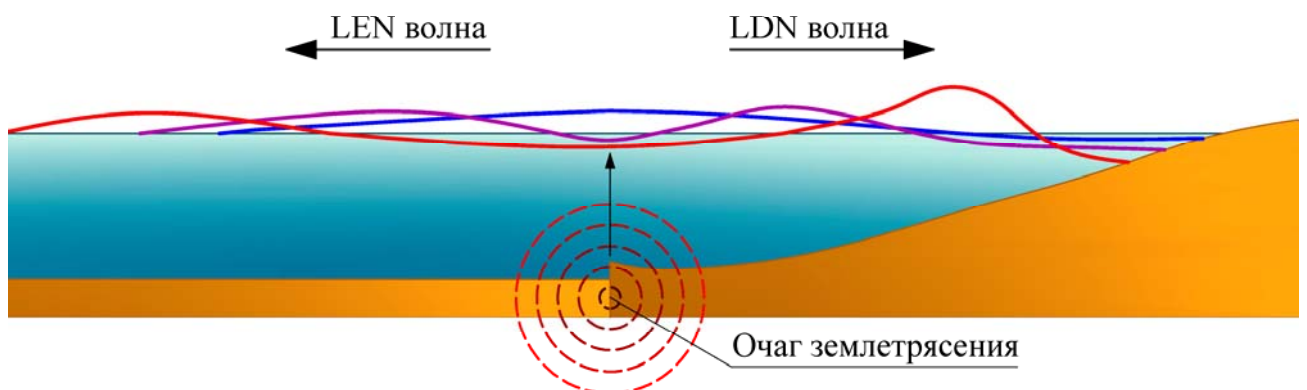


Рисунок 2.11– Схема распространения LDN и LEN волн, синяя линия – 1 этап, фиолетовая линия – 2 этап, красная линия – 3 этап



LDN волны Taderalli, S. и Synolakis, C. E. подразделили на 2 вида: обобщенная N-волна (the generalized N-wave) и равнобедренная N-волна (the isosceles N-wave) (рисунок 2.12).

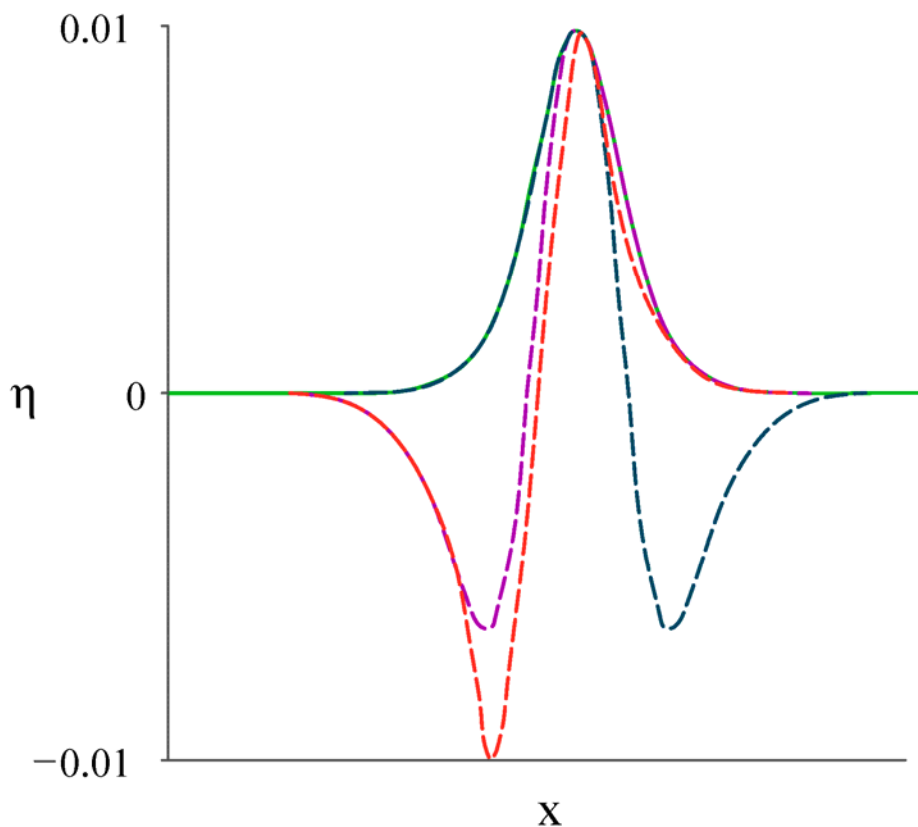


Рисунок 2.12– Сопоставление волновых профилей, зеленый график – профиль одиночной волны, фиолетовый график – обобщенная LDN-волна, красный график – равнобедренная LDN-волна, синий график – LEN-волна (адаптировано из [114])

Обобщенная N-волна представляет собой волну с первоначальным понижением воды (впадиной) меньшей по величине, чем максимальное возвышение, следующее за ней, т.е. амплитуда впадины меньше амплитуды гребня волны.

Профиль поверхности обобщенной N-волны задается следующим выражением (2.1) [114, 116]:

$$\eta(x, 0) = (\alpha H)(x - x_2) \operatorname{sech}^2[(k(x - x_1))], \text{ при } t = 0 \quad (2.1)$$

где:

$\eta$  – уровень волновой поверхности;

$H$  – высота волны;

$\alpha$  – масштабный коэффициент;

$x_1, x_2$  – положение, соответственно, впадины и гребня.

$k$  – волновой параметр.

По Taderalli S. и Synolakis C. E. [114, 115] волновой параметр определяется по формуле (2.2):

$$k = \sqrt{\frac{3}{4}H} \quad (2.2)$$

В формуле 2.2. присутствует ошибка, размерность параметра по данной формуле – метры (м), при подстановке результата в формулу 2.1, в данном случае будет невозможно вычислить гиперболический секанс, так как значение  $k(x - x_1)$ , должно получиться безразмерным, следовательно, волновой параметр должен иметь размерность – 1/метры (1/м). Данная неточность была учтена и поправлена в работах Madsen P.A. и Chandler I.D.[104, 116], которые представили определение волнового параметра следующим выражением (2.3):

$$k = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{3H}{4h}} \quad (2.3)$$

Равнобедренная N-волна представляет собой волну с первоначальным понижением уровня воды равным, по величине, следующей за ним, возвышенности, т.е. амплитуда впадины равна амплитуде гребня волны.

Профиль поверхности равнобедренной N-волны задается следующим выражением (2.4) [114, 115, 116]:

$$\eta(x, 0) = \left(\frac{3\sqrt{3}}{2}H\right) \operatorname{sech}^2[(k(x - x_1))] \tanh[(k(x - x_1))], \text{ при } t = 0 \quad (2.4)$$

Аналогично формулам 2.2 и 2.3, волновой параметр  $k$  изначально по Taderalli, S. и Synolakis, C. E. [114, 115], был записан с ошибкой, следующим выражением (2.5):

$$k = \frac{3}{2} \sqrt{\left[\sqrt{\frac{3}{4}H}\right]} \quad (2.5)$$

Позже в работах Madsen P.A. и Chandler I.D. [104, 116], был представлен следующим выражением:

$$k = \frac{3}{2h} \sqrt{\left[ \frac{H}{h} \sqrt{\frac{3}{4}} \right]} \quad (2.6)$$

В своих исследованиях Tadepalli, S. и Synolakis, C. E [114, 115] показали, что максимальный накат у N-волн типа LDN с первоначальной впадиной, больше чем для эквивалентных N-волн LEN типа с первоначальным возвышением и солитонообразных волн.

Долгое время физическое моделирование цунами сводилось к воспроизведению в лабораториях одиночных волн, что не являлось ошибкой, но давало возможность воспроизводить только цунами, вызванные попаданием того или иного тела в воду. Madson P.A. [116] в своих работах доказал, что солитон не подходит для воспроизведения цунами, вызванных землетрясениями.

В связи с различиями и спецификой одиночных волн и N-волн, для большей достоверности, физическое моделирование оползневых и сейсмических цунами следует производить разными способами.

### 2.2.3 Основные вопросы физического моделирования

При проведении экспериментальных работ особое внимание следует уделять вопросам моделируемости.

Основные аспекты теории подобия хорошо изложены в работах Леви И.И. и Пиляева С.И. [121, 122, 123, 124], в данном параграфе будет кратко описаны важные моменты, рассматриваемые в данных работах, которые являются основой для физического моделирования воздействий цунами.

Явления называются подобными, когда характеристики одного из них могут быть получены из другого путем пересчета характеристик этого явления с помощью постоянных отношений, аналогично переходу от одной системы единиц измерения к другой.

При физическом моделировании волновых процессов на гидравлических моделях особое внимание следует уделять вопросам динамического подобия, с целью получения достоверных и надежных результатов. Основным признаком динамического подобия является параллельность и пропорциональность сил, действующих в сходных точках, а также постоянство отношения между массами двух любых сходственных точек, т.е. постоянство отношений плотностей сред по всему полю течения.

Подобие гидродинамических явлений в общем случае требует одновременного соблюдения четырех критериев подобия, что в полной мере учитывается и при моделировании волновых процессов, как на плоских, так и на пространственных моделях. [121, 122, 123, 124].

Для обеспечения подобия явлений необходимо удовлетворить два основных требования.

Механическое подобие, включает:

- 1) Геометрическое
- 2) Кинематическое - когда скорости частиц во всех сходственных точках пропорциональны и одинаково направлены по отношению к границам потока, т.е. траектории частиц должны быть геометрически подобны.
- 3) Динамическое - условия однозначности, которыми однозначно определяются граничные и начальные условия при решении дифференциальных уравнений (т.е. обеспечивается единственность решения).

Остановимся более подробно на динамическом подобии в гидродинамике.

В самом общем случае, когда рассматривается неустановившееся движение вязкой жидкости, оно может быть описано системой уравнений Навье-Стокса и уравнением неразрывности. В теории подобия на основе анализа этих уравнений показано, что подобие гидродинамических явлений в общем случае требует одновременного соблюдения четырех критериев подобия, что в полной мере учитывается и при моделировании волновых процессов, как на плоских, так и на пространственных моделях. [121, 122, 123, 124].

I. Критерий гомохронности ( $H_0$ ) или критерий Струхаля ( $Sh$ ) определяется выражением (2.7):

$$H_0 = Sh = \frac{vt}{l}, \quad (2.7)$$

характеризует инерционные силы, возникающие при неустановившемся движении жидкости, в частности и при волновом движении. В условиях стационарных (установившихся) течений критерий  $Sh=0$ .

II. Критерий Фруда определяется выражением (2.8):

$$Fr = \frac{v^2}{gl}, \quad (2.8)$$

характеризует действие сил тяжести (объемных или массовых) или, точнее, характеризует отношение силы тяжести к силе инерции.

III. Критерий Рейнольдса определяется выражением (2.9):

$$Re = \frac{vl}{\nu}, \quad (2.9)$$

характеризует действие сил вязкости (внутреннего трения), или отношение силы вязкости к силе инерции.

IV. Критерий Эйлера определяется выражением (2.10):

$$Eu = \frac{P}{\rho v^2}, \quad (2.10)$$

характеризует силы давления в жидкости, или отношение силы давления к силе инерции.

При действии потенциальных объемных сил критерий Эйлера имеет выражение (2.11):

$$Eu = \frac{\Delta V}{v^2} = \frac{g\Delta z}{v^2}, \quad (2.11)$$

где  $\Delta z$  - перепад уровней.

Вышеуказанные критерии характеризуют явления, где действием сил капиллярного (поверхностного) натяжения можно пренебречь, т.е. критерий Вебера равен нулю:

$$We = \frac{\sigma}{\rho v} = 0, \quad (2.12)$$

Таким образом, четыре критерия подобия определяются семью величинами:

$l$  - характерный размер (глубина воды, размер обтекаемой преграды.);

$v$  - характерная скорость (потока, орбитальная частиц в волне);

$t$  - время (период волны);

$g$  - ускорение силы тяжести;

$\rho$  - плотность;

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости;

$P$  - давление жидкости.

В работах [121, 122] показано, что критерий  $We$  следует учитывать при очень маленьких параметрах волн ( $h < 10\text{мм}$ ,  $\lambda < 170\text{мм}$ ).

Чтобы обеспечить подобие, важно одновременно соблюсти условия четырех равенств, т.е. между 4 критериями должна существовать определенная зависимость. Для неустановившегося режима движения справедливо равенство (2.8):

$$fn(Sh, Fr, Re, Eu) = 0, \quad (2.13)$$

Критерии подобия, составленные из заданных величин, называются определяющими, а критерии, содержащие неизвестные (искомые) величины, являются следствием и поэтому должны рассматриваться как функции определяющих критериев. С этой точки зрения, так как при моделировании волновых процессов обычно задаются величинами  $l$ ,  $v$ ,  $t$ ,  $\rho$ ,  $\nu$ , давление  $P$  оказывается величиной неизвестной (искомой). Поэтому критерий  $Eu$  оказывается неизвестным, не определяющим и должен находиться как функция других параметров, т.е. равенство чисел Эйлера выполняется, если соблюдено подобие по другим критериям, т.е.  $Eu = \varphi_H(Sh, Fr, Re)$ .

При моделировании волн цунами основными действующими силами являются силы тяжести и инерции. В связи с этим моделирование должно производиться по критерию Фруда ( $Fr$ ). Критерий Струхала ( $Sh$ ) в этом случае будет выполняться автоматически.

Также в случае с волнами цунами, нормативно подтверждено, что физическое моделирование выполняется по критерию Фруда [73].

Масштаб моделирования выбирается таким, чтобы значения критерия Рейнольдса ( $Re$ ) находились в так называемой зоне автомодельности этого критерия. Для выполнения данного условия, при исследованиях масштаб моделирования принимался 1:100.

На основании многочисленных исследований установлено, что нижняя граница автомодельной зоны для пространственных моделей определяется числом  $Re_{\text{доп}} \geq 2000$ , при котором обеспечивается турбулентный режим волнения, согласно выражению (2.14). При масштабах моделирования 1:200 и более приведенное условие  $Re_{\text{доп}} \geq 2000$ , как правило, соблюдается автоматически [121, 122, 123, 124].

$$Re_{\text{доп}} = \frac{V_x d}{\nu} \geq 2000 \quad (2.14)$$

В нашем случае, даже при минимальных параметрах волн и размеров модели число  $Re$  находится в пределах 20000 и более ( $Re = 1 \text{ м/с} * 0,02 \text{ м} / 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , где  $1 \text{ м/с}$  – характерная скорость движения волны (потока),  $0,02 \text{ м}$  – минимальная высота полученных волн,  $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – коэффициент кинематическая вязкости воды), следовательно область исследований можно рассматривать автомодельной [125].

При приведении экспериментальных данных, полученных при моделировании, к натурным условиям можно без существенных погрешностей попользовать следующие зависимости (2.15, 2.16, 2.17, 2.18), определяемые моделированием по критерию  $Fr$ :

$$t_H = t_M \sqrt{\lambda_M}, \quad (2.15)$$

$$V_x^H = V_x^M \sqrt{\lambda_M}, \quad (2.16)$$

$$\omega_x^H = \omega_x^M \sqrt{\lambda_M}, \quad (2.17)$$

$$Q_x^H = Q_x^M \lambda_M^3, \quad (2.18)$$

где  $V_x$  – горизонтальная составляющая орбитальной скорости частиц в волне;

$t$  – временной параметр.

$\omega_x$  – ускорение частиц;



$Q_x$  – равнодействующая сила волнового давления;

$\lambda_M$  – линейный масштаб моделирования;

Индексы "м" и "н" относятся соответственно к модели и натуре:

$$\lambda_M = \frac{L_H}{L_M}, \quad (2.19)$$

где  $L_H$  – линейный размер природы;

$L_M$  – линейный размер модели.

Изменяя линейный масштаб моделирования ( $\lambda_M$ ), при неизменяемых параметрах опыта, модельные данные могут быть использованы для различных натуральных условий [121, 122, 123, 124].

## **2.3 Экспериментальная установка на базе гидравлической лаборатории НИУ МГСУ**

### **2.3.1 Идея создания универсального генератора волн типа цунами различной формы**

Как было сказано ранее, волны цунами имеют различную форму в зависимости от источника возникновения. Цунами, вызванное оползнем или падением метеорита, представляет собой одиночную волну (солитон), сейсмические цунами представляют собой, так называемые, N-волны. Специфичность N-волн,двигающихся к берегу, заключается в первоначальном понижении уровня воды (отливе) перед гребнем волны. Моделирование N-волн и солитонов производится по различным методикам, в связи с этим существующие лабораторные волнопродукторы могут воспроизводить только один тип волн цунами.

В связи с актуальностью темы и упрощению самого процесса физического моделирования в настоящей работе было принято решение разработать и сконструировать лабораторный волнопродуктор, который позволит моделировать различные по происхождению и форме волны цунами. При создании установки, основной целью являлось сконструировать относительно простое комплексное универсальное устройство, способное, в зависимости от исходных данных,

воспроизвести ту или иную волну типа цунами без дополнительного оборудования и дополнительных затрат, используя лишь разработанный генератор.

На кафедре Гидравлики и Гидротехнического строительства стала возможна разработка экспериментальной установки, благодаря гидравлическому лотку с переменным уклоном (рисунок 2.13) [126], расположенному в лаборатории Гидравлики в НИУ МГСУ.



Рисунок 2.13 – Гидравлический лоток для проведения опытов в НИУ МГСУ [83]

### 2.3.2 Описание установки

Разработанная установка включает в себя, одновременно, два способа воспроизведения волны, позволяющих создавать модели волн от сейсмического воздействия и модели волн, вызванные оползнями и падением иных объектов в воду. Также благодаря изменению глубины воды в лотке присутствует возможность воспроизводить кноидальные волны (подобие волн цунами в открытом океане) и трансформированные цунами при выходе на мелководье - волновой бор [125].

Волновой генератор представляет собой следующую конструкцию: с одной стороны гидравлического лотка расположен универсальный сборный волнопродуктор – резервуар, соединенный с вакуумным насосом, к которому также шарнирно прикреплена наклонная поверхность. На другой стороне лотка установлена наклонная поверхность, имитирующая береговой откос (рисунок 2.14).

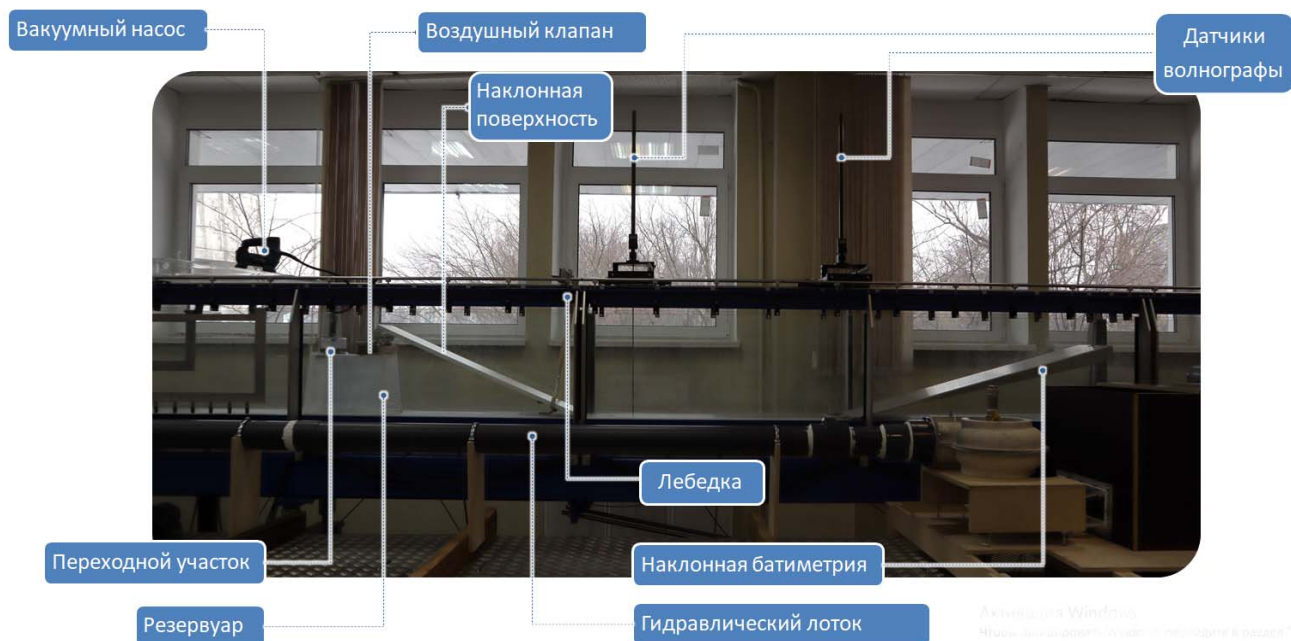


Рисунок 2.14 – Универсальный генератор волн типа цунами различной формы

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, способной перемещать крепление к лотку так, чтобы было возможно 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 воспроизведения волны, а при моделировании оползневого цунами, наоборот, выключается вакуумный насос и опускается наклонная поверхность.

Наклонная поверхность шарнирно прикреплена к резервуару и лотку с помощью металлических направляющих, крепление к лотку возможно передвигать по направлению лотка в разные стороны, а при креплении наклонной поверхности к резервуару есть возможность ее двигать, тем самым увеличивая или уменьшая угол наклона поверхности, по которой в воду сползает твердое тело и при этом также меняя длину пути, который проходит скользящий блок до соприкосновения с водой.

Благодаря легкой конструкции генератор цунами позволяет просто и часто повторять эксперименты, а также значительно сокращает стоимость проводимых опытов.

Для фиксации характеристик волн, а также формы волны, в гидравлическом лотке установлены два датчика волнографа (рядом с резервуаром и вблизи наклонной поверхности, имитирующей берег). Датчики возможно передвигать и устанавливать в любом сечении лотка.

### **2.3.3 Принятые методика моделирования и ее преимущества**

Экспериментальная установка моделирует волновые воздействия по двум различным методикам.

#### **Методика моделирования волн цунами от сейсмического воздействия:**

В начале эксперимента включается вакуумный насос, который начинает откачивать 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 ударной волной 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. Как только открывается воздушный клапан, на выпускном отверстии резервуара формируется волна. Методика моделирования цунами от сейсмического воздействия представлена на рисунке 2.15.

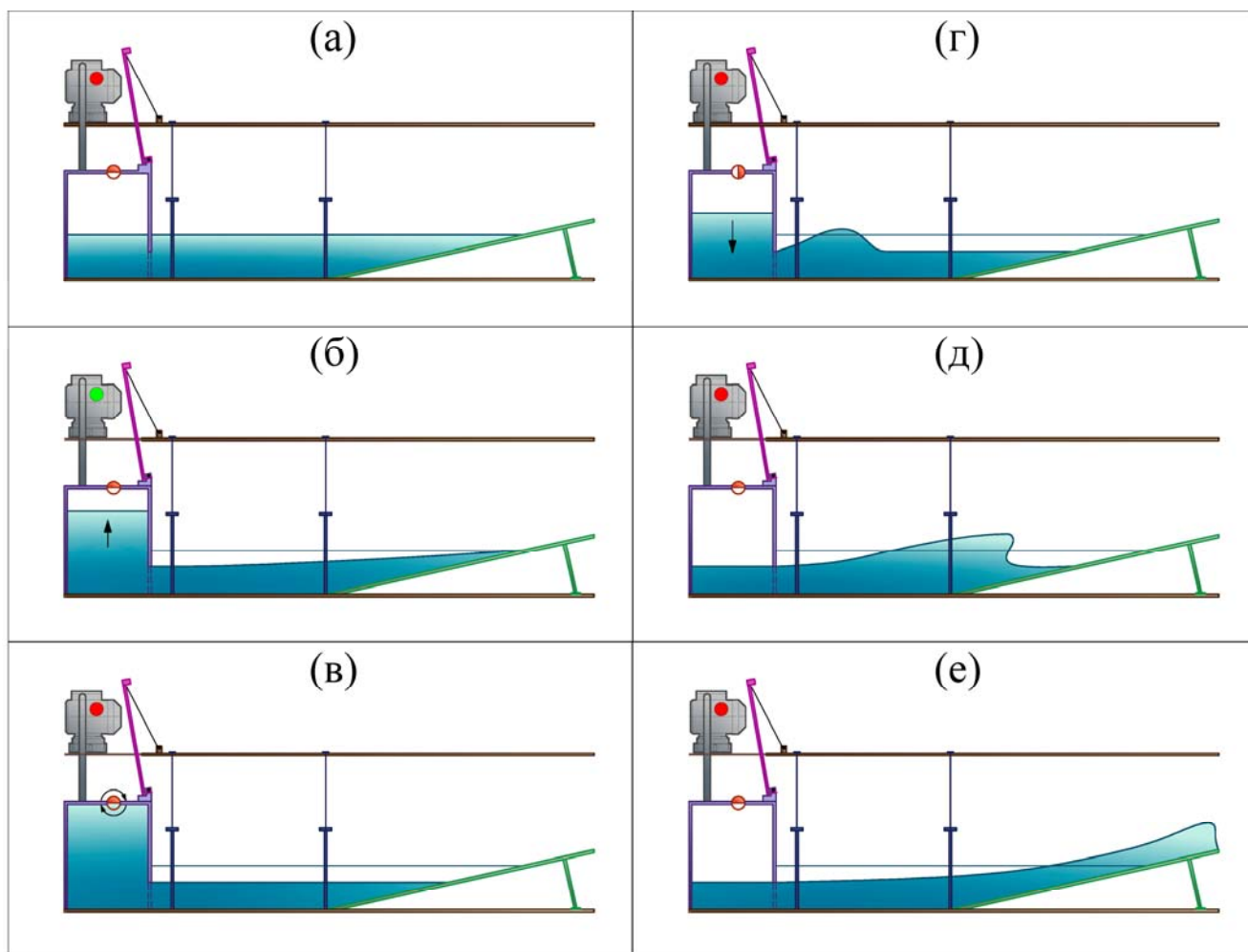


Рисунок 2.15 – Последовательность моделирования волн цунами от сейсмического воздействия: а – стартовая конфигурация установки, б – этап наполнения воды в резервуар, в – этап открытия клапана, г – этап формирования волны, д – распространение волны в лотке, е – выход волны на берег

### Процесс моделирования волн типа цунами оползневого типа

В начале эксперимента происходит опускание наклонной поверхности и ее фиксация при определенном угле наклона. Угол наклона возможно менять в зависимости от расположения крепления на наклонной поверхности. После фиксации, по наклонной поверхности запускают блок, который сползает в воду. При соприкосновении блока с водой образуется волна. Методика моделирования волн цунами от оползня и падения других объектов в воду представлена на рисунке 2.16.

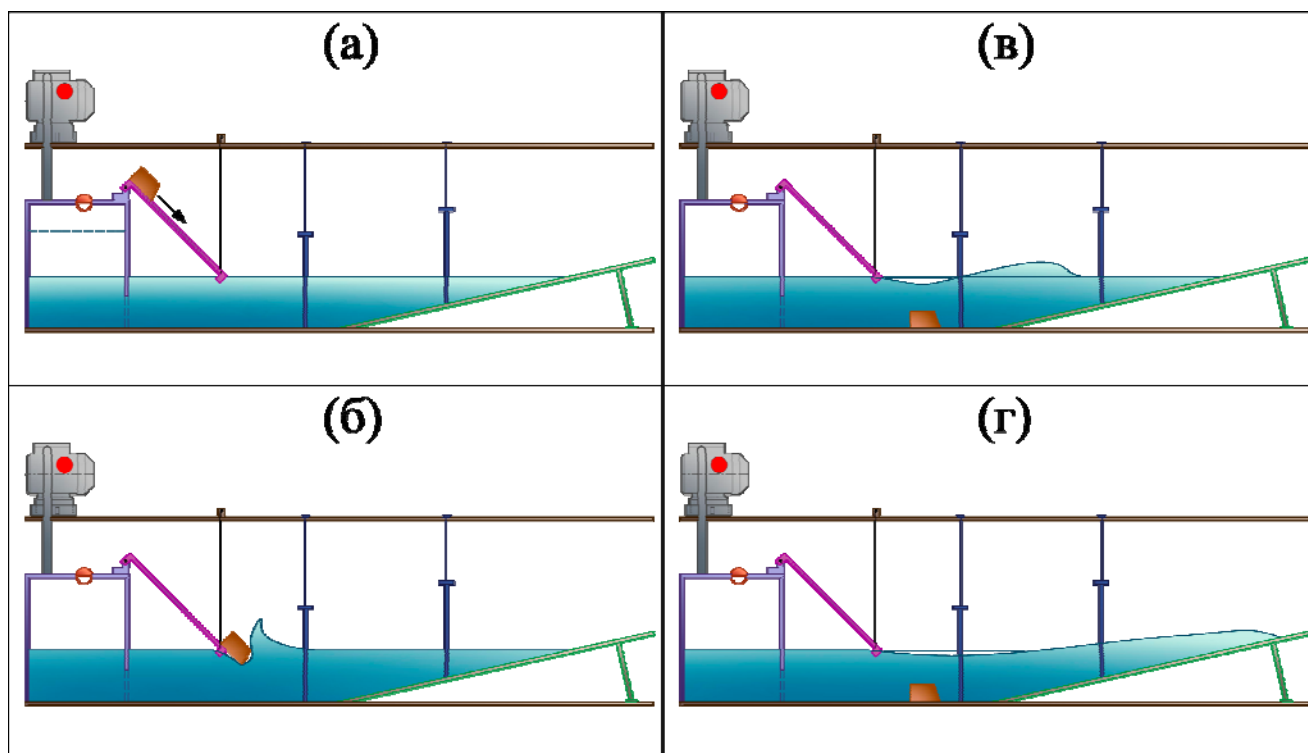


Рисунок 2.16 – Последовательность моделирования волн цунами от оползня и падения других объектов в воду: а – стартовая конфигурация установки, начало спуска блока в воду, б – этап формирования волны, в – распространение волны в лотке, г – выход волны на берег

### 2.3.4 Разработка проекта экспериментальной установки

Первым этапом была разработка той части экспериментальной установки, которая позволяет моделировать цунами, вызванные сейсмической активностью.

Изначально планировалось собрать металлический каркас из нержавеющей стали, на который будет крепиться вакуумный насос (рисунок 2.17). Также к металлическому каркасу должен был быть прикреплен резервуар, образуя единую жесткую конструкцию.

Однако позже было принято решение оптимизировать экспериментальную установку. Громоздкий металлический каркас, усложнял доступ к гидравлическому лотку, что усложняло бы исследования в гидравлическом лотке по другим направлениям [127, 128]. Также следовало упростить сборку/разборку установки, в связи с этим были проведены дополнительные работы по проектированию волногенератора и подбору оборудования для эксперимента.



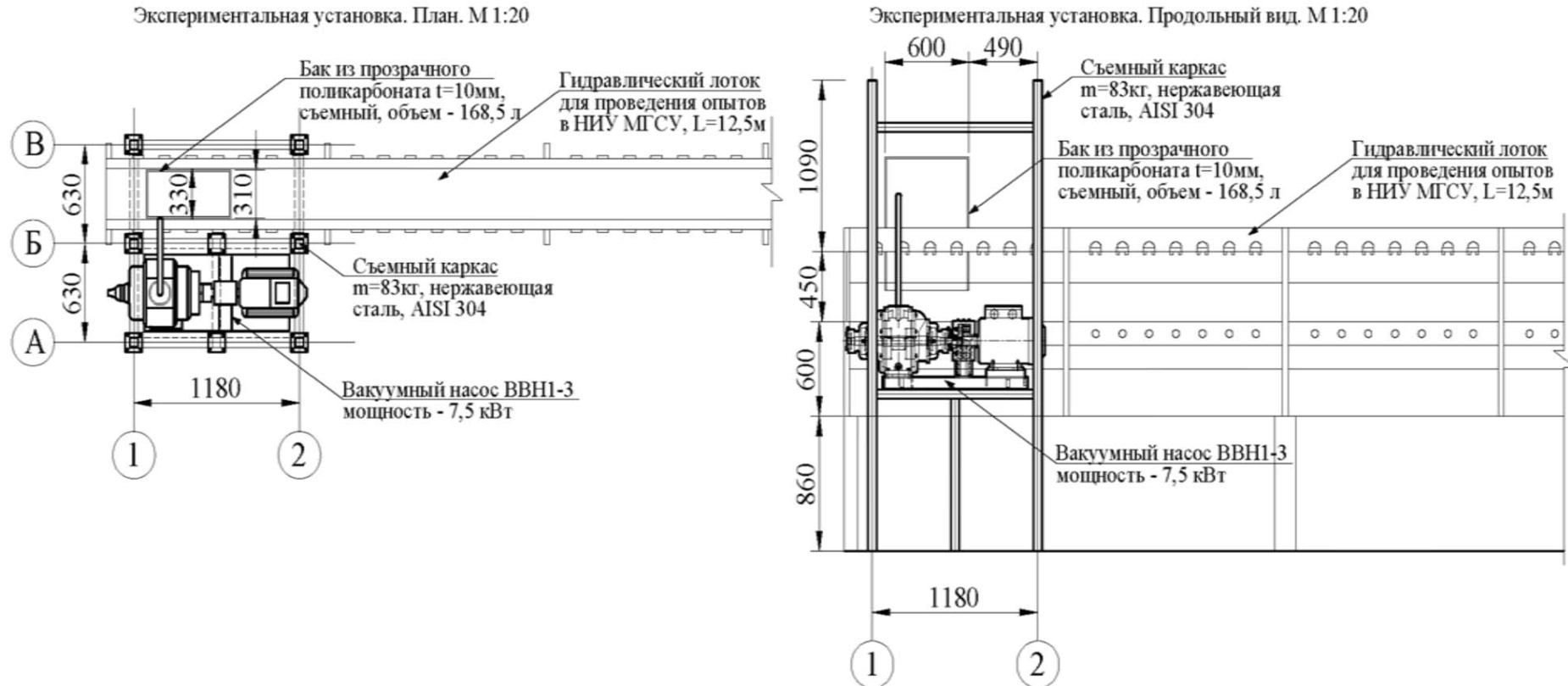


Рисунок 2.17 – Фрагменты первоначальных чертежей экспериментальной установки по моделированию волн цунами в гидравлическом лотке НИУ МГСУ



Вместо металлического каркаса, насос ставится на гидравлический лоток, а резервуар, вместо подвешенного состояния, теперь прижимается ко дну гидравлического лотка, благодаря специальным креплениям. Также был заменен насос на более компактный. В итоге, в конце 2020 года были разработаны проектные материалы на первую часть экспериментальной установки, позволяющей моделировать сейсмические цунами (рисунок 2.18). После успешных согласований чертежей, к началу 2021 года, была собрана эта часть экспериментальной установки. Первые серии опытов, а также и первые модернизации установки проводились именно с частью волногенератора, позволяющего моделировать сейсмоцунами [125, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138].

Позже, параллельно с уже проводимыми экспериментальными исследованиями, велись работы по конструированию второй части установки для моделирования оползневых цунами. Были подготовлены чертежи с прикрепленной, к существующему волногенератору, второй части в виде наклонной поверхности для моделирования волн, методом скользящего блока. Крепление наклонной поверхности осуществлялось и к волногенератору, а также непосредственно и к самому гидравлическому лотку (рисунок 2.19). В 2022 году была собрана оставшаяся часть универсального волногенератора, и установка смогла моделировать как цунами сейсмического происхождения, так и оползневые цунами.

Универсальный генератор волн типа цунами различной формы в НИУ МГСУ оказался мобильной комплексной установкой, позволяющей моделировать и измерять различные виды волн цунами. Благодаря простоте конструкции установка является сборно-разборной и не создает дополнительных нагрузок на гидравлический лоток, а также позволяет без лишних вложений проводить волновые исследования.

Экспериментальная установка в лаборатории гидравлики НИУ МГСУ М120  
Продольный вид. М 120

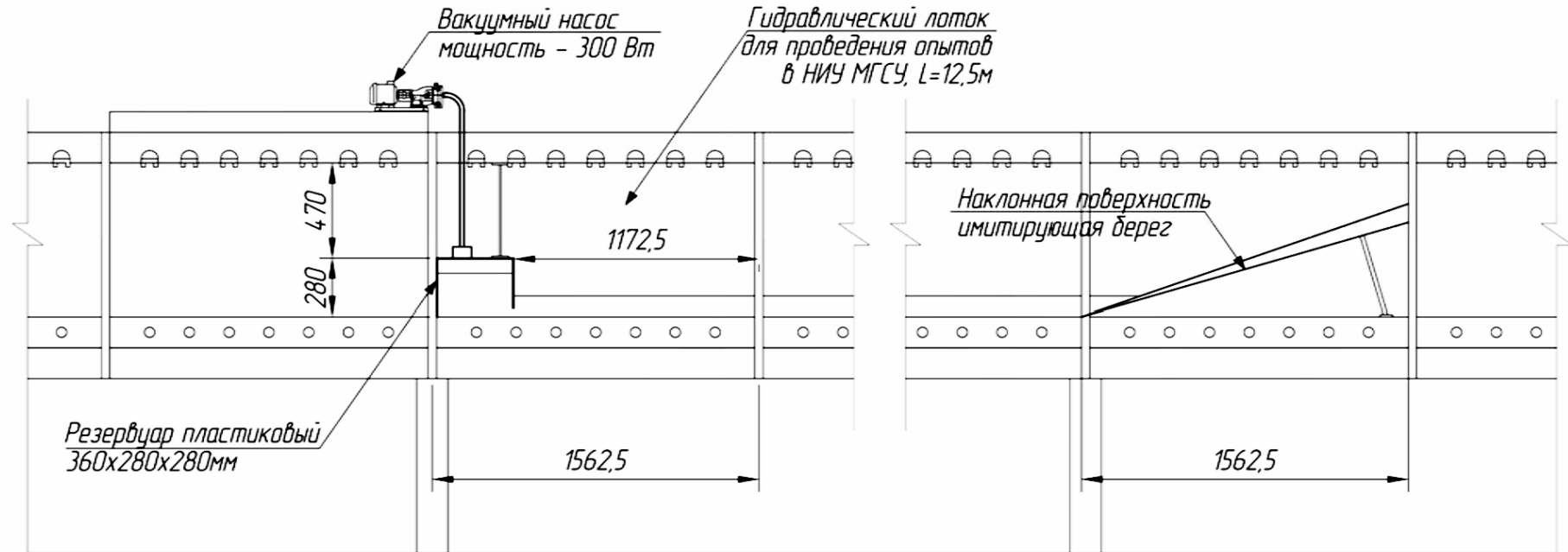


Рисунок 2.18 – Продольный вид на части экспериментальной установки для моделирования волн цунами от сейсмического происхождения в НИУ МГСУ

Универсальный генератор волн типа цунами различной формы  
Продольный вид М 1:20

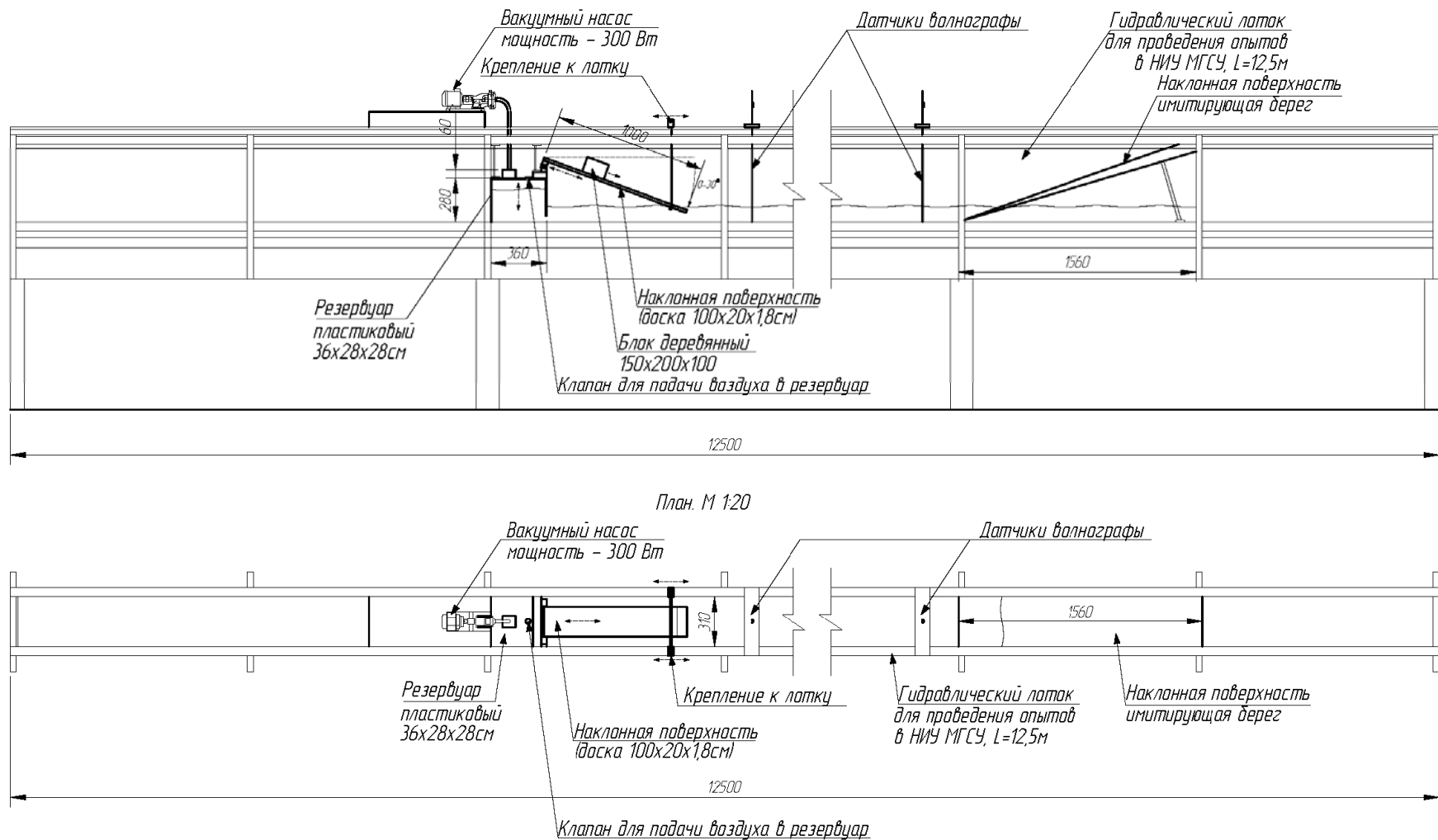


Рисунок 2.19 – Окончательный чертеж универсального генератора волн типа цунами различной формы

## 2.3.5 Описание оборудования и измерительных систем

### 2.3.5.1 Оборудование, используемое в экспериментах

Универсальный генератор волн типа цунами был собран в лаборатории Гидравлики и гидромеханики НОЦ "Гидротехника" НИУ МГСУ. Волногенератор устанавливается в гидравлический лоток с переменным уклоном (рисунок 2.20) [126].

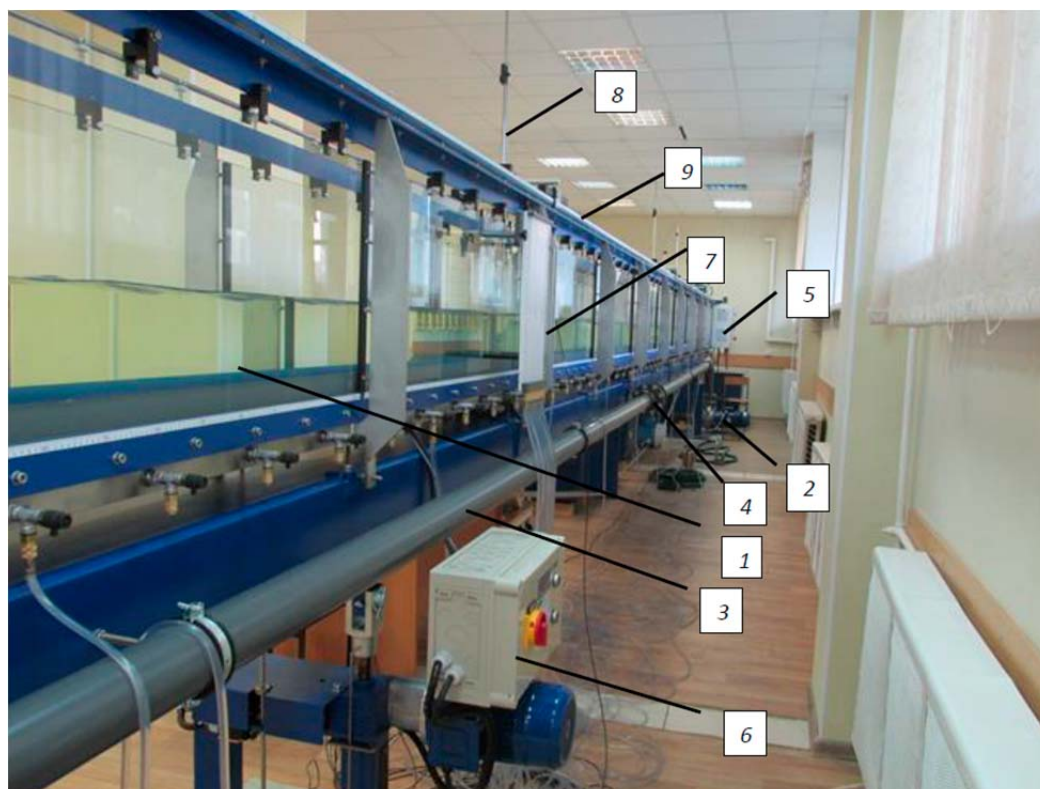


Рисунок 2.20 – Гидравлический лоток с переменным уклоном в лаборатории гидравлики: 1 – рабочий участок лотка, 2 – насос для откачки воды из канала, 3 – обратный напорный трубопровод, 4- расходомер, 5 – пульт для управления гидравлическим лотком, 6 – пульт для управления уклоном рабочего участка лотка, 7 – пьезометрический щит, 8 – датчик волнограф, 9 – направляющие для передвижения инструментальных вагонеток с датчиками [80]

Гидравлический лоток (производитель G.U.N.T. Gerätebau GmbH Германия) имеет следующие параметры:

- Длина лотка  $L=12,5\text{м}$  (рабочий участок), общая длина (вся конструкция)  $L_{\text{общ}}=15,5\text{м}$ ;
- Ширина лотка  $B=0,311\text{м}$ ;
- Глубина  $h=0,45\text{м}$ ;

- Уклон лотка меняется в границах от + 2,5% (1,4°) до – 0,5% (0,28°);
- Материал стенок канала - закаленное стекло, дно стальное (нержавеющая сталь);

Электронный пульт для управления гидрологический лотком (рисунок 2.21), связан с управляющим компьютером лаборатории, позволяет:

- Управлять экспериментальными исследованиями дистанционно;
- Фиксировать и обработать параметры моделируемых волн;
- Осуществлять вывод результатов измерений на управляющий компьютер;
- Проводить сохранение данных на съемные носители информации.

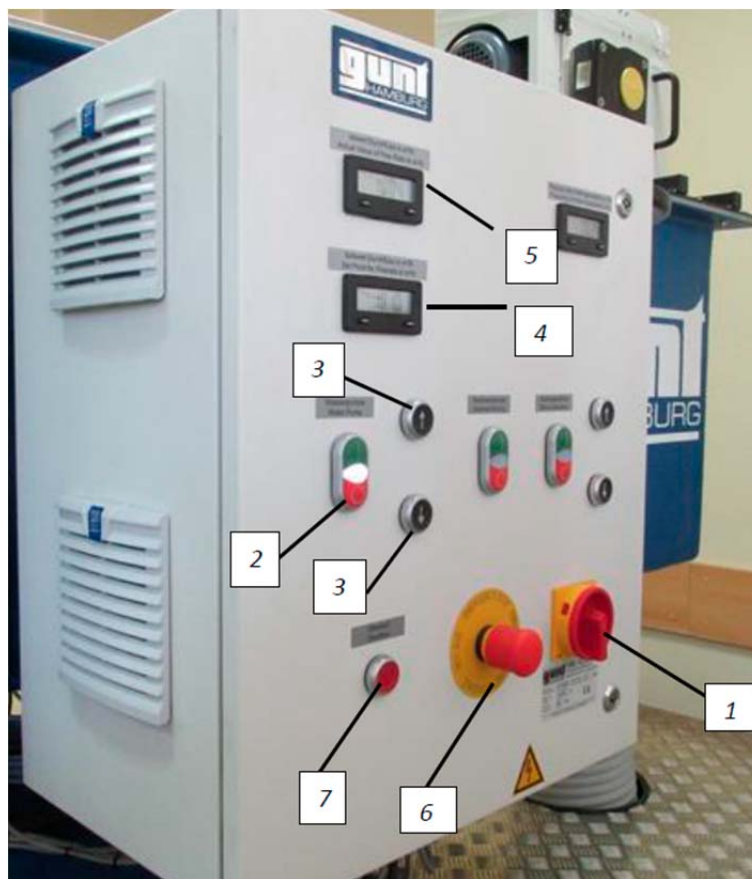


Рисунок 2.21 – Электронный пульт для управления гидравлическим лотком:  
 1 – включающий тумблер, 2 – включатель насоса 3 – кнопки, управляющие расходом, 4 – окошко, показывающее заданный расход, 5 – окошко, показывающее заданный расход, 6 – рычаг, аварийного отключения гидравлического лотка, 7 – кнопка, отключающая режим переполненного лотка (адаптировано из [80])

В экспериментах участвовали два вакуумных насоса:

Вакуумный насос №1 (производитель Alca Китай) имеет следующие параметры:

- Мощность всасывания воздуха – 12,5 Вт;
- Напряжение – 220-240 В /50 Гц.

Вакуумный насос (производитель Makita Япония), изображен на рисунке 2.22, имеет следующие параметры:

- Мощность всасывания воздуха – 300 Вт;
- Напряжение – 220-240 В /50 Гц.



Рисунок 2.22 – Вакуумный насос, используемый в экспериментальной установке

Для опытов было подготовлено 4 резервуара с различными габаритами сечений клапанов для подачи воздуха и выпускного отверстия. По очереди, в зависимости от проводимых опытов, они устанавливались в гидравлический лоток, все четыре имели одинаковые общие характеристики:

- Материал – пластик;
- Длина  $L=0,36\text{м}$ ;
- Ширина  $B=0,28\text{м}$ ;
- Высота  $H=0,28\text{м}$ .

Отличия состоят в следующем:

- Резервуар №1. Выпускное отверстие - 20,4x4см ( $S= 81,6 \text{ см}^2$ ), клапан для подачи воздуха в резервуар  $S= 3,5 \text{ см}^2$ ;

- Резервуар №2. Выпускное отверстие - 20,4x8см ( $S= 163,2 \text{ см}^2$ ), клапан для подачи воздуха в резервуар  $S= 3,5 \text{ см}^2$ ;

- Резервуар №3. Выпускное отверстие - 20,4x4см ( $S= 81,6 \text{ см}^2$ ), клапан для подачи воздуха в резервуар  $S= 7 \text{ см}^2$ ;

- Резервуар №4. Выпускное отверстие - 20,4x4см ( $S= 81,6 \text{ см}^2$ ), клапан для подачи воздуха в резервуар  $S= 10,5 \text{ см}^2$ ;

Все 4 резервуара имеют одинаковые крепления к гидравлическому лотку, а также к надстраиваемой части для моделирования оползневого цунами.

### **2.3.5.2 Измерительные приборы, используемые в экспериментах**

Для построения волновых профилей смоделированных волн используется системы измерения волн (Wave Gauge System) HR Wallingford (рисунок 2.23) – это простая и надежная система для измерения быстро меняющихся уровней воды [139].

Система измерения волн состоит из следующих компонентов:

- Датчики волнографы;
- Калибровочные ножки;
- Калибровочные штифты;
- Штатив для волновых зондов;
- Двухжильные кабели;
- Мониторы датчиков волнографов;
- Прибор сбора и обработки данных;
- Программное обеспечение для сбора и обработки данных HR DAQ.





Рисунок 2.23 – Комплект системы измерения волн HR Wallingford [139]

Доступные стандартные длины датчиков волнографов обеспечивают рабочий диапазон высоты волны 300 мм и 600 мм соответственно.

Перед использованием каждый датчик волнограф крепится к калибровочному стержню. Крепление происходит, когда резьбовой конец калибровочного стержня соединяется с блоком разъема волнового датчика и закрепляется помощью прилагаемого винта с головкой под ключ (рисунок 2.24).

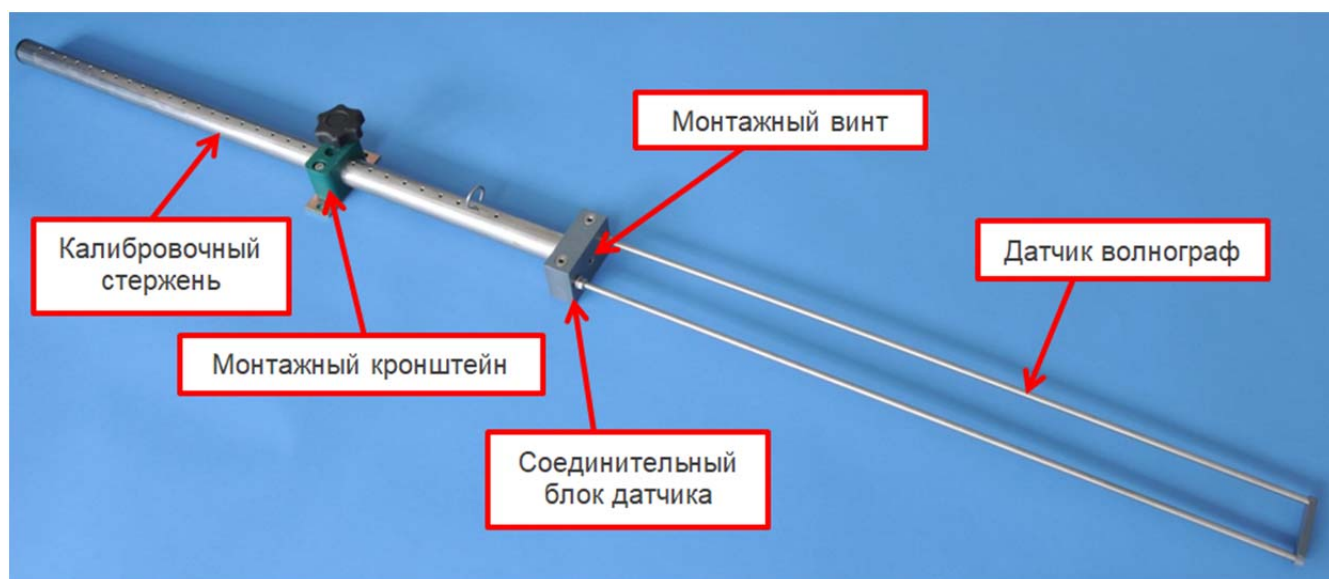


Рисунок 2.24 – Датчик волнограф и калибровочный стержень в сборке (адаптировано из [139])



Быстро изменяющийся уровень воды, во время моделирования волны, измеряется за счет монитора датчика волнографа. Он работает по принципу прохождения тока через погружной датчик волнограф, состоящий из пары параллельных проводов из нержавеющей стали. Ток, протекающий между проводами волнографа, пропорционален мгновенной глубине погружения.

Заданное выходное напряжение может быть откалибровано по высоте волны, изменяя глубину погружения зонда в стоячую воду на известную величину и отмечая изменение уровня выходного сигнала. Для облегчения этой операции предусмотрен калибровочный стержень с точно расположенными установочными отверстиями.

При измерении водной поверхности сигнал, полученный датчиком волнографом, передается на прибор сбора и обработки, который подключен к компьютеру с программным обеспечением HR DAQ и в самой программе выдаются результаты измерений на каждый волнограф. Результатом является запись изменения уровня поверхности воды во время моделирования волны от времени [139].

## **2.4 Выводы по второй главе**

Глава 2 посвящена физическому моделированию волн цунами, а также рассказывает 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 волн цунами были сделаны следующие выводы:

1. Физическое моделирование — это важный инструмент, который необходимо использовать для исследований такого явления как цунами, оно помогает получить решения для нескольких задач. Первая это определить прочность и устойчивость сооружения, подверженного воздействию цунами, второе это проверка результатов численного моделирования цунами;

2. Форма волны цунами отличается в зависимости от источника, порождающего волну. Цунами, порожденное оползнем или падением метеорита,

представляет собой одиночную волну – солитон, а цунами, вызванные сейсмикой, представляют собой, так называемые, N-волны, в соответствии с работами [114, 115, 116, 118], подразделяемые на LDN (впереди понижение уровня) равнобедренные, LDN обобщенные и LEN – (впереди повышение уровня) волны.

3. В связи с различной формой реальных цунами (одиночные и N-волны) следует внимательно относиться к выбору способа моделирования волны, потому что 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 основополагающими силами выступают силы тяжести и инерционные силы. Поэтому моделирование должно проводиться в соответствии с критерием Фруда ( $Fr$ ). Критерий Струхаля ( $Sh$ ) в данном случае будет выполняться автоматически.

Основным результатом второй главы является созданный универсальный генератор волн типа цунами различной формы в НИУ МГСУ. Работа по проектированию и сборке данной экспериментальной установки велась, опираясь на все вышеперечисленные выводы, благодаря этому удалось учесть много важных моментов при выборе методик моделирования и разработке конструкции волнового генератора. Разработанный универсальный генератор волн совмещает в себе, сразу два способа генерации волны, позволяющих воспроизводить модели цунами от сейсмического воздействия и модели волн, получившиеся в результате оползня или падения иных объектов в воду. Помимо этого, благодаря регулированию глубины воды в гидравлическом лотке присутствует возможность генерировать кноидальные волны (модели цунами в открытом океане) и трансформированные волны цунами при выходе на мелководье - ударный волновой бор.

Универсальный генератор волн типа цунами различной формы в НИУ МГСУ является портативной комплексной установкой, позволяющей моделировать и измерять различные виды волн 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 разработанную установку полезной для изучения природы цунами, а также проверки нагрузок от цунами на гидротехнические сооружения.

## **ГЛАВА 3. ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **3.1 Введение**

Третья глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям волн цунами в НИУ МГСУ, выполненных в рамках диссертационного исследования. Благодаря запроектированной и собранной экспериментальной установке были проведены серии опытов, которые позволили подтвердить надежность и эффективность реализованного генератора волн, а также более подробно изучить поведение различных волн цунами. В настоящей главе представлены основные результаты проведенных экспериментов: показания датчиков волнографов, фотофиксация полученных волн, графики сравнения показателей датчиков, а также полученные характеристики моделируемых волн, сведенные в таблицы.

### **3.2 Программа экспериментов**

Тестовые исследования проводились в соответствии с разработанной программой экспериментов, которая состоит из следующих опытов:

- Проверка методики моделирования цунами, вызванных сейсмической активностью;
- Моделирование с целью изучения формы полученных волн цунами, вызванных сейсмической активностью;
- Исследование зависимости формы и высоты смоделированных волн от габаритов выпускного отверстия в экспериментальной установке;
- Исследование зависимости формы и высоты смоделированных волн от габаритов сечения воздушного клапана в экспериментальной установке;
- Исследование эффекта отражения от берегового откоса и повторного отражения от волнового генератора смоделированных волн цунами;
- Опыты по моделированию цунами от оползней с изменением угла наклона поверхности, по которой опускается блок в воду;
- Сопоставление и анализ смоделированных оползневых цунами и цунами, вызванных сейсмической активностью;

- Сопоставление полученных моделей волн с реальными волнами цунами и результатами физического моделирования отечественных и зарубежных исследований цунами.

За время проведения экспериментальных исследований все опыты были выполнены в полном объеме, была проведена обработка представленных данных и проанализированы полученные результаты. Далее более подробно изложены все проведенные работы по экспериментам.

### **3.3 Первые опыты, проверка методики моделирования цунами, вызванных сейсмической активностью**

К началу 2021 года, была подготовлена часть экспериментальной установки, позволяющая воспроизводить N-волны, или по-другому, цунами, вызванные сейсмическими воздействиями.

В апреле 2021 года состоялась первая серия лабораторных опытов (рисунок 3.1) [125, 133, 134, 135, 136, 137, 138].

Были поставлены следующие задачи:

- проверка надежности и устойчивости конструкции волнового генератора;
- проверка предоставленного оборудования (на тот момент, вакуумного насоса и резервуара);
- апробация методики моделирования сейсмических цунами волн;
- получение первых смоделированных волн.

Во время проведения эксперимента методика генерирования волн цунами сейсмического происхождения была полностью проверена. Как и планировалось, при начале работы насоса, уровень воды в лотке понижаться, тем самым имитируя реальные условия цунами сейсмического происхождения. Дальше, как только была прекращена работа насоса, выкачивающего воздух из резервуара, и открыт воздушный клапан, произошла генерация волн в лотке.

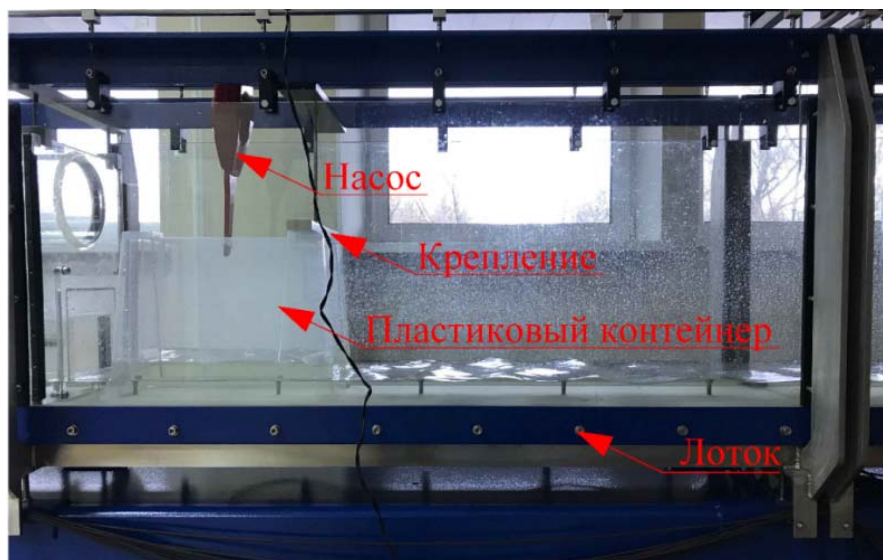


Рисунок 3.1 – Первый эксперимент в лаборатории гидравлики НИУ МГСУ с использованием генератора волн цунами (адаптировано из [125, 133])

Для опытов, была использовано не полная длина лотка. Были поставлены специальные перегородки, ограничивающие две секции лотка (2,5м). Для фиксации волн, был использован фотоаппарат и измерительная сетка, с ячейками 5x5 см, прикрепленная к стеклу лотка.

Поставленные задачи были полностью выполнены и получены первые результаты (таблица 3.1), однако, при испытаниях, у разработанного волногенератора было выявлено слабое место, которое было необходимо усовершенствовать. Проблема заключалась в недостаточной мощности используемого вакуумного насоса. Во время проведения опытов было невозможно произвести полную откачку воздуха из резервуара, тем самым наполнив его водой. Максимально получалось поднять уровень воды в резервуаре на 1/3 от его высоты, следствием этого, стала генерация довольно мелких волн в лотке (высота волн не превышала 2 см).

Таблица 3.1. Результаты испытаний, проведенных в гидравлической лаборатории НИУ МГСУ апреле 2021 года

Номер испытания	1	2	3	4	5
<b>Серия опытов</b>					
Уровень воды в лотке до включения насоса (мм)	100	90	80	70	60

Продолжение таблицы 3.1

Номер испытания	1	2	3	4	5
<b>Серия опытов</b>					
Уровень воды в лотке после заполнения резервуара (мм)	92	84	75	64	53
Уровень воды, полученный при генерации волны (мм)	118	105	94	81	67
Высота волны (мм)	18	15	14	11	7

### **3.4 Усовершенствование экспериментальной установки и увеличение высоты полученных моделей волн**

В связи с возникшей проблемой в первой серии опытов последующая работа в 2021 году была направлена на модернизацию волнового генератора. Было необходимо генерировать волны с большей амплитудой, чтобы было возможно более точно фиксировать форму волны и волновые характеристики во время экспериментов.

В первую очередь был подобран новый вакуумный насос, большей мощностью ( $N=300$  Вт), а также было принято решение провести исследования зависимости высоты и формы волны от габаритов выпускного отверстия, через которое моделируется волна. Был подготовлен второй резервуар с такими же габаритами, у которого, площадь выпускного отверстия была увеличена в два раза.

К концу осени 2021 года были проведены 3 сравнительные серии опытов (рисунок 3.2) [125, 133, 134, 135, 136, 137, 138]:

- с насосом №1 ( $N=12,5$  Вт) и резервуаром №1 (выпускное отверстие 20,4x4см);
- с насосом №2 ( $N=300$  Вт) и резервуаром №1;
- с насосом №2 и резервуаром №2 (выпускное отверстие 20,4x8см).





Рисунок 3.2 – Проведение эксперимента по моделированию цунами осенью 2021 года [125]

Так же как и в первых опытах, для фиксации характеристик волн использовался фотоаппарат, установленный на штатив и измерительная сетка. Проводимые испытания также проводилась в двух секциях лотка (2,5м).

Результаты всех проведенных осенних испытаний были сведены в общую таблицу (таблица 3.2).

Таблица 3.2. Результаты испытаний, проведенных в НИУ МГСУ осенью 2021 года [125]

Номер испытания	1	2	3	4	5
<b>Серия опытов №1</b>					
Уровень воды в лотке до включения насоса (мм)	85	75	65	55	55
Уровень воды в лотке после заполнения резервуара (мм)	75	64	52	48	48
Уровень воды, полученный при генерации волны (мм)	92	80	68	65	62
Высота волны (мм)	17	16	16	17	14

Продолжение таблицы 3.2.

Номер испытания	1	2	3	4	5
<b>Серия опытов №2</b>					
Уровень воды в лотке до включения насоса (мм)	170	140	100	90	85
Уровень воды в лотке после заполнения резервуара (мм)	130	91	74	70	67
Уровень воды, полученный при генерации волны (мм)	188	145	116	102	99
Высота волны (мм)	58	54	42	32	32
<b>Серия опытов №3</b>					
Уровень воды в лотке до включения насоса (мм)	180	150	140	120	105
Уровень воды в лотке после заполнения резервуара (мм)	170	143	133	110	100
Уровень воды, полученный при генерации волны (мм)	198	169	160	130	115
Высота волны (мм)	28	26	26	20	15

Подобранный более мощный вакуумный насос показал хорошую работу, смоделированные волны стали достигать высоты 5-6 см, это положительно влияет на измерение характеристик волн во время проведения опытов.

Изменение площади выпускного отверстия, напротив, отрицательно сказалось на генерации волн. Сгенерированные волны в третьей серии опытов достигали высоты не более 3 см, а учитывая то, что в данной серии работал уже обновленный насос, и с объемом воды в резервуаре не было никаких проблем, получился слабый результат.

Обработав полученные данные и проанализировав результаты, было решено продолжать работу с обновленным насосом №2 и резервуаром №1 (с меньшим выпускным отверстием).

Следующим этапом было решено исследовать более детально формы полученных волн, а также произвести анализ сходства с существующими цунами [125, 133, 134, 135, 136, 137, 138].

### 3.5 Исследование зависимости формы и высоты смоделированных волн от глубины воды

#### 3.5.1 Трансформация волн цунами на подходе к берегу

Важным моментом в исследовании волн цунами является изучение изменения формы волны при выходе на мелководье. При подходе к побережью начинается процесс трансформации волны. В связи с трением, вызванным движением частиц воды, взаимодействующих с морским дном, скорость волны начинает снижаться при подходе волны к берегу и уменьшении глубины воды, движение становится более медленным, также уменьшается длина волны. Во время данного процесса, происходит сжатие волны, при этом энергия волны, распределенная по вертикали, концентрируется на все меньшем расстоянии, что приводит к увеличению высоты волны (рисунок 3.3) [6, 140]. Процесс увеличения волны, происходит, согласно закону Грина (1.4, 1.5) [4, 6], описанному в первой главе диссертации и представляющему следующую закономерность (3.1):

$$\xi h^{1/4} = const \quad (3.1)$$

Таким образом, в реальных случаях, высота подходящей к берегу волны может достигнуть 15–30 метров [4, 6].

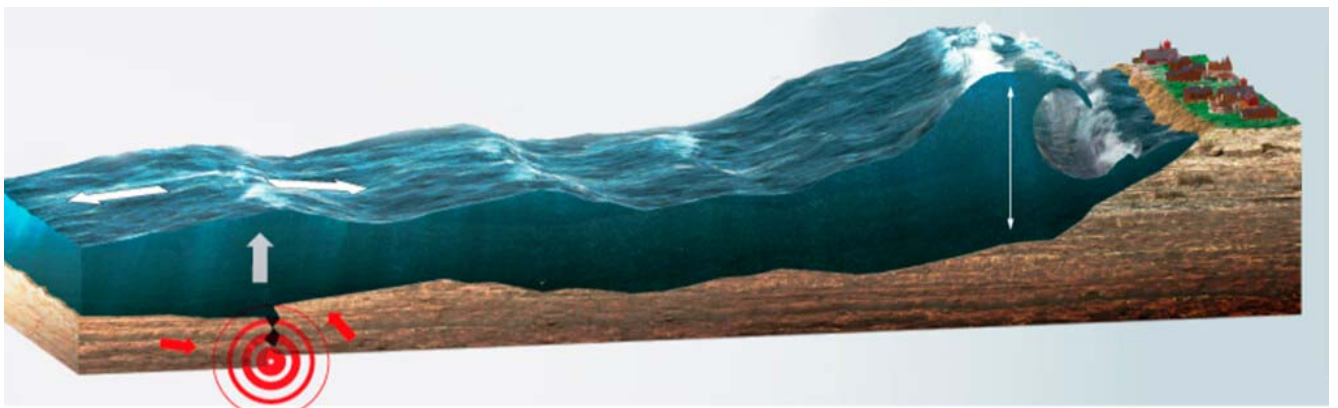


Рисунок 3.3 – Увеличение высоты волны при подходе к берегу (адаптировано из [141])

Уже около непосредственно береговой черты, высота цунами обычно сильно коррелирует с прибрежной батиметрией и может значительно меняться в прибрежном направлении. Часто происходит обрушение кромки волны и

начинается превращение волны в турбулентный поток (обрушение волны), в результате данных нелинейных процессов, происходит образование волнового бора. Бор представляет собой ударную волну, получившуюся в результате нелинейной трансформации цунами.

Скорость потока, который выходит на береговой откос и критерий обрушения волны, в соответствии с Н.Е. Вольцингером [142], записываются следующими выражениями (3.2, 3.3):

$$U = \frac{\omega \zeta_R}{\alpha} = \frac{\omega \zeta_R L_R}{h} \quad (3.2)$$

$$Br = \frac{\omega^2 \zeta_R}{g \alpha^2} = \frac{\omega^2 \zeta_R L_R^2}{h} < 1 \quad (3.3)$$

где,  $\alpha$  – уклон дна (берегового откоса);

$g$  – ускорение силы тяжести;

$\omega$  – частота волны;

$L_R$  – длина берегового откоса;

$\zeta_R$  – высота заплеска;

$h$  – глубина воды.

При обрушении на береговые территории обрушенная волна в виде ударного бора может привести к значительным разрушениям, а также жертвам. Такой бор образовался на побережье Тайланда во время цунами в Индийском океане в 2004 году (рисунок 3.4) [13, 125, 143] а также при вхождении цунами 2011 года в реку Нака у города Хитачинака, Япония (рисунок 3.5) [15, 16, 125, 143].



Рисунок 3.4 – Цунами в Тайланде, 2004 год. Пример обрушающегося бора на берегу [143, 144]



Рисунок 3.5 – Волна цунами в Японии, 2011 год. Волны идут против течения на реке Нака, пример волнообразного бора (идет справа налево) [143, 145]

Цунами представляют большую опасность на той местности, где происходит сужение береговой полосы и уменьшение глубины воды, в данных зонах высота волны существенно будет увеличиваться, помимо этого, также опасны устья рек. Зародившийся волновой бор может пройти очень далеко внутрь

береговых территорий, как и произошло во время выхода цунами на берег в 2011 году в Японии [15, 16, 125, 143].

Исследование процессов наката волн цунами на берег остается на сегодняшний день очень важной задачей. Как было описано ранее, волна, при подходе к берегу, трансформируется, меняется форма, это определяется целым рядом факторов, к которым относятся топография (батиметрия) береговой зоны, форма береговой полосы, изменение глубины воды на подходе к берегу. Такому процессу, как накат волны и изменения формы волны при выходе на берег также дается свое объяснение в теории длинных волн.

### 3.5.2 Изменение формы волны в теории длинных волн

Как было сказано ранее, волны цунами являются длинными волнами, движение и изменение формы данных волн с математической точки зрения описывается в рамках теории длинных волн.

В параграфах 1.2.2 и 3.5.1 были рассмотрены основные закономерности, по которым происходит увеличение волны цунами на подходе к берегу. В данном параграфе рассмотрим дальнейшую трансформацию уже увеличенной волны, выходящей на берег, в ударный бор с математической точки зрения, представленной в теории длинных волн.

В соответствии с работами отечественных ученых Родина и Пелиновского [143], процесс, при котором происходит нелинейная трансформация волны на мелкой воде, предполагает аналитическое решение в виде Римановых волн [143, 146, 147, 148, 149, 150, 151 ], которое в свою очередь опирается на основные уравнения движения длинных волн (3.4, 3.5) [143]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} ([h + \eta]u) = 0 \quad (3.5)$$

где:

$\eta$  – смещение водной поверхности;

$u$  – горизонтальная скорость водного потока;

$h$  – глубина невозмущенной воды.



Решение для необрушенной Римановой волны по Вольцингеру, Родину и Пелиновскому [142, 143] записывается в виде следующих уравнений (3.6, 3.7, 3.8):

$$\frac{\partial H_d}{\partial t} + V(H_d) \frac{\partial H_d}{\partial x} = 0 \quad (3.6)$$

$$u = 2(\sqrt{gH_d} - \sqrt{gh}) = 0 \quad (3.7)$$

$$V = \sqrt{gh} + \frac{3u}{2} = 3\sqrt{gH_d} - 2\sqrt{gh} \quad (3.8)$$

где:

$V$  – характеристическая скорость;

$H_d$  – полная глубина, сложение глубины невозмущенной воды  $h$  и смещения водной поверхности при волнении  $\eta$ .

Уравнения 3.6 и 3.7 справедливы для волны с любой амплитудой и действуют вплоть до момента ее обрушения.

Общее решение уравнений 3.6 и 3.7 по Родину и Пеленовскому [143] записывается в виде следующего выражения (3.9):

$$H_d(x, t) = H_0[x - V(H_d)t] \quad (3.9)$$

где:

$H_0$  – величина, определяющая профиль поверхности воды в начальный момент времени.

Решение выражения (3.9) описывает Римановую волну или другими словами нелинейную деформацию волны со скручиванием ее передней части.

Родин и Пелиновский [143] представили график зависимости скорости деформации волны, равной  $\frac{V(H_d)}{c}$  (где  $c = \sqrt{gh}$  (1.1) – скорость распространения длинных волн), от локальной глубины в волне, равной отношению  $\frac{H_d}{h}$  (рисунок 3.6). На данном графике представлены и отрицательные значения скорости деформации, которые получаются при волне с первоначальной впадиной – LDN волна по Taderalli, S. и Synolakis, C. E [114, 115] или как ее обозначили Родин и Пелиновский [143] – волна отрицательной полярности. Скорость гребня волны всегда больше линейной скорости распространения волны, в связи с этим, через определенное время волна получает крутой фронт, который начинает обрушаться,

при волне с ведущей впадиной, скорость впадины явно меньше линейной скорости, в данном случае крутой фронт, будет уже формироваться на заднем волновом склоне. Таким образом, отрицательные значения скорости деформации волны получаются, если амплитуда впадины принимает большое значение, при котором будет выполняться следующее условие [143] (3.10):

$$H_d < H_{cr} = \frac{4}{9}h \quad (3.10)$$

где:

$H_{cr}$  – критическая глубина.

Также при волне с первоначальной впадиной, различные участки волнового профиля двигаются в противоположные стороны (масса воды во впадине – в сторону от берега, а масса воды в формирующемся за впадиной гребне – в сторону к берегу), в связи с этим, ударная волна будет формироваться гораздо быстрее, почти мгновенно [143].

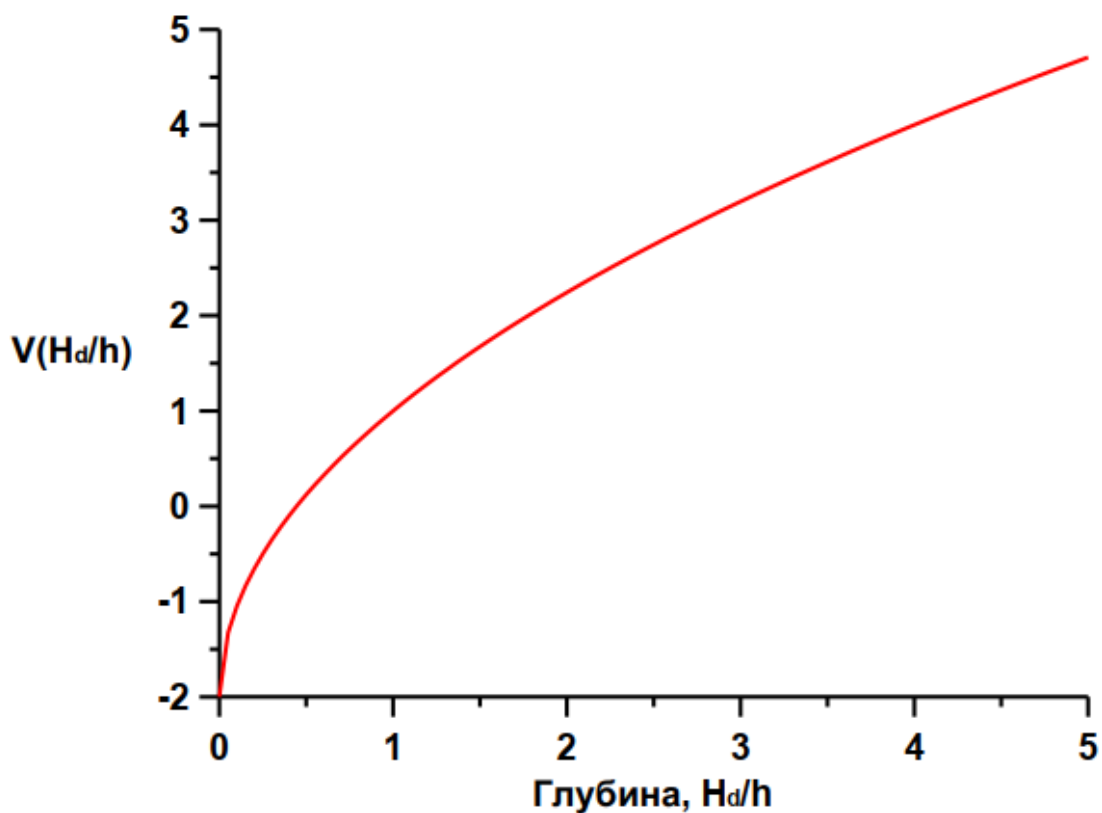


Рисунок 3.6 – График зависимости скорости деформации волны от значения локальной глубины в волне (адаптировано из [143])



Процесс, приводящий к обрушению волнового фронта и зарождению ударного бора, как было сказано ранее, зачастую происходит на подходе волны к берегу, когда начинает изменяться глубина воды, а также, при вхождении волны в устье реки [143, 152, 153, 154]. Наряду с этим, важно определение момента обрушения и формы волны.

В своих работах И.И. Диденкулова [150] представила выражения (3.11, 3.12) для определения локальной крутизны волны и расстояния, на котором будет происходить опрокидывание волны (для синусоидальной волны), выходящей на берег (рисунок 3.7):

$$s(x) = \frac{s_0}{1 - \frac{x+L-x}{L_n}} \quad (3.11)$$

$$L_n = \frac{2ch_0}{3\omega A} \quad (3.12)$$

где:

$s_0$  – крутизна волны, подходящей к берегу;

$h_0$  – изначальная глубина воды;

$A$  – амплитуда волны;

$\omega$  – частота волны;

$L$  – протяженность зоны наката волны (берегового откоса);

$X$  – протяженность зоны постоянной глубины (ровное дно).

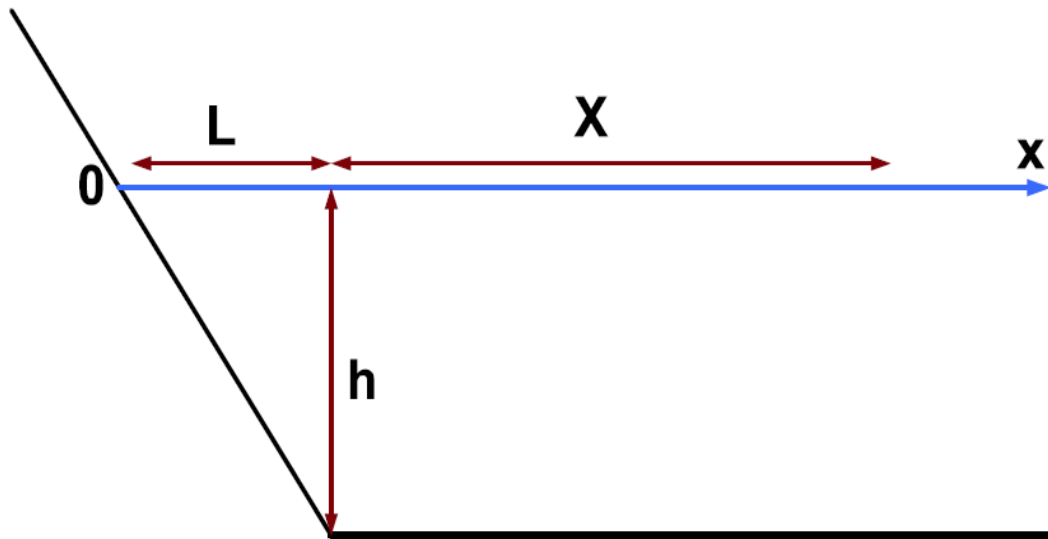


Рисунок 3.7 – Геометрия участка прибрежной зоны [150]

В соответствии с [143], в зависимости от высоты бора классифицируют несколько типов ударной волны:

- параболическая волна;
- гидравлический прыжок;
- волнообразный бор.

В третьем случае при описании устройства ударной волны нужно брать во внимание дисперсионные эффекты. Одним из примеров является уравнение Кортевега-де Фриза, описанное Н.Е. Вольцингером [142]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{h^2 \sqrt{gh}}{6} \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} = 0 \quad (3.13)$$

где последнее слагаемое отражает дисперсионный эффект.

Если же рассматривать первые два случая (параболическая волна, гидравлический прыжок) учитываются уравнения мелкой воды в дивергентной форме с необходимыми граничными условиями при разрыве. При этом, если волна является достаточно длинной, когда ударный фронт составляет малую часть волны, тогда ее целиком можно представить как ударную волну, не вдаваясь в подробности структуры фронта и проводя аппроксимацию разрывом данного фронта [142, 143]. Согласно [142] небольшую зону, где происходит

обрушение волны, заменяют разрывом и процесс формирования ударной волны будет описываться следующими уравнениями (3.14, 3.15):

$$[cH] = [Hu] \quad (3.14)$$

$$[cHu] = \left[ Hu^2 + \frac{1}{2} gH^2 \right] \quad (3.15)$$

Если бор образовывается на волновом фронте, то скорость распространения волны и скорость потока за фронтом, согласно Н.Е. Вольцингеру [142], находится следующими выражениями (3.16, 3.17):

$$c = \left\{ gh \left( 1 + \frac{\eta}{h} \right) \left[ 1 + \frac{\eta}{2h} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

$$u = \eta \left\{ \frac{g}{h} \left[ 1 + \frac{\eta}{2h} \right] \left( 1 + \frac{\eta}{h} \right)^{-1} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

Изменение высоты бора обусловлено характером волнового поля, находящегося за разрывом. При рассмотрении случая бора малой амплитуды поле, за границами разрыва представлено также решением в виде Римановой волны, высота бора рассчитывается аналитически [142, 148] и формулы (3.16, 3.17), преобразуются в следующие выражения (3.18, 3.19):

$$c \cong \sqrt{gh} \left( 1 + \frac{3\eta}{4h} \right) \quad (3.18)$$

$$u \cong \eta \sqrt{gh} \left( 1 - \frac{1\eta}{4h} \right) \quad (3.19)$$

Также аналитическое решение получено для развитого бора, где значения скоростей течения с обеих сторон от разрыва направлены к постоянным значениям – константам [142, 155, 156, 157].

### 3.5.2.1 Парадокс длинных волн

Французский ученый Ле Меоте [158], описал противоречие в теории длинных волн при образовании волнового бора и назвал его «парадоксом длинных волн». Согласно Ле Меоте [158], теория длинных волн используется в тех случаях, когда относительная глубина мала. В таких случаях вертикальными ускорениями пренебрегают, а также невелика кривизна траекторий частиц воды в волне. В связи с этим, вертикальная компонента движения не оказывает воздействие на распределение давления, являющееся гидростатическим, другими

словами давление в данной точке считается равным произведению удельного веса воды и расстояния от свободной поверхности, причем свободная поверхность в теории длинных волн неизвестна даже первом этапе вычислений. Поскольку давление считается гидростатическим, следовательно, вертикальное распределение скорости будет однородным. Исходя из этого, взамен скорости частицы можно рассматривать осредненное по вертикали значение скорости. Также и в случае обобщенного уравнения Бернулли, когда применяются квадратичные члены, требуется вводить поправочный коэффициент, приближенный к единице.

Упрощающие допущения в теории длинных волн приводят к еще одной погрешности, которая регулярно встречается при использовании данной теории волн. Поскольку скорость «элемента волны» равна  $\sqrt{gh}$ , т. е. пропорциональна квадратному корню из глубины, то волновые элементы, несущие большую энергию, стремятся догнать элементы, расположенные впереди (рисунок. 3.8). В результате образуется вертикальная стена воды, которая формирует приливной бор. В жизни это явление физически возможно, когда оно происходит, начало его образования, происходит намного позже, чем это следует из теории длинных волн. Точно также из расчетов получается, что обрушение длинной волны, набегавшей на берег, происходит раньше, чем в той ситуации, когда данное обрушение только было обусловлено изменением глубины дна.

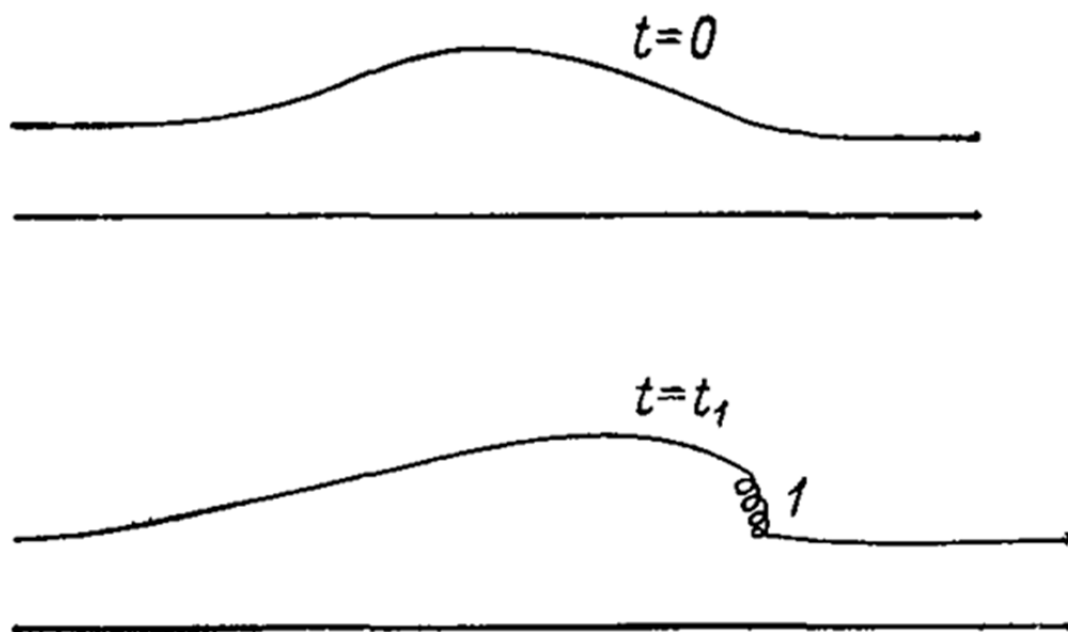


Рисунок 3.8 – Иллюстрация парадокса длинных волн, 1 – волновой бор [158]

Подводя итог вышеизложенного, следует понимать, что теория длинных волн и стационарный волновой профиль – это два совершенно противоположных, не допускающих друг друга теоретических понятия (хоть стационарный поток также может встречаться в природе). Это внутреннее противоречие теории длинных волн представляет собой так называемый парадокс длинных волн, аналоги которого встречаются также в газовой динамике и нелинейной акустике [125, 158]. Существование стационарного волнового профиля объясняется двумя стабилизирующими факторами: вертикальным ускорением и донным трением.

### 3.5.3 Эксперименты в НИУ МГСУ по изучению формы волн цунами

После успешного усовершенствования волнового генератора и проведенных серий опытов осенью 2021 года, дальнейшие работы были направлены на изучение поведения волн цунами при различных глубинах воды.

В марте 2022 года была проведена серия экспериментов с различными глубинами воды в лотке (рисунки 3.7, 3.8) [125, 137, 138].

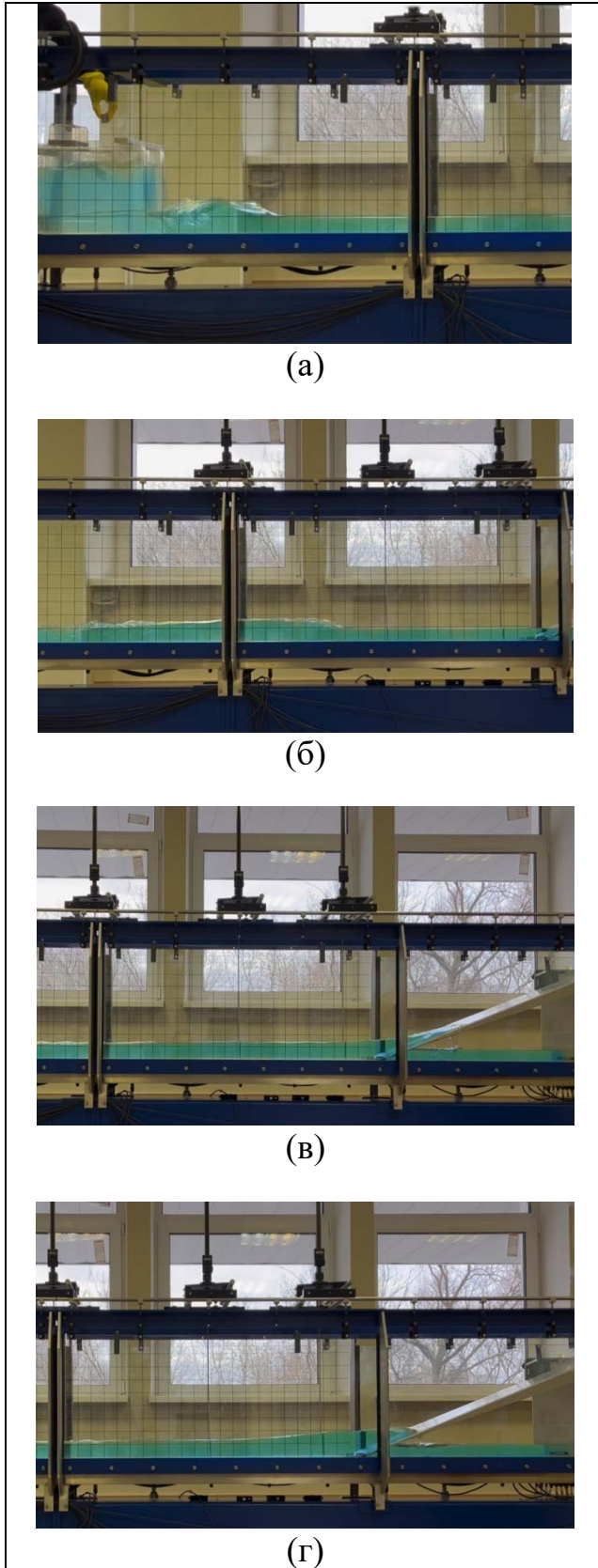


Рисунок 3.7 – Формирование (а), распространение (б) и накат на берег (в, г) волны при глубине 5см [125]

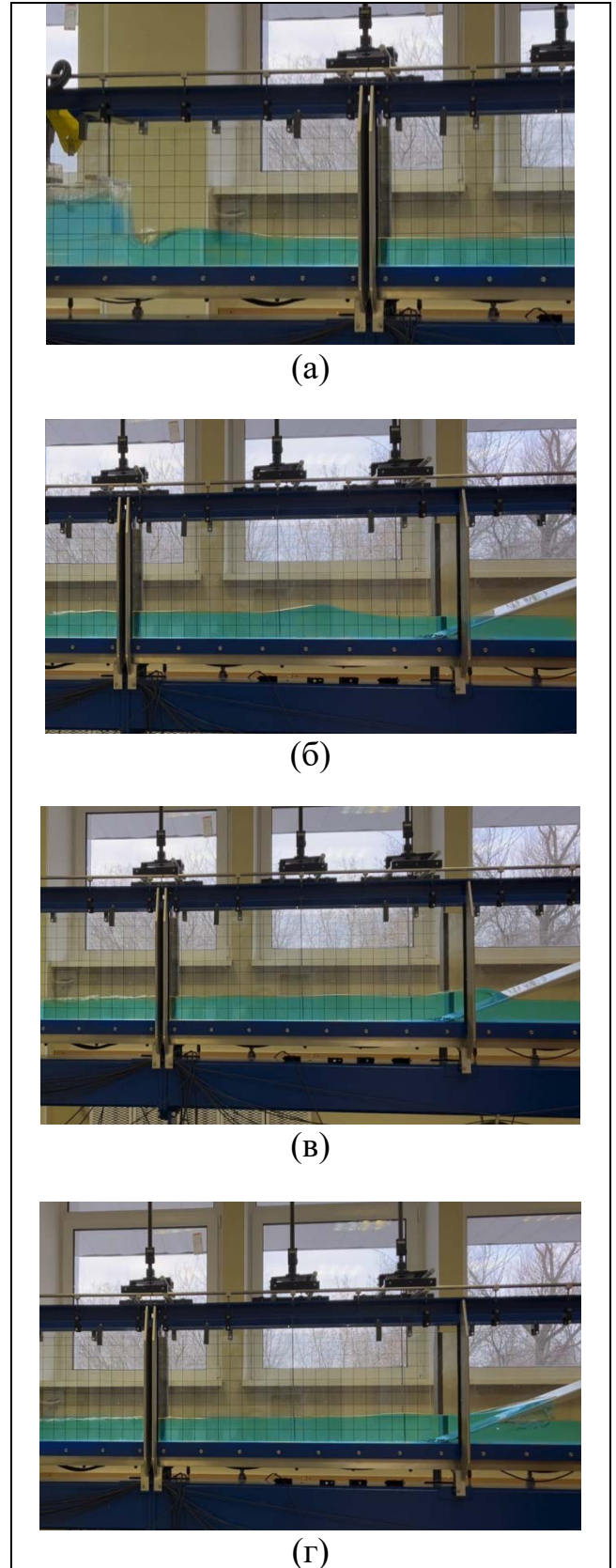


Рисунок 3.8 – Формирование (а), распространение (б) и накат на берег (в,г) волны при глубине 10см [125]

В проведенных опытах было установлено три фиксирующих устройства – фотоаппарата, которые фиксировали формирование волны, ее распространение в гидравлическом лотке, а также выход волны на наклонную поверхность, имитирующую береговой откос.

Проведя анализ результатов фотофиксации экспериментов, был сделан вывод, что при различной глубине воды в гидравлическом лотке, происходит моделирование различных по форме волн. Так, при глубине воды в лотке 5 см, был сгенерирован волновой бор (рисунок 3.7), а при большей глубине - 10 см, генерируется кноидальная волна (рисунок 3.8). Смоделированные волны имеют различия на всем протяжении распространения в лотке, начиная от формирования на выпускном отверстии резервуара и заканчивая выходом на наклонную поверхность, имитирующую берег. В связи с этим можно сделать вывод, что при большей глубине воды в лотке, получается волна, сопоставимая с реальной волной цунами в открытом море, а при опытах с меньшей глубиной, в лотке моделируются ударные волны типа бор, подобные обрушенным трансформированным волнам, выходящим в береговую зону, о которых было сказано ранее.

Для подтверждения и более детального исследования форм смоделированных волн при различной глубине, следующим этапом стало применение системы измерения волн (Wave Gauge System) HR Wallingford [139] для построения волнового профиля волн в лотке. В июне 2022 года состоялись новые серии опытов (рисунок 3.9), при которых были измерены профили получающихся волн при глубине 5 см и 10 см. Для моделирования была использована часть лотка в 4 секции, общей длиной 5 м. Два волновых датчика, подключенных к компьютеру были установлены в гидравлический лоток на расстоянии 0,35 м (датчик №1) и 4,65 м (датчик №2) от волнового генератора соответственно. На компьютере установлено программное обеспечение для сбора и обработки данных HR DAQ, позволяющее сразу фиксировать данные с датчиков во время эксперимента.

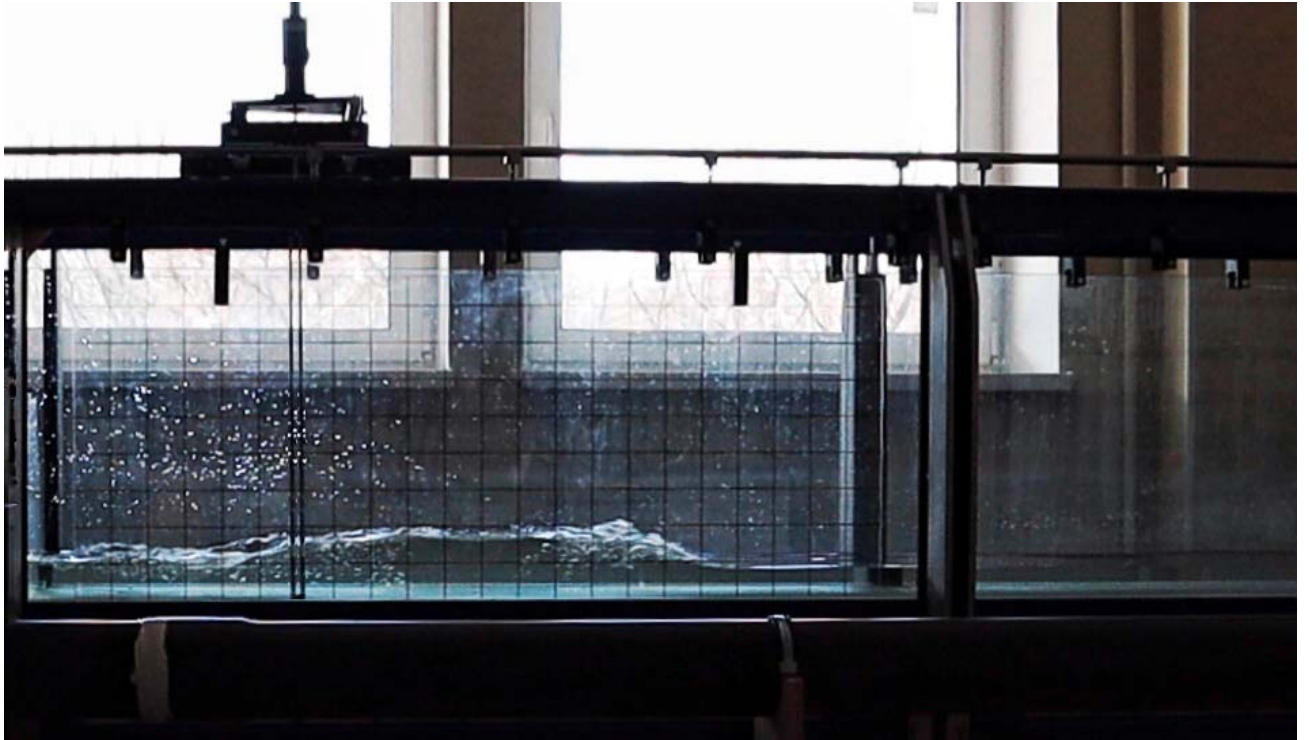


Рисунок 3.9 – Проведение эксперимента в июне 2022 года

Результатами проведенных опытов стали временные ряды - графики зависимости амплитуды от времени для каждой сгенерированной волны. Для проведения анализа и сравнения форм полученных волн, представлены скриншоты результатов программы HR DAQ, на которых показаны временные ряды с каждого датчика для одной из полученных волн при глубине 5 см (рисунки 3.10, 3.11) и при глубине 10 см (рисунки 3.12, 3.13).



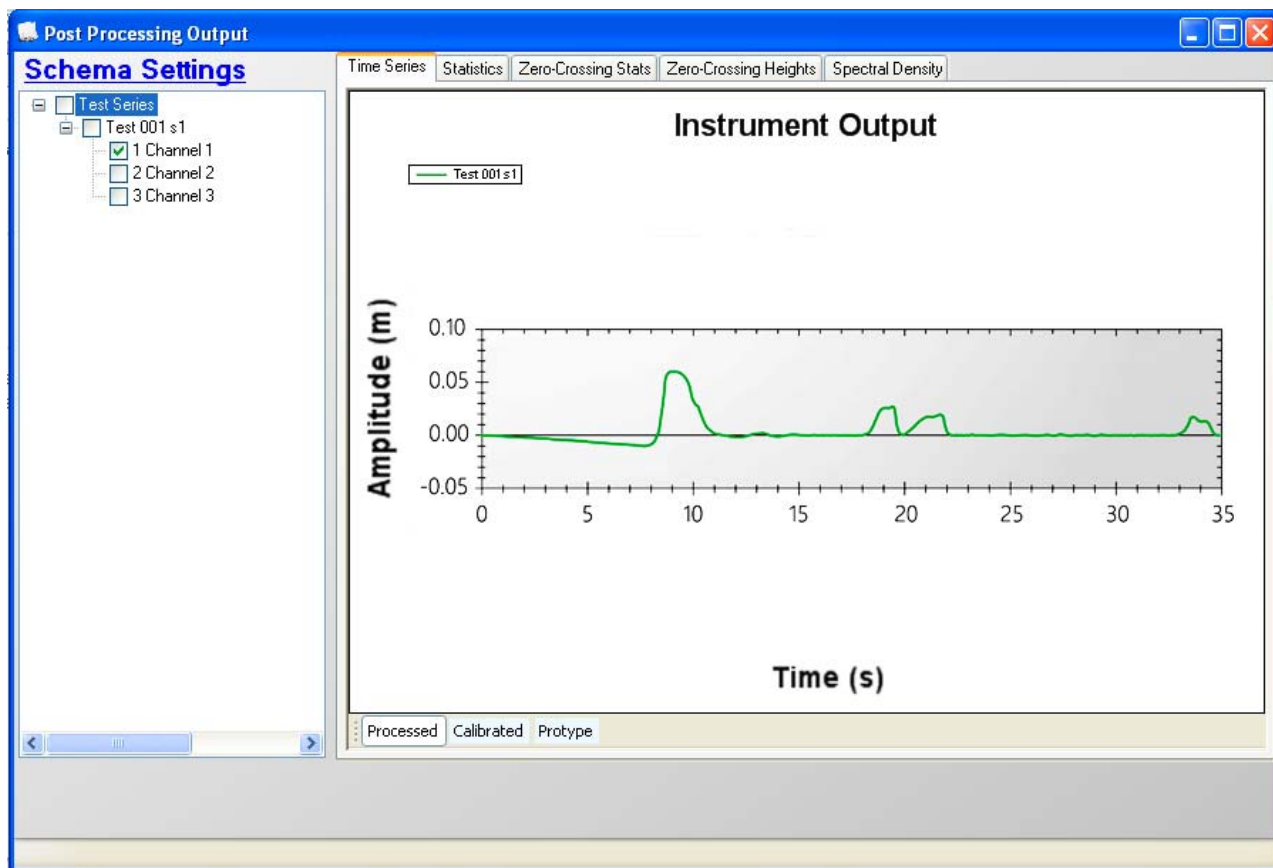


Рисунок 3.10 – Показания датчика №1. Генерация волны при глубине 5см

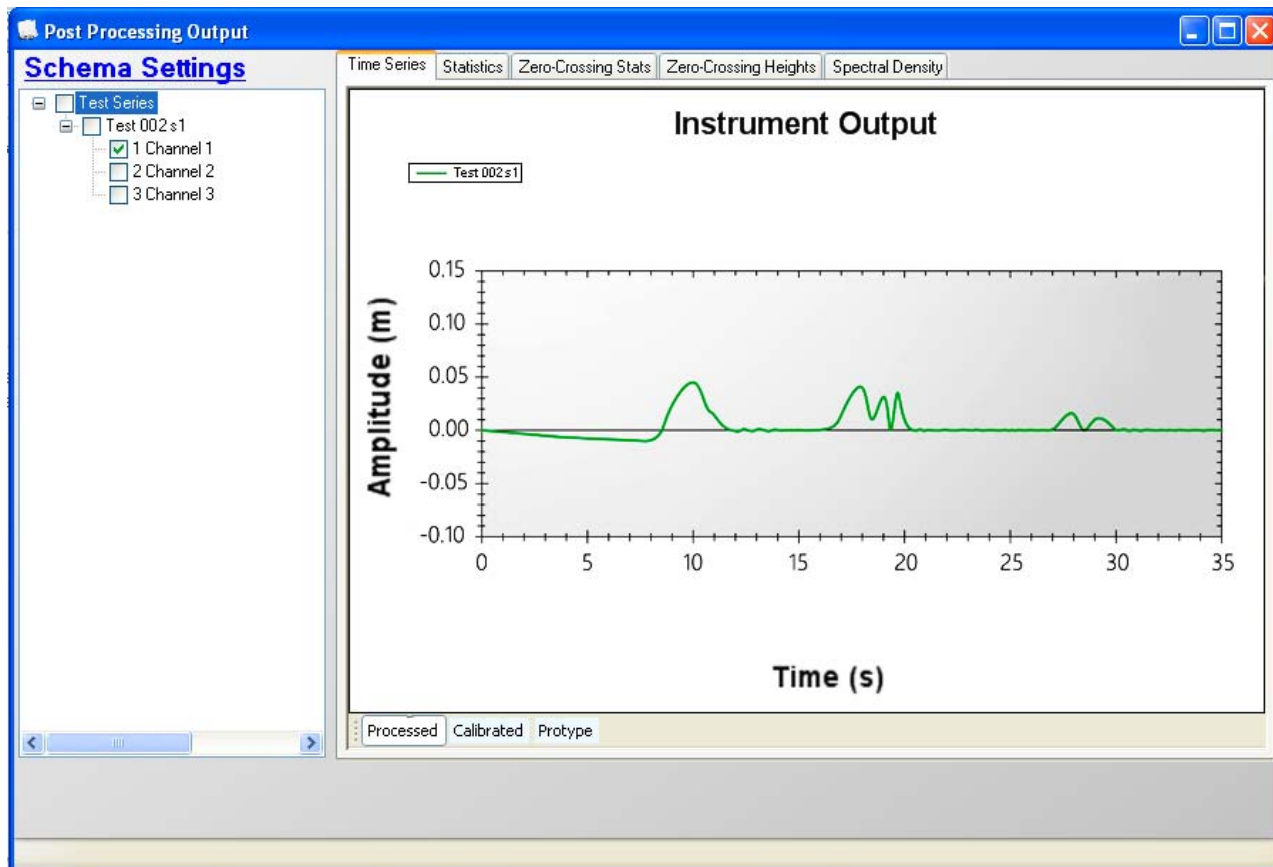


Рисунок 3.11 – Показания датчика №1. Генерация волны при глубине 10см

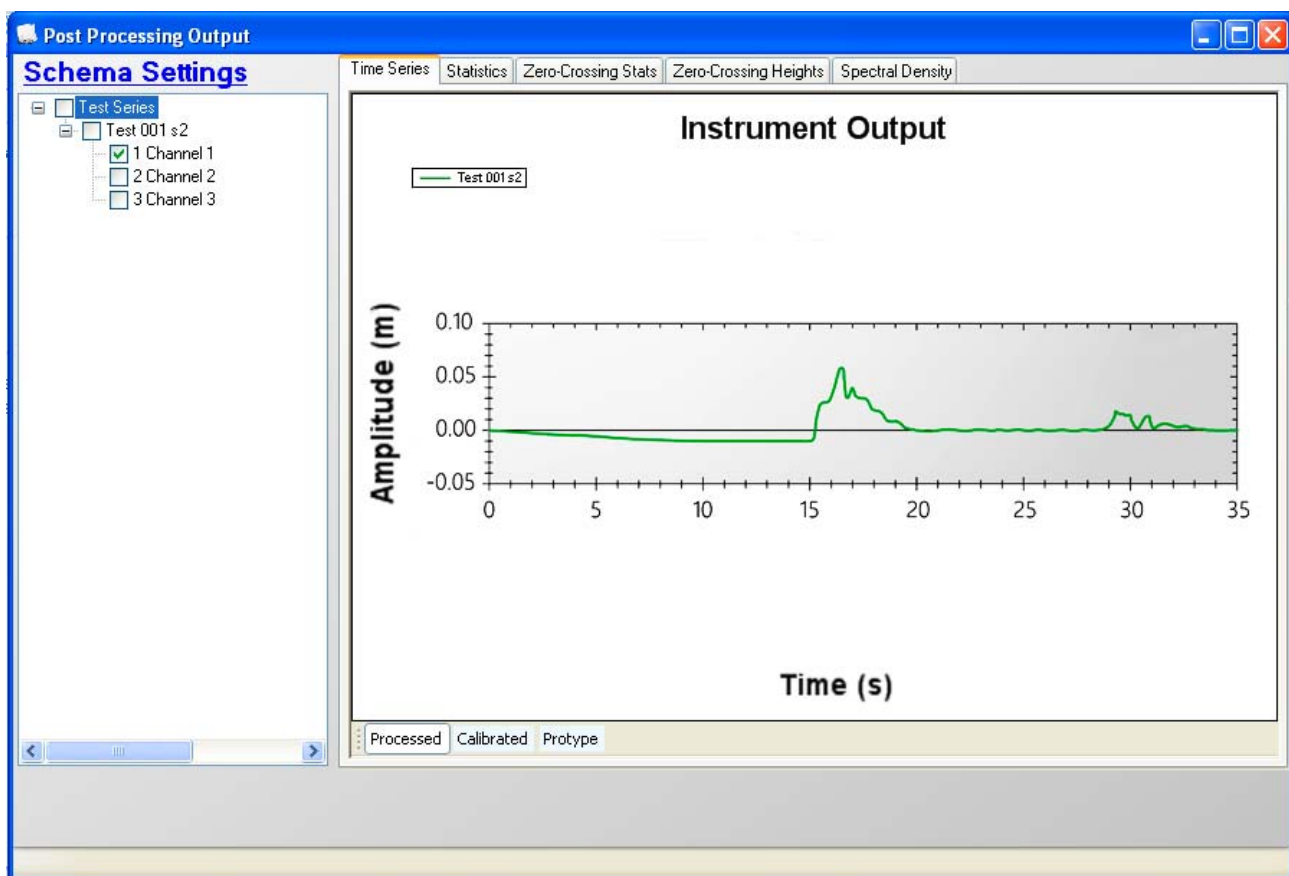


Рисунок 3.12 – Показания датчика №2. Генерация волны при глубине 5см

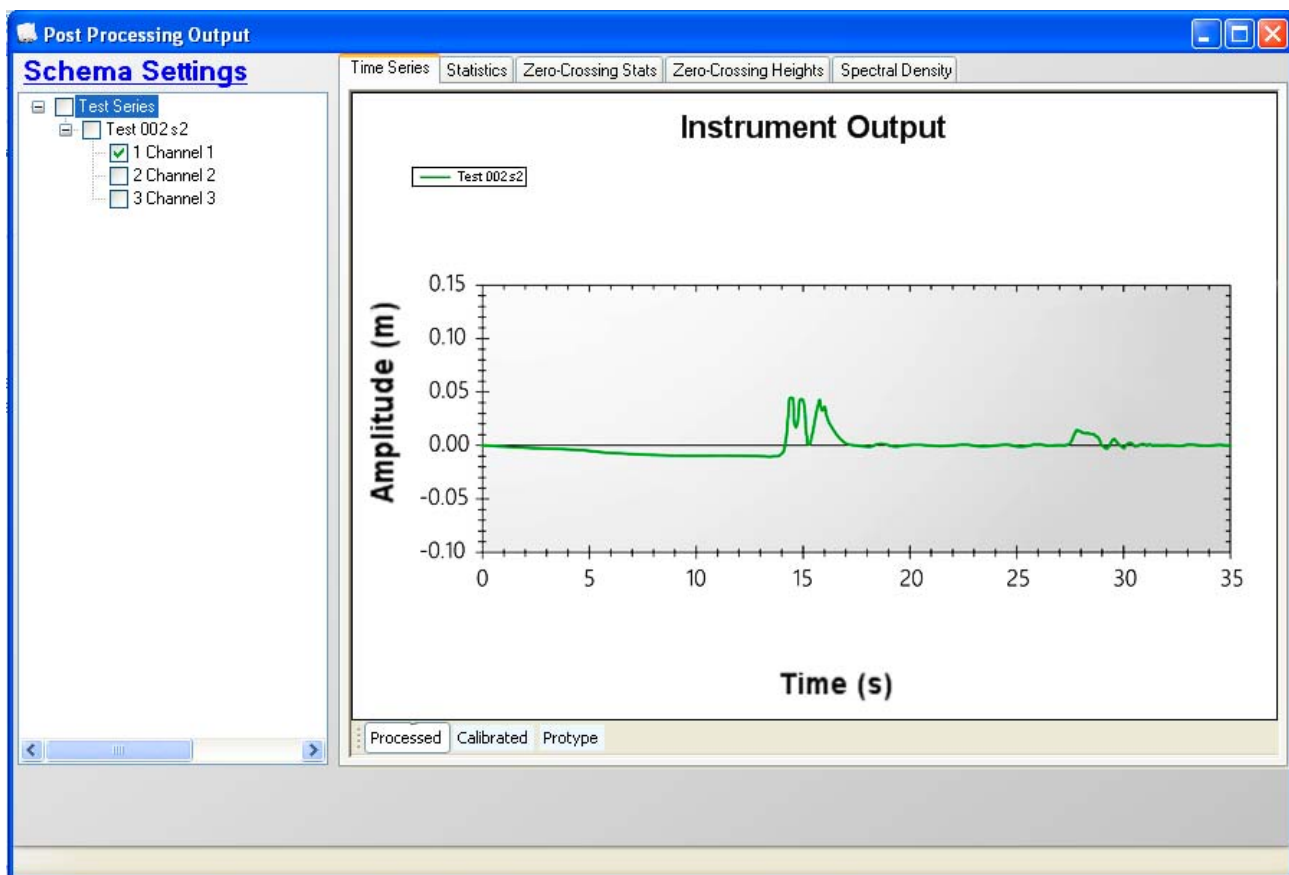


Рисунок 3.13 – Показания датчика №2. Генерация волны при глубине 10см

Результатами измерений были доказаны наблюдения в более ранних опытах, в которых проводились фотофиксации волн. Форма полученной волны при глубине 5см отличается от волны при глубине 10 см на протяжении всего цикла: формирования, прохождения, отражения и повторного отражения в гидравлическом лотке. Для более наглядного сравнения, результаты программы HR DAQ были экспортированы в формат таблиц excel, за счет чего стало возможно сопоставить показания каждого датчика для двух волн (рисунок 3.14), также представлены результаты полученных максимальных высот волн при различных глубинах воды в лотке в местах расположения датчиков волнографов (таблицы 3.3, 3.4).

Таблица 3.3. Результаты испытаний, проведенных в июне 2022 года

<b>Номер испытания</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Серия опытов №1 (глубина воды в лотке 5см). Датчик №1</b>			
Уровень воды в лотке до включения насоса (мм)	50	50	50
Уровень воды в лотке после заполнения резервуара (мм)	41	44	40
Уровень воды, полученный при генерации волны (мм)	110	105	106
Высота волны (мм)	69	61	66
<b>Серия опытов №1 (глубина воды в лотке 5см). Датчик №2</b>			
Уровень воды в лотке до включения насоса (мм)	50	50	50
Уровень воды в лотке после заполнения резервуара (мм)	40	42	40
Уровень воды, полученный при генерации волны (мм)	107	104	104
Высота волны (мм)	67	61	64
<b>Серия опытов №2 (глубина воды в лотке 10см). Датчик №1</b>			
Уровень воды в лотке до включения насоса (мм)	100	100	100
Уровень воды в лотке после заполнения резервуара (мм)	90	94	91
Уровень воды, полученный при генерации волны (мм)	145	147	152
Высота волны (мм)	55	53	61

Продолжение таблицы 3.3.

Номер испытания	1	2	3
<b>Серия опытов №2 (глубина воды в лотке 10см). Датчик №2</b>			
Уровень воды в лотке до включения насоса (мм)	100	100	100
Уровень воды в лотке после заполнения резервуара (мм)	90	94	91
Уровень воды, полученный при генерации волны (мм)	144	145	151
Высота волны (мм)	54	51	60

В результате анализа и сопоставления показаний датчиков, а также фотофиксации в ранних опытах, были сделаны следующие выводы:

- при уменьшении глубины происходит изменение формы волны. Гребень волны становится более протяженным, и сама волна становится ударной (типа - бор), данное различие хорошо заметно на участке 7-11с сопоставления показаний датчика №1, когда волна при глубине воды 5см имеет протяженный участок на самом пике, в то время как волна при глубине 10 см, сразу начинает опускаться;

- в связи с тем, что глубина воды становится меньше, также уменьшается скорость распространения волны, так как скорость цунами пропорциональна глубине воды ( $c = \sqrt{gh}$ ). Данные различия хорошо видны на промежутках 16-22с и 27-35с, сопоставления показаний датчика №1, а также на промежутках 13-20с и 27-34с, сопоставления показаний датчика №2, когда волна при большей глубине, достигает быстрее второго датчика, или отраженная волна от берега быстрее достигает первый датчик;

- так как гребень волны при меньшей глубине более протяженный при отражении волны, уровень воды не успевает опуститься как на волне при глубине 10см, а начинает сразу подниматься, это заметно на промежутке 13-17с сопоставления показаний датчика №2.

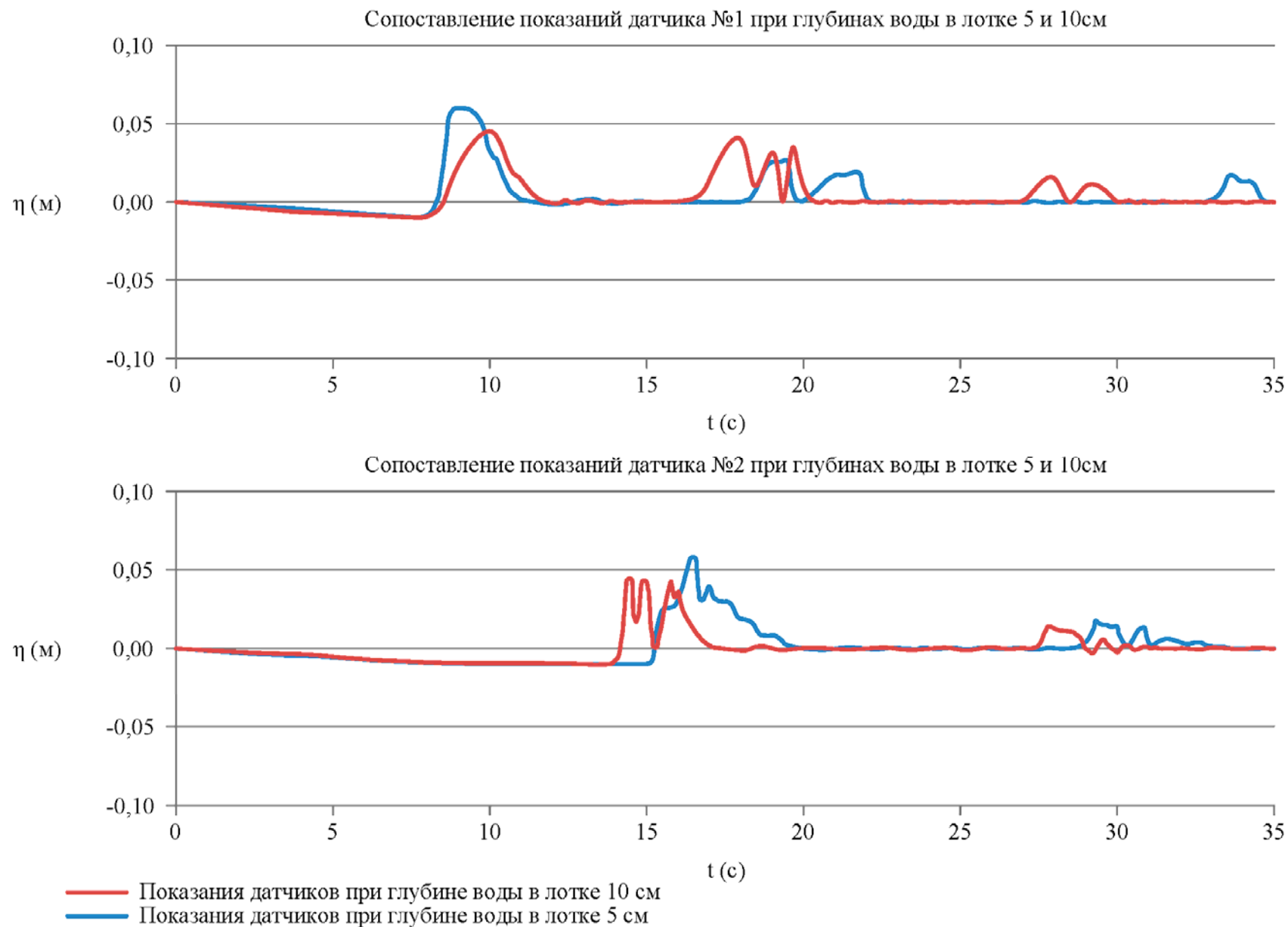


Рисунок 3.14 – Сопоставление показаний датчиков при различных глубинах

### 3.5.4 Обоснование полученных экспериментальных данных теоретическими наблюдениями

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований по изменению форм волн цунами в зависимости от изменения глубины воды, были проведены дополнительные работы по обоснованию полученных экспериментальных данных. Полученные в ходе данных работ аналитические наблюдения, объясняют различие сгенерированных волновых моделей при различной глубине воды в лотке. Цель данного параграфа соотнести знания, полученные в теории и на практике за время исследований по изучению формы волны цунами в зависимости от глубины воды и более детально объяснить полученные результаты экспериментов.

За основу был взят график зависимости скорости деформации волны  $\frac{V}{c}$  от значения локальной глубины  $\frac{h+\eta}{h}$  (или  $\frac{H_d}{h}$ ) в волне, который в своих трудах построили отечественные ученые Родин и Пелиновский [143], представленный в параграфе 3.5.2 диссертации (рисунок 3.6). На основании данного графика, можно более детально объяснить и обосновать отличия полученных волн в экспериментах при глубинах 5см и 10см, описанных в параграфе 3.5.3. Как было ранее сказано, форма волн различалась на протяжении полного цикла моделирования, от момента генерации до выхода на наклонную поверхность, этот факт, в первую очередь, был обоснован уменьшением глубины воды в лотке. Также, известным фактом является то, что скорость распространения длинных волн  $c$  уменьшается при подходе волны к берегу, однако, помимо скорости распространения, волна обладает характеристической скоростью  $V$ , которая рассчитывается по формуле (3.8), а отношение характеристической скорости к скорости распространения, согласно Родину и Пелиновскому [143], является скоростью деформации волны или, другими словами, скоростью, с которой волна цунами трансформируется в волновой ударный бор. В связи с этим, было принято решение, на основании полученных экспериментальных исследований и теоретической базы, представленной теорией длинных волн, проанализировать,

как изменяются параметры волны, такие как характеристическая скорость и скорость деформации волны при уменьшении глубины воды.

Для проведения анализа мы примем промежуток глубин воды от 5 до 10м, масштаб проводимого физического моделирования был принят 1:100, т.е. глубины 5 и 10см соответствуют в натуре 5 и 10м соответственно. Высоты волн, полученные в опытах, были идентичны, для упрощения анализа изменения скоростей, примем, что начальная высота волны была одинаковой при различных глубинах – 6м, это также обосновывается полученными результатами экспериментов в таблице 3.3, в сериях опытов 1 и 2 (показания датчика №1) получились волны одинаковой высоты 6,1см (для анализа округлим до целого значения 6см). Максимальное смещение водной поверхности при волнении  $\eta$  (м) измеряется от спокойного уровня воды и будет равняться 5м. Для более понятной динамики изменения характеристик волны при изменении глубины, разобьем промежуток глубины от 5 до 10 метров на шаг 0,5м и рассчитаем для каждой глубины значения полной глубины  $H_d$ , скорости распространения  $c$  (1.1), характеристической скорости  $V$  (3.8), скорости деформации  $\frac{V}{c}$  и локальной глубины  $\frac{H_d}{h}$ .

Полученные при расчете данные были сведены в таблицу 3.4.

На основании полученных данных были построены графики зависимости скорости деформации волны  $\frac{V}{c}$  от значения локальной глубины  $\frac{H_d}{h}$  в волне (рисунок 3.15), а также график зависимости скорости деформации волны  $\frac{V}{c}$  от глубины воды (рисунок 3.16).



Таблица 3.4. Расчетные данные анализа изменения характеристик волн при изменении глубины

№	Высота волны $H$ (м)	Максимальное смещение водной поверхности при волнении $\eta$ (м)	Глубина воды $h$ (м)	Полная глубина $Hd$ (м)	Скорость распространения $c$ (м/с)	Характеристическая скорость $V$ (м/с)	Скорость деформации волны $V/c$	Отношение полной глубины к глубине воды (локальная глубина) $Hd/h$
1	6	5	5	10	7,07	15,86	2,24	2,00
2	6	5	5,5	10,5	7,42	15,91	2,15	1,91
3	6	5	6	11	7,75	15,97	2,06	1,83
4	6	5	6,5	11,5	8,06	16,05	1,99	1,77
5	6	5	7	12	8,37	16,13	1,93	1,71
6	6	5	7,5	12,5	8,66	16,22	1,87	1,67
7	6	5	8	13	8,94	16,32	1,82	1,63
8	6	5	8,5	13,5	9,22	16,42	1,78	1,59
9	6	5	9	14	9,49	16,52	1,74	1,56
10	6	5	9,5	14,5	9,75	16,63	1,71	1,53
11	6	5	10	15	10,00	16,74	1,67	1,50

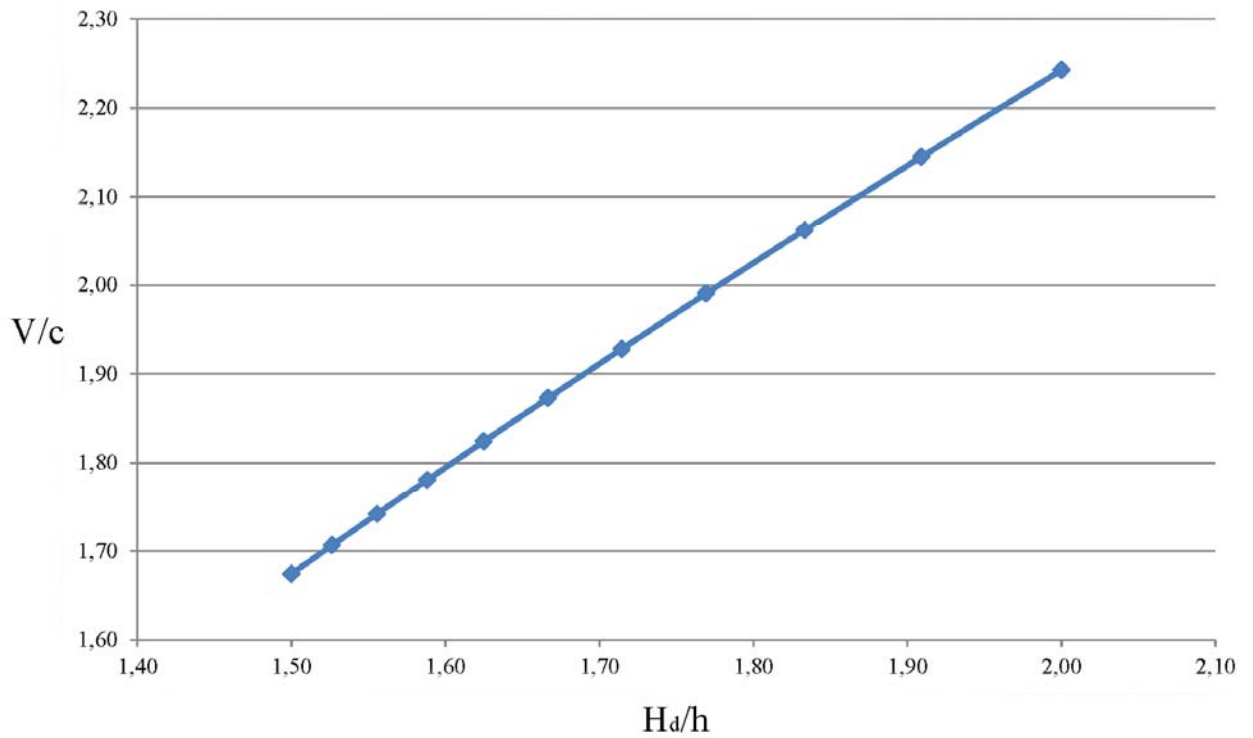


Рисунок 3.15 – График зависимости скорости деформации волны от значения локальной глубины в волне (при глубинах воды от 5 до 10м)

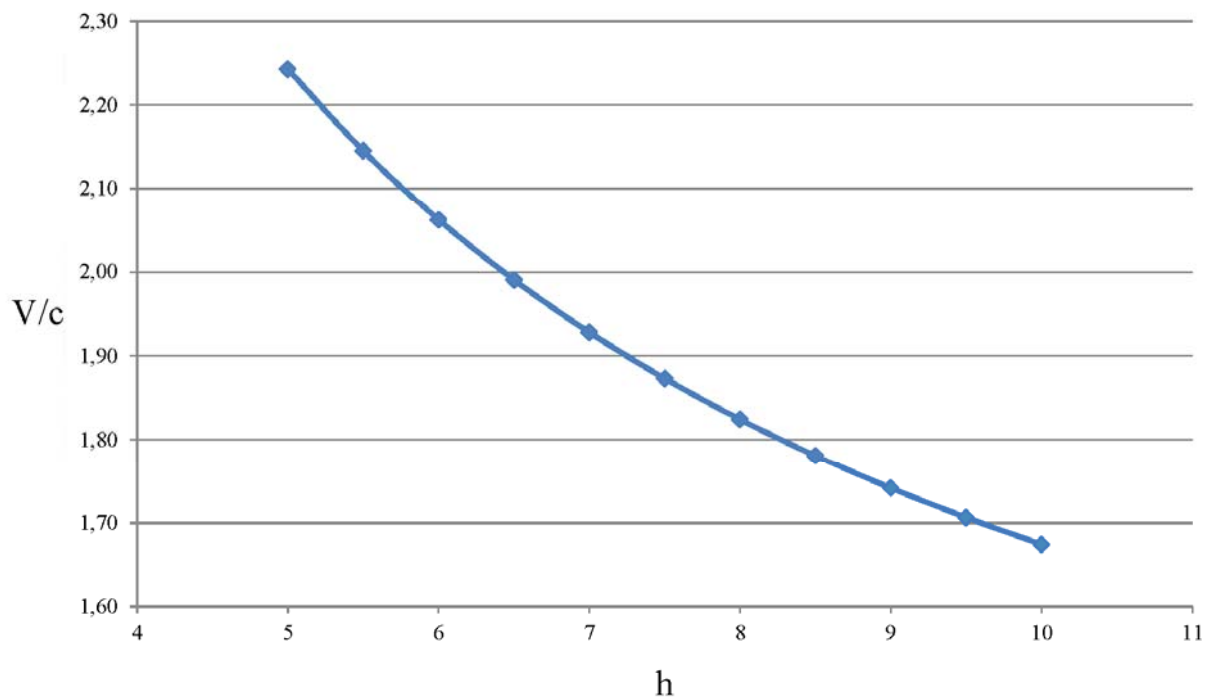


Рисунок 3.16 – График зависимости скорости деформации волны от глубины воды (на промежутке глубин от 5 до 10м)

Проведенный анализ и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- полученный график зависимости скорости деформации волны от значения локальной глубины в волне (рисунок 3.15) подтверждает теоретические аспекты, представленные Родиным и Пелиновским [143].

- полученный график зависимости скорости деформации волны от глубины воды (рисунок 3.16) объясняет различие сгенерированных волн при различных глубинах. Проведенный анализ показал, что при различных глубинах воды, волна одной и той же высоты, будет иметь различные скорости деформации, и при увеличении глубины воды скорость деформации будет уменьшаться, согласно графику на рисунке 3.16, а при уменьшении глубины воды, наоборот возрастать. Из этого следует вывод, что сгенерированные волны при глубине воды в лотке имели большую скорость деформации, которая привела к моментальной трансформации кноидальной волны в ударный волновой бор еще при формировании на выпускном сечении из резервуара, а волны смоделированные при глубине 10см, имеющие меньшую скорость деформации, доходят до наклонной поверхности кноидальной формы.

### **3.6 Исследование зависимости формы и высоты смоделированных волн от габаритов сечения воздушного клапана в экспериментальной установке**

Помимо влияния глубины воды на форму полученных волн, также есть еще один фактор, который может повлиять на генерируемые волны – это воздушный клапан в резервуаре, через который разрывается вакуум во время эксперимента. Увеличение габаритов сечения клапана, приведет к большему одновременному попаданию воздуха в бак, что повлияет на формирование волны на выходе из резервуара.

Площадь стандартного первоначального клапана, который использовался в предыдущих опытах, составляла 3,5 см<sup>2</sup>. Для серии опытов специально были подготовлены дополнительные резервуары с увеличенными сечениями клапанов.

В сентябре 2022 года, были проведены дополнительные 3 серии опытов по исследованию зависимости формы полученных волн от габаритов сечения клапана, через который поступает воздух в резервуар во время эксперимента:

- резервуар №1, площадь сечения клапана – 3,5 см<sup>2</sup>, глубина воды в лотке – 10см;

- резервуар №2, площадь сечения клапана – 7 см<sup>2</sup>, глубина воды в лотке – 10см;

- резервуар №3, площадь сечения клапана – 10,5 см<sup>2</sup>, глубина воды в лотке – 10см.

Также, как и в предыдущем опыте была использована часть гидравлического лотка, равная 5м (4 секции). Для фиксации результатов был установлен датчик волнограф на расстоянии 0,35м (датчик №1) от генератора волн, связанный с компьютером, на котором установлено программное обеспечение для сбора и обработки данных HR DAQ.

Для сравнительного анализа полученных форм волн в зависимости от габаритов клапана были получены временные ряды. Представлен скриншот программы HR DAQ, на котором в одном графике, включены записи водной поверхности при трех различных клапанах (рисунок 3.17).

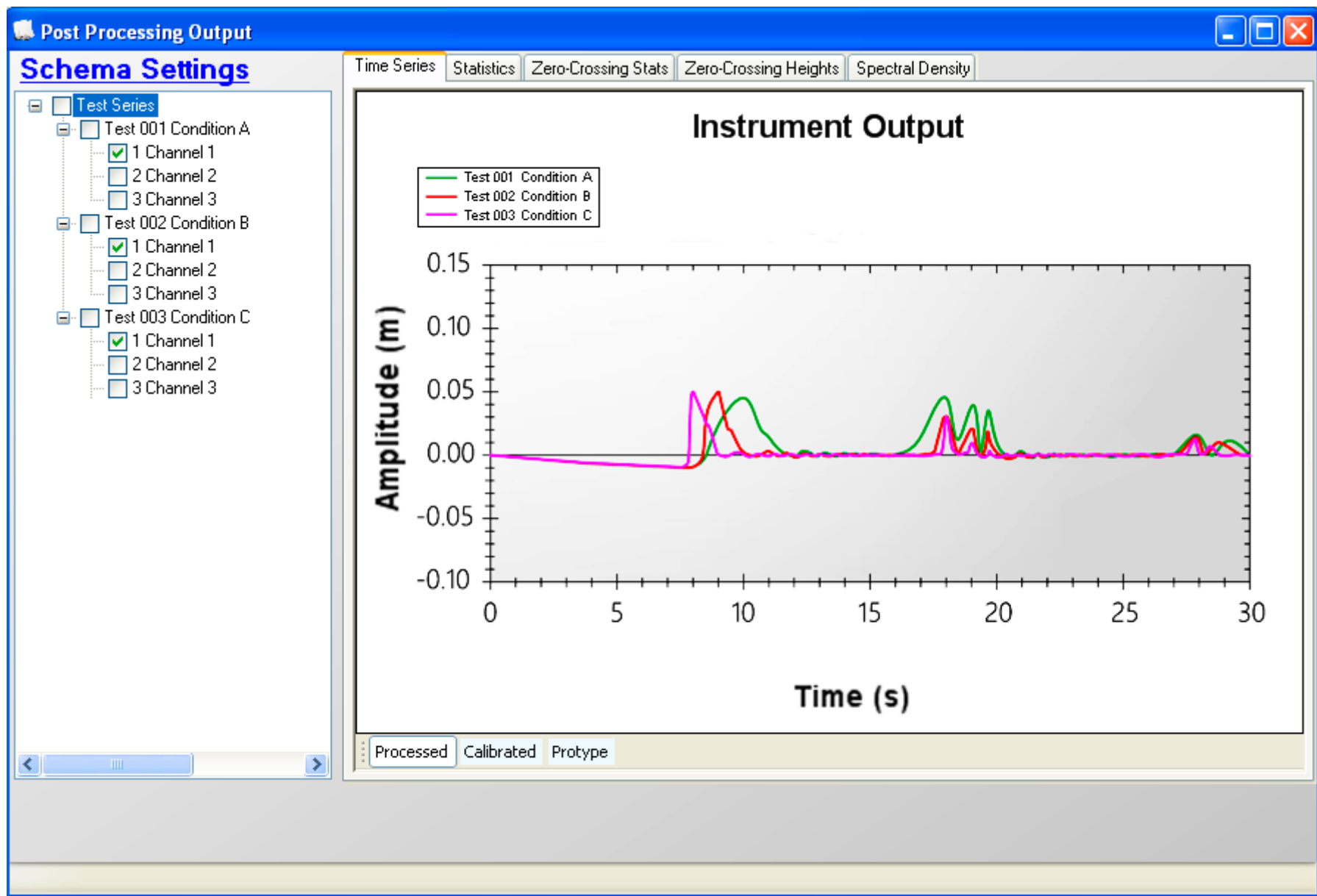


Рисунок 3.17 – Записи водной поверхности при трех различных клапанах

При сравнении и анализе временных рядов, полученных при записи датчика:

- при увеличении площади клапана, волновой профиль становился более крутым. Так при первом случае, когда площадь сечения клапана была равна 3,5 см<sup>2</sup>, гребень волны сформировался на временном промежутке от 7,5 до 12с, при увеличении площади клапана в два раза, сформированный гребень был в промежутке от 7,5 до 10,5с, а при увеличении в 3 раза, временной промежуток была с 7,5 до 9с. При этом формирование волны во всех трех случаях началось в одно и тоже время 7,5с;

- чем более крутой был сформированный гребень волны, тем более мелкими получались отраженные волны, в связи с более быстрым затуханием волны. Так отраженная волна при наименьшей площади сечения клапана получилась высотой 4см, а при наибольшем по площади сечении получилась около 2,5см.

### **3.7 Исследование эффекта отражения смоделированных волн**

Также было проведено исследование влияния отражения на генерацию последующих N-волн. В декабре 2022 года были проведены серии опытов, в которых были рассмотрены эффекты отражения, от откоса, имитирующего берег, а также повторные отражения от волнового генератора. На данном этапе была задействована практически вся длина гидравлического лотка – 11м. Датчик волнограф был установлен на расстоянии 2м от волнового генератора, глубина воды в гидравлическом лотке была установлена 10см. Для получения более крупных отраженных волн Береговой откос был установлен под более крутым углом 60°.

При одинаковой глубине воды были реализованы 2 серии опытов по 3 волны, первая волна в каждой серии моделировалась при начальных условиях невозмущенной поверхности, вторая волна воспроизводилась в условиях отражения первой волны от берегового откоса и была сгенерирована, третья волна была смоделирована в условиях повторного отражения от волнового генератора. Записи программного обеспечения HR DAQ, были экспортированы в excel, и в результате было проведено сопоставление показаний на 6

сгенерированных волнах (рисунок 3.18), высоты полученных волн были собраны в одну таблицу (таблица 3.5).

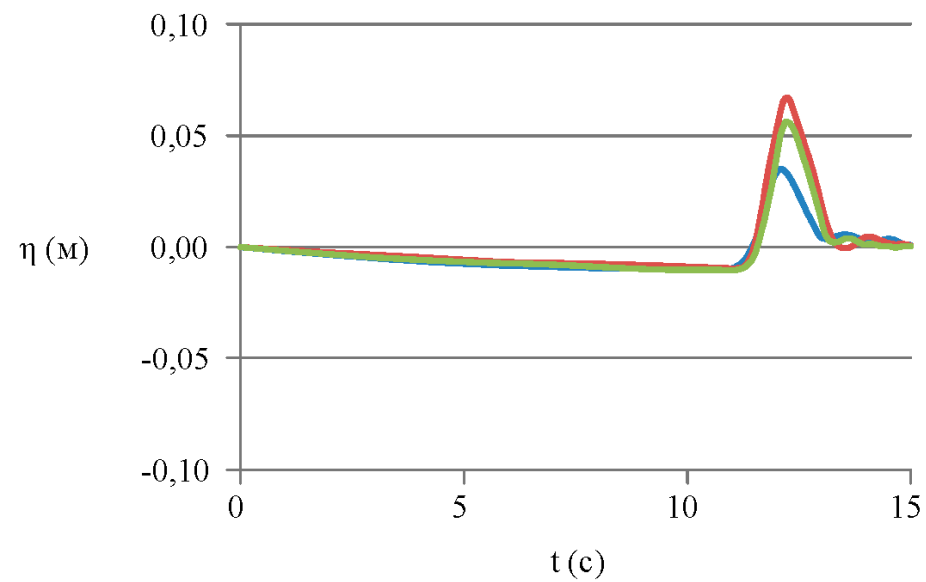
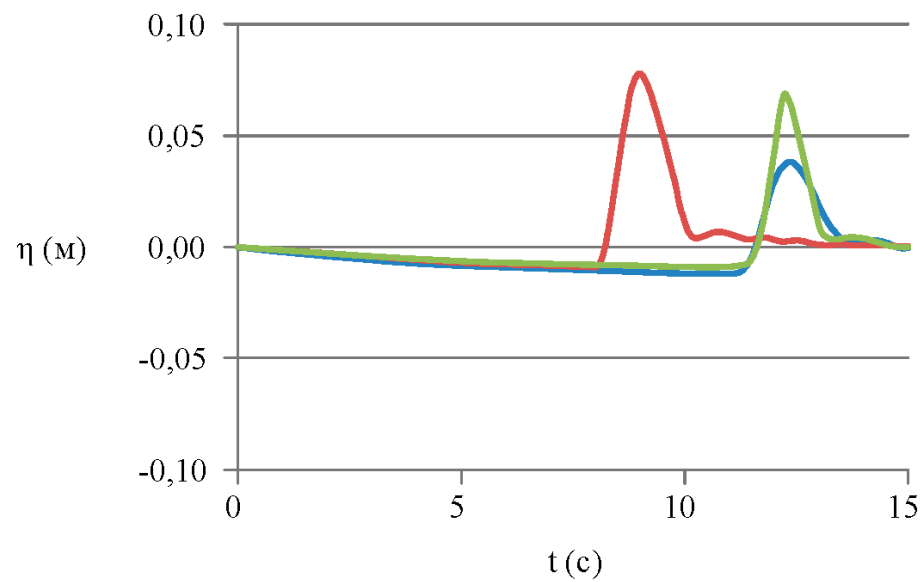
Таблица 3.5. Результаты опытов по моделированию волн в условиях отражения от берегового откоса и повторного отражения от волнового генератора

Серия опытов	№1	№2
Высота волны при начальных условиях невозмущенной поверхности (мм)	50	45
Высота волны воспроизведенной в условиях отражения первой волны от берегового откоса (мм)	87	77
Высота волны воспроизведенной в условиях повторного отражения от волнового генератора (мм)	78	67

На основании сопоставления результатов 2 серий опытов по 3 волны были сделаны следующие выводы:

- проведенные опыты показали важность отражения волн от береговых откосов и волнового генератора. Наиболее высокие смоделированные волны получились в условиях отражения от береговых откосов, в связи с тем, что происходило столкновение с первичной отраженной волной. Также следует отметить, что при столкновении волн, моделируемая волна теряет энергию, но при этом в месте где происходит столкновение волн, высота значительно возрастает, что в реальных условиях может быть опасным для судов, находящихся в зоне действия волн цунами.

- в первой серии опытов, вторая волна (в условиях отражения от береговых откосов) была смоделирована быстрее двух остальных волн, это видно по результатам записи датчиков на рисунке 3.18, в связи с более ранним открытием воздушного клапана в экспериментальной установке, еще до того как резервуар был полностью наполнен водой. Решение раньше открыть воздушный клапан, было обусловлено тем, чтобы вторая волна успела дойти до места расположения датчика, где произойдет столкновение с отраженной волной. Во второй серии опытов был учтен данный недочет по времени начала моделирования последующих волн и поэтому все три волны доходили до места расположения датчика приблизительно за одно время.



- Первоначальная волна
- Волна в условиях первого отражения от берега
- Волна в условиях повторного отражения от генератора

Рисунок 3.18 – Сопоставление показателей датчиков при моделировании в условиях отражения от берега и повторного отражения от волнового генератор



### **3.8 Опыты по моделированию цунами от оползней**

#### **3.8.1 Общие сведения о моделировании цунами методом скользящего блока**

Оползневые цунами (или как их еще называют импульсные волны), это одиночные волны (солитоны), которые, как правило, вызваны такими явлениями как оползни, камнепады, береговая нестабильность или ледник, попадающий в водоем. Наиболее разрушительными примерами таких волн, является случай в заливе Литуйя 1958 года, когда цунами от оползня уничтожило лес до высоты 524 м над средним уровнем воды [21, 159], и случай в Вайонте 1963 года в Северной Италии, когда импульсная волна превысила дамбу более чем на 70 м и привела к, примерно, 2000 жертвам [87, 160]. Многие другие примеры оползневых цунами и импульсных волн обобщены Слингерландом и Войтом [161], которые рассматривают случаи во всем мире, Хубером [162], который фокусируется на событиях в Швейцарии, и Паниццо и др [163]. Эти обзоры напоминают о том, как часто возникают такие волны, особенно в горных странах, фьордах и на вулканических островах.

Физическое моделирование оползневых цунами [164, 165, 166, 167], а также и численные исследования [168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175], необходимы для оценки опасности данных волн.

Одними из самых распространенных исследований физических моделей использует либо модель твердого блока (рисунок 3.19) [87, 166, 175, 176, 177, 178], либо модель, с гранулированным материалом (рисунок 3.20) [90, 91, 92, 165, 167, 179]. Оба способа имеют свое обоснование, поскольку в природе наблюдается большое разнообразие типов массового движения, включая скольжение, течение, падение, опрокидывание и распространение [87, 180].



Рисунок 3.19 – Моделирование оползневого цунами методом твердого блока в Имперском колледже Лондона (адаптировано из [87])



Рисунок 3.20 – Использование грунта для создания одиночной волны в Орегонском государственном университете (адаптировано из [90])

Исследования в области физического моделирования оползневых цунами показали, что твердые блоки генерируют более крупные волны, чем при использовании грунта [87, 181]. Основываясь на обзоре литературы, Слингерленд и Войт [161] установили, что 2-мерные вертикальные тесты с коробкой от Noda [182] генерируют в четыре раза большие волны по сравнению с 3-мерными тестами, в которых использовались мешки, наполненные железом и свинцом. Однако большая часть этого различия может быть объяснена эффектом геометрии водоема, а не модели [87, 182]. Атайе-Аштиани и Никха [183] обнаружили, что грунтом генерируются до 35% меньшие амплитуды волн и до 30% большие

периоды волн, чем блоком в волновом канале, который по ширине превышает ширину блока. Цвейфель [184] генерировал импульсные волны, как с блоками, так и с гранулированным материалом (стекло). Он наблюдал в 7,4 раза большие амплитуды волн, генерируемых твердыми блоками, чем гранулированными материалами [87, 184]. На основании проведенных исследований в данной области можно сделать вывод, что при моделировании твердым блоком, получаются более крупные волны, чем при использовании гранулированного материала.

При проведении опыта, на характеристики моделируемой волны, влияют следующие характеристики установки:

- масса и габариты блока;
- наклон поверхности;
- габариты и материал наклонной поверхности;
- глубина воды в лотке;
- коэффициент трения поверхности.

### **3.8.2 Проведение серии опытов с изменением угла наклона поверхности, по которой опускается блок**

Разработанный универсальный генератор волн типа цунами, помимо моделирования волн, вызванных сейсмическими активностями, также позволяет моделировать оползневые цунами. Во время эксперимента в гидравлический лоток опускается наклонная поверхность, которая соединена с резервуаром и по которой сползает твердый блок в воду.

В июне 2022 года, сразу после проведенных серий опытов по изучению форм волн цунами сейсмического происхождения, была проведена серия опытов по моделированию оползневых цунами (рисунок 3.21) с изменением угла наклона поверхности, по которой соскальзывает блок в воду.



Рисунок 3.21 – Проведение эксперимента по моделированию оползневых цунами в июне 2022 года

Было проведено три серии опытов:

- наклонная поверхность, расположена под углом  $30^\circ$  по отношению к поверхности дна лотка, глубина воды 10см;
- наклонная поверхность, расположена под углом  $45^\circ$  по отношению к поверхности дна лотка, глубина воды 10см;
- наклонная поверхность, расположена под углом  $60^\circ$  по отношению к поверхности дна лотка, глубина воды 10см.

Для сопоставления полученных результатов, представлен скриншот программы HR DAQ с полученными временными рядами для трех смоделированных волн полученных при установленном наклоне поверхности  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  (рисунок 3.22).

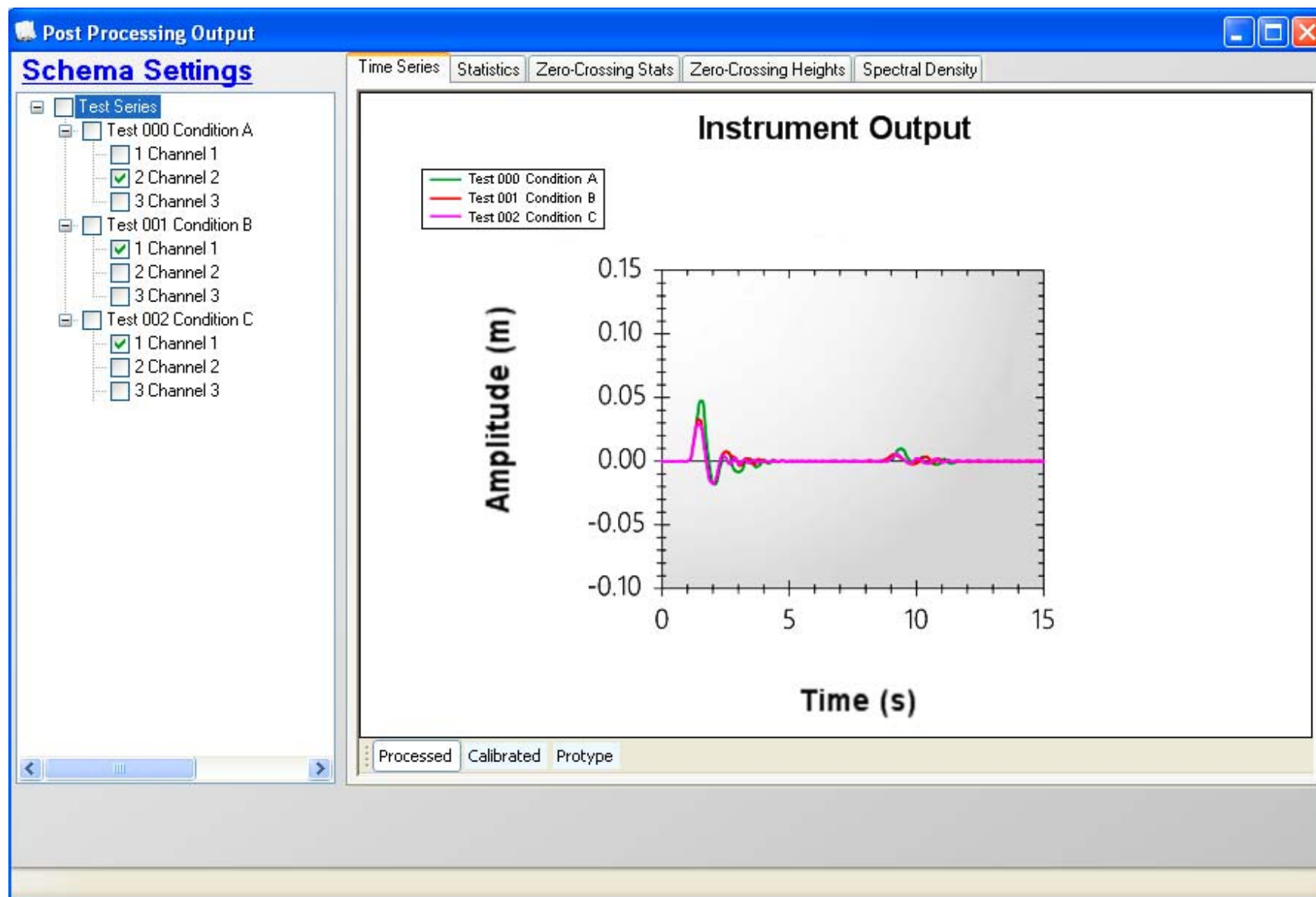


Рисунок 3.22 – Записи водной поверхности при трех различных углах наклонной поверхности по которой сползает блок

Для эксперимента было использовано 4 секции лотка, общей длиной 5м, фиксация производилась датчиком волнографом (датчик №1), расположенным на расстоянии 0,35м, от основания наклонной поверхности, опущенной в воду. Во всех трех сериях использовался один и тот же твердый блок, габаритами 18x15,5x9см, весом 1кг.

Проанализировав результаты, были сделаны следующие выводы:

- благодаря проведенным опытам была проверена методика моделирования оползневых цунами;

- чем больше угол наклона поверхности, тем меньше высота смоделированной волны. Так при угле наклона  $30^\circ$ , получилась волна высотой 4,9см, при  $45^\circ$  – 3,2см, а при  $60^\circ$  - 2,8см. Это можно объяснить тем, что при меньшем угле, блок движется более по направлению движения волны и при соприкосновении с водой приводит большую массу воды в движение;

- после прохождения основной волны, уровень на какое-то время еще совершает колебательные действия, это происходит за счет того, что при ударе блока об воду, происходит всплеск и помимо сформированной основной волны, распространяющейся вдоль лотка, появляется более мелкая волна в противоположном направлении к наклонной поверхности, которая сразу отражается от нее.

### **3.8.3 Сравнение полученных результатов с моделями волн, вызванных сейсмической активностью**

Результаты, полученные при моделировании оползневых цунами (солитонов), были экспортированы в excel и сопоставлены с результатом, полученных волн сейсмического происхождения (N-волн). Представлено сопоставление показаний датчиков (рисунок 3.23) при моделировании модели N-волны (с помощью вакуумного насоса и резервуар) и одиночной волны (метод скользящего блока).

Сопоставление показаний датчиков при моделировании  
N-волны и одиночной волны (глубина воды в лотке 10 см)

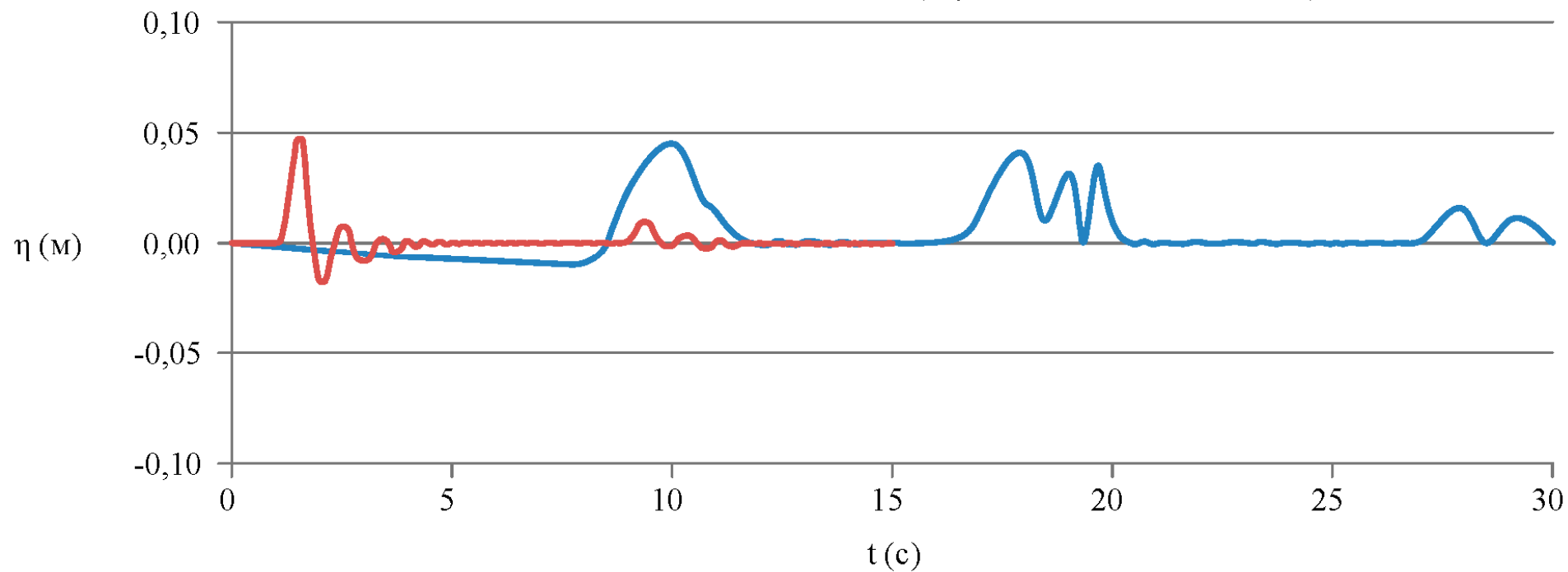


Рисунок 3.23 – Сопоставление показаний датчиков при моделировании N-волны и одиночной волны

Обе волны сгенерированы, сконструированным универсальным генератором волн типа цунами различной формы, который различными методиками воспроизвел данные волны.

Проведя анализ сопоставления полученных данных различных по форме волн, были сделаны следующие выводы:

- экспериментально доказано различие одиночной волны и N-волны. Основное отличие заключается в том, что, как было показано в теории, N-волны начинаются с впадины, которая хорошо видна на промежутке от 0 до 8с, в то время как, одиночная волна начинается сразу с повышения уровня воды, как видно на промежутке 0 до 1,5с. Также стоит отметить, что впадина в одиночной волне происходит уже после гребня, когда в N-волнах, за гребнем уровень воды возвращается в спокойное положение;

- различные способы генерации сказываются на временных рядах, так для формирования N-волны потребовалось больше времени с начала ведения записи датчика, когда происходило формирование впадины, за счет работы вакуумного насоса. В то время, как солитон получился в первые секунды, путем быстрого соскальзывания твердого блока по наклонной поверхности в воду;

- при отражении N-волн, получаются более крупные волны, чем при одиночных, это можно объяснить более ранним затуханием солитона, а также потерях на незначительных колебаниях уровня, следующих за одиночной волной. Так при моделировании N-волны отраженные волны достигают 4,2см, когда отраженная одиночная волна составила около 1см.



### **3.9 Сравнение полученных результатов с реальными записями волн цунами и смоделированными волнами отечественных и зарубежных исследований**

#### **3.9.1 Сравнение полученных моделей волн цунами, вызванных землетрясением с реальными записями волн**

Для подтверждения и анализа сходства формы смоделированных N-волн, в ходе исследований было проведено сопоставление волн с реальными цунами, для этого были проанализированы записи реальных волн.

В качестве первого примера было принята волна цунами, которая обрушалась на побережье Никарагуа и Коста-Рики, 2 сентября 1992 года. Цунами было вызвано землетрясением, магнитудой 7 баллов по шкале Рихтера [185]. Высота волны, в некоторых местах, достигла до 9м, средняя высота варьировалась от 2-8м. Недалеко от городов Коринто и Пуэрто-Сандино были расставлены датчики, фиксирующие приливы, которые смогли записать изменение уровня воды во время произошедшего цунами. Ущерб от цунами, был зафиксирован двумя различными международными группами и в обоих случаях были представлены доказательства о форме волны цунами с опережающим понижением уровня воды (волны депрессии или LDN волны). Японские ученые в своих работах представили предварительную оценку профиля поверхности волны в Коринто для трех различных периодов нарастания (рисунок 3.24) [114, 115, 186].

Следует отметить, что в рисунке, представленном в статье [114] была выявлена опечатка, связанная с измеренным уровнем воды (на рисунке обозначен как «water level»). Согласно представленной в статье [114] оценке профиля цунами 1992 года, высота замеренной волны в Коринто составляла максимально 0,12м, что не соответствовало другим источникам, описывающим данное цунами. В соответствии с работой японского ученого Kenji Satake [187] максимальная амплитуда волны, зарегистрированная в Коринто, составила не менее 117см, также данный факт был подтвержден в работе В. Higman и J. Bourgeois [188], в

которой представлена запись датчика волнографа в Коринто, записавшего цунами в 1992 году, высота основной волны также в районе 117-120см. На основании проанализированных работ [187, 188], был сделан вывод, что на изображении в статье [94] вместо 0,11м, должен быть максимальный уровень воды 1,2м. Данная опечатка была исправлена на рисунке 3.24, представленного в диссертации.

В качестве второго примера представлена работа отечественного ученого Цукановой Елизаветы Сергеевны [189] по изучению Окуширского цунами, произошедшего 12 июля 1993 года. Волна была вызвана землетрясением, магнитудой 7.7 баллов, и обрушилась на побережья России, Японии и Южной Кореи. Цунами затопило большую часть города Окушири, который на тот момент, имел цунами-защитные сооружения. Представлен график сравнения существующей записи цунами и численного моделирования (рисунок 3.25) [189].

Для сопоставления с данными существующими волнами, представлена запись двух получившихся в результате экспериментов сгенерированных волн в лотке, при глубине воды 5 и 10см (рисунок 3.26).

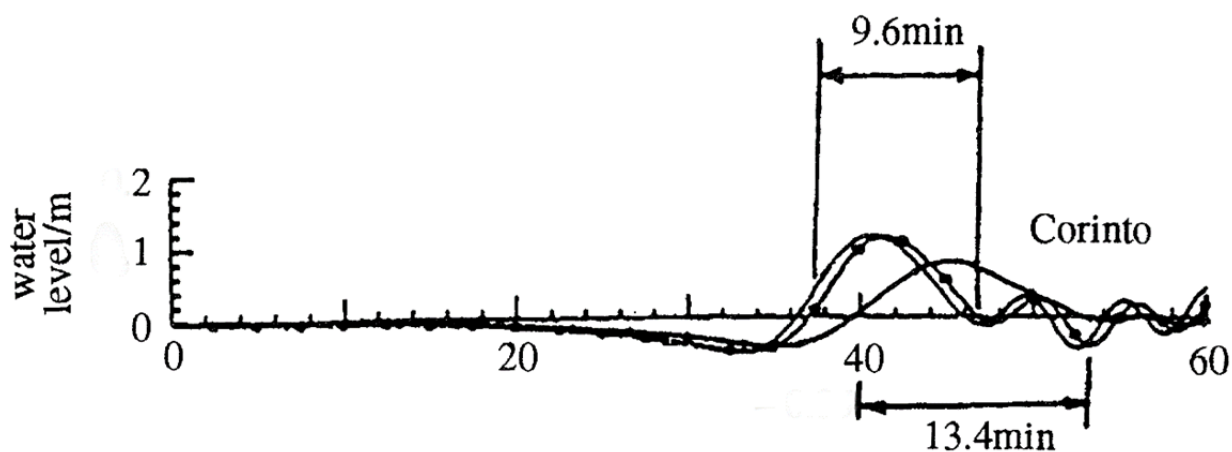


Рисунок 3.24 – Оценка профиля поверхности воды в Коринто во время цунами 1992 года (адаптировано из [114])

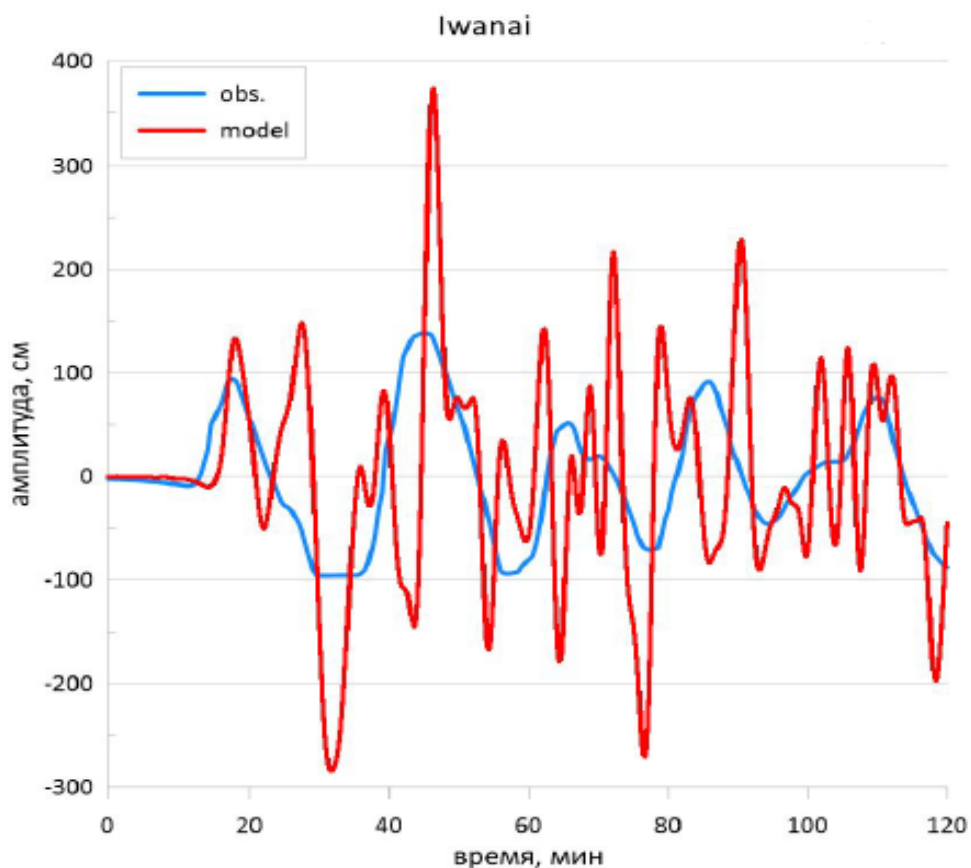


Рисунок 3.25– График сравнения существующей записи Окуширского цунами и численного моделирования [189]

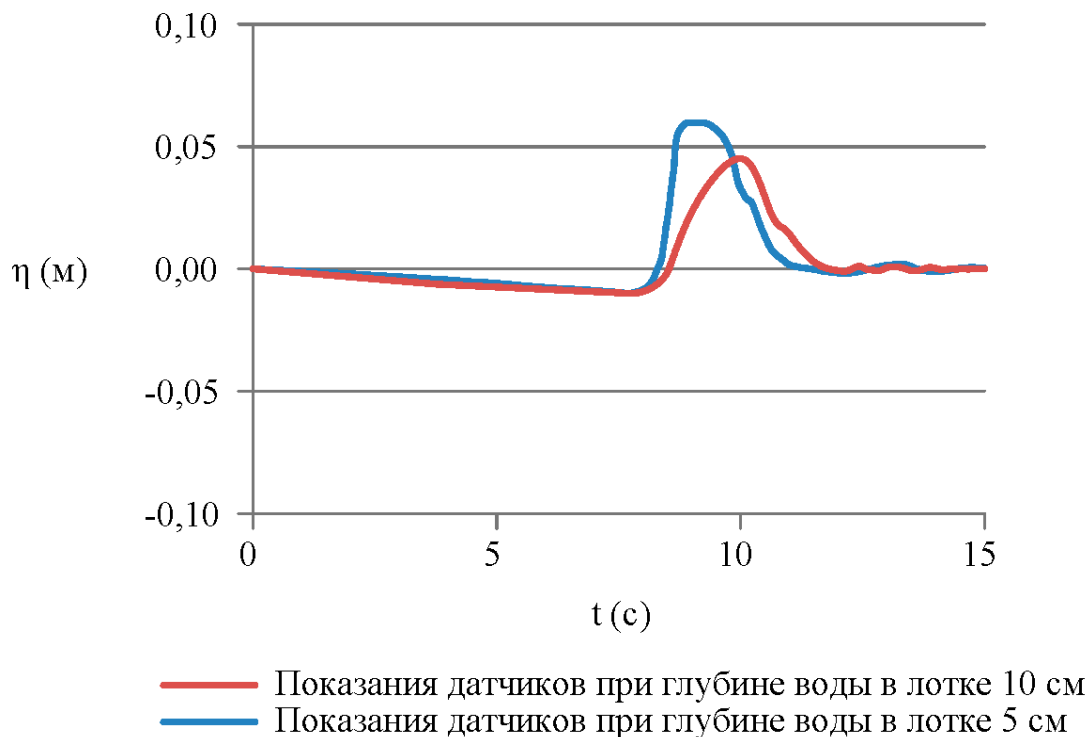


Рисунок 3.26 – Сгенерированные волны в НИУ МГСУ при глубине 5 и 10см

Проведя сопоставление существующих волн с полученными волнами при испытаниях в НИУ МГСУ, можно сделать вывод, что формы волн подобны. Основная отличительная черта всех сравниваемых волн, это изначальное понижение уровня воды (впадина), за которым следует гребень волны; данные волны были представлены в работах Tadepalli, S., Synolakis, C. E., Alsop W. [97, 98, 99, 100, 101, 114, 115] и носят название, как ранее было отмечено, N-волны LDN типа или волны депрессии. Такие волны исключительно появляются во время сейсмических активностей морского дна. Исходя из этого, подтверждено, что универсальный генератор волн типа цунами различной формы может воспроизводить модели цунами волн, вызванных сейсмической активностью (N-волны).

### **3.9.2 Сравнение полученных моделей волн цунами, вызванных оползнями со смоделированными волнами отечественных и зарубежных исследований**

Для подтверждения и анализа сходства формы смоделированных оползневых цунами, был произведен поиск записей реальных волн, однако в открытых источниках не было найдено записей оползневых цунами, как было при сопоставлении N-волн, описанных ранее. Для проведения сопоставления полученных моделей оползневых цунами, было принято решение рассмотреть работы по физическому моделированию цунами от оползней в отечественных и зарубежных исследованиях.

В качестве первого примера были приняты результаты физического моделирования цунами на озере Аксья (Lake Askja), произошедшего 21 июля 2014 году [190]. Волна цунами была сформирована в результате схода крупной каменной лавины на юго-восточном берегу озера. Высота, с которой сошла лавина, располагалась в диапазоне от 150 до 370 метров, а длина откоса составляла 800 метров, объем сошедшего оползня оценивается 203 106 м<sup>3</sup>, из которых 103 106 м<sup>3</sup> осталось в озере и привело к повышению уровня воды более чем на полметра, длина береговой полосы, на которой воздействовал оползень

составляла около 550м, вертикальный накат, образовавшегося цунами, во многих местах, составил несколько десятков метров [190]. Физическое моделирование данной волны цунами было произведено группой ученых из Австрии, Норвегии, Франции и Исландии [191]. В своем исследовании они использовали метод соскальзывающего по наклонной поверхности грунта, как и в университете штата Орегон, о котором было сказано ранее [90, 91, 92]. Результатами проведенного физического моделирования, стали сгенерированные модели цунами на озере Аксья, высотой до 20см включительно [191], один из профилей полученных волн представлен на рисунке 3.27.

В качестве второго примера были приняты результаты численных и физических исследований по моделированию солитонов в Ганновере (Германия), проведенных группой ученых из России, Эстонии и Франции [192, 193]. В своей работе они рассмотрели длинные одиночные волны положительной полярности [192, 193], данный тип волн соответствует солитонообразным волнам, образованным в результате оползней. Эксперименты были проведены в большом волновом лотке с постоянной глубиной 3,5м, длиной 251м и наклонной поверхностью, имитирующей берег, длиной 100м, сгенерированные волны получились высотой до 10 см, а накат волн на берег составлял в высоту до 30см (рисунок 3.28) [192, 193].

Также, дополнительно были взяты в качестве примеров результаты физического моделирования, которые описали в своих работах V. Heller и др.[87](рисунок 3.29) и R. P. Mulligan [194] (рисунок 3.30). V. Heller провел основательные исследования по моделированию волн с помощью метода скользящего блока [87] и метода соскальзывающего грунта [195]. В работе по исследованию моделирования волн методом скользящего блока, в общей сложности было проведено 144 испытания с различными по характеристикам блоками при систематическом изменении трех важных параметров модели блока: числа Фруда, относительной толщины блока и относительной массы [87]. R. P. Mulligan и др. в своей работе описывали сопоставление экспериментальных исследований, проведенных в гидравлическом лотке Королевского университета

в Кингстоне (Queen's University at Kingston), габаритами 33,8x2,1м и численных исследований, основанных на методе конечных элементов частиц (Particle Finite Element Method (PFEM))[194]. Одной из особенностей экспериментальных исследований, проведенных R. P. Mulligan и др. [194], является соскальзывающий материал, в качестве которого была принята обычная вода.

Для сопоставления с данными полученных волн в зарубежных и отечественных исследованиях, представлена запись волн, полученных в результате экспериментов в НИУ МГСУ по моделированию оползневых цунами при различных углах наклонной поверхности о которых было написано в параграфе 3.8.2 (рисунок 3.31).

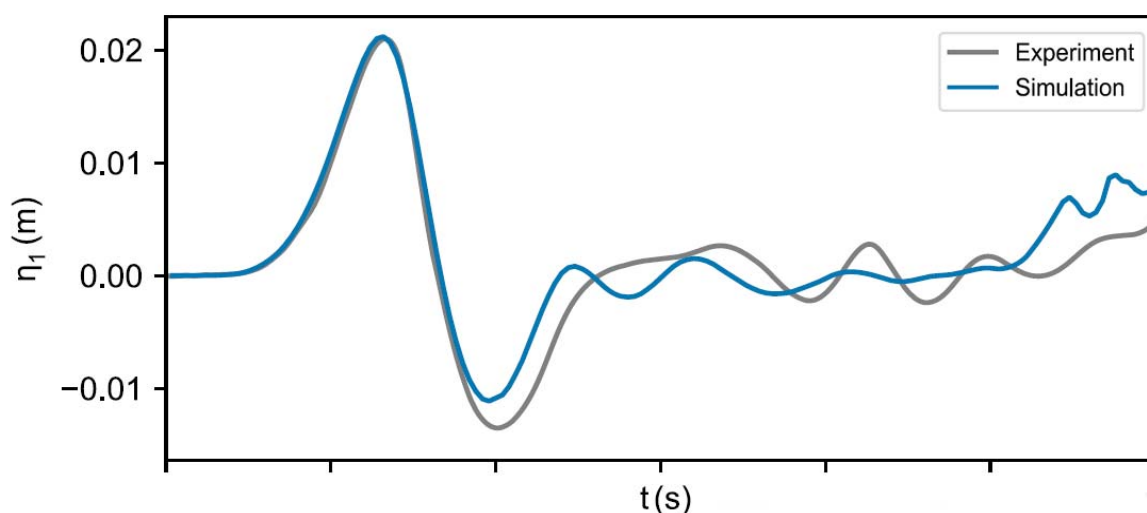


Рисунок 3.27 – Запись модели волны цунами на озере Аксья методом соскальзывающего грунта (адаптировано из [191])

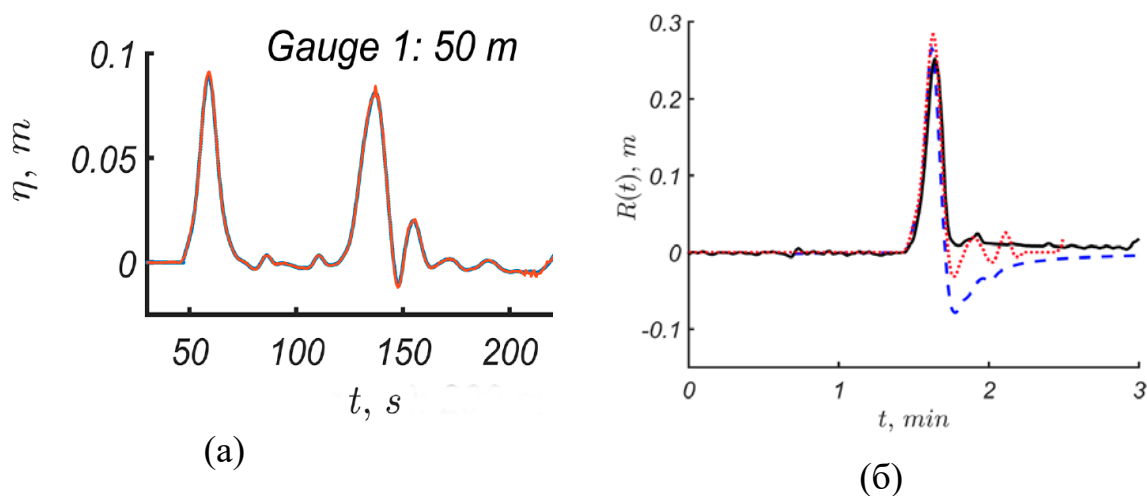


Рисунок 3.28– Результаты физических исследований по моделированию солитонов в Ганновере [192]: а – запись модели волны, распространяющейся в лотке, б – запись наката волны на береговой откос

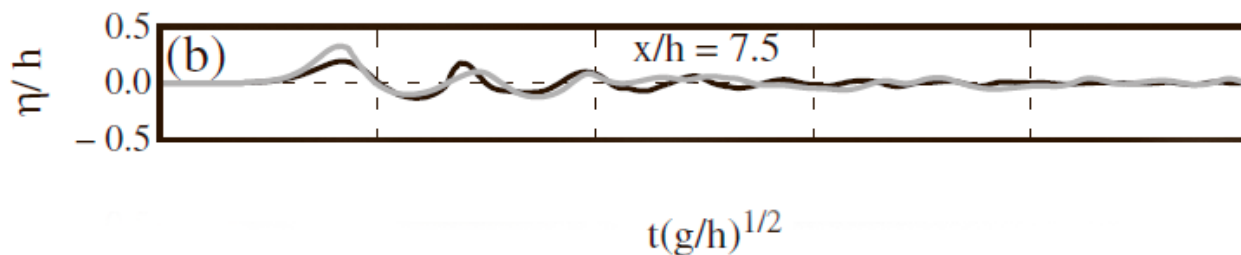


Рисунок 3.29 – Запись смоделированных волн методом скользящего блока (адаптировано из [87])

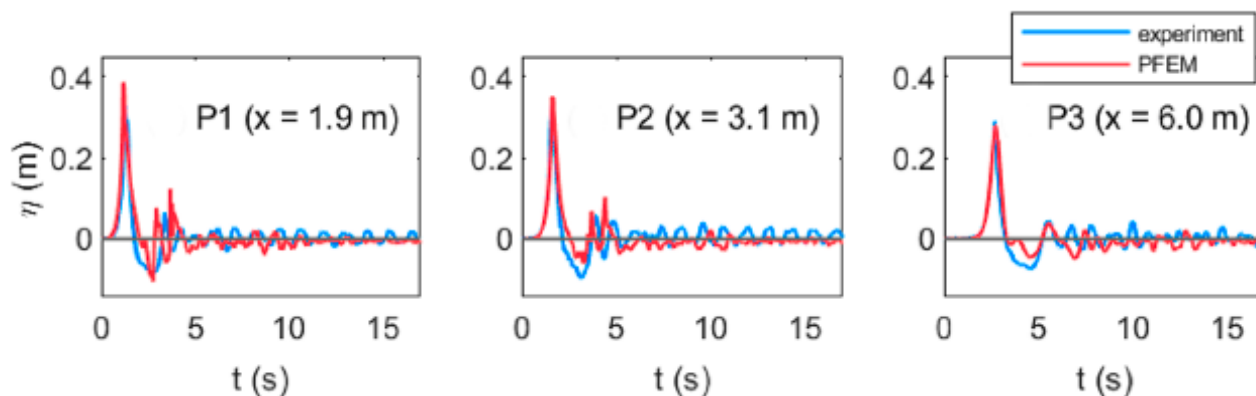
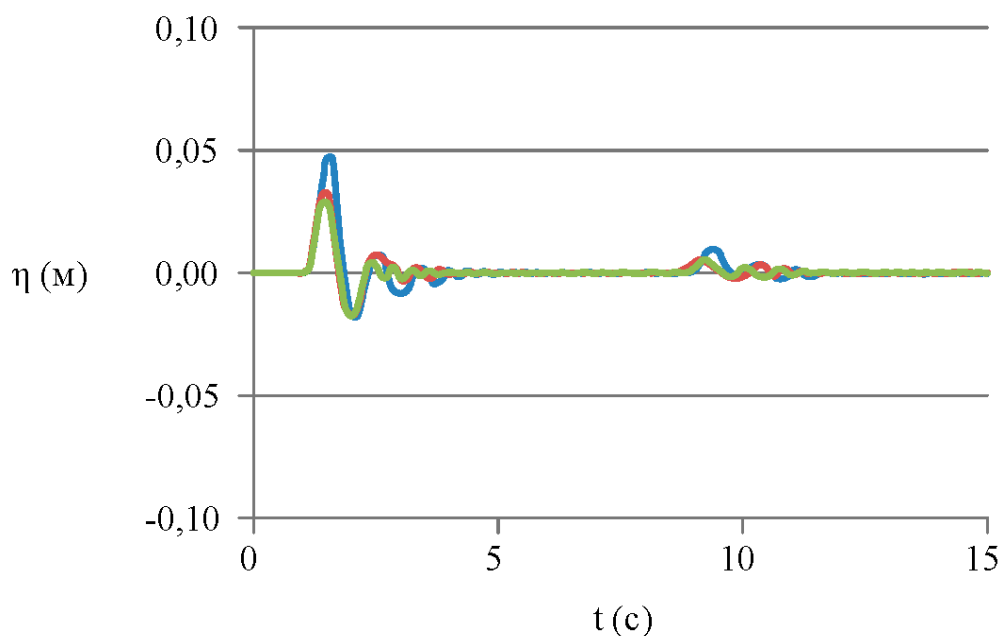


Рисунок 3.30– Записи смоделированных волн, полученных при физическом моделировании в гидравлическом лотке Королевского университета в Кингстоне (адаптировано из [194])



- Волна, полученная при соскальзывании блока под углом  $30^\circ$
- Волна, полученная при соскальзывании блока под углом  $45^\circ$
- Волна, полученная при соскальзывании блока под углом  $60^\circ$

Рисунок 3.31– Сгенерированные модели оползневых волн цунами в НИУ МГСУ

Проведя сопоставление смоделированных моделей волн оползневых цунами в НИУ МГСУ с результатами зарубежных и отечественных исследований, можно сделать следующие выводы:

- формы волн полученных в НИУ МГСУ схожи с формами других исследований, все волны начинаются с повышения уровня воды и после пройденного гребня следуют впадина и остаточные колебания уровня воды, которые постепенно уменьшаются до времени прохождения отраженной волны;

- при сравнении полученных результатов в НИУ МГСУ с записями солитонов в Ганновере (рисунок 3.26)[192] было выявлено расхождение по размеру отраженной волны. На рисунке 3.26а второй записанный гребень волны почти совпадает по размеру с первым гребнем, в результатах НИУ МГСУ отраженные волны получались более мелкие, как было ранее сказано, в связи с более ранним затуханием солитона, а также потерях на колебаниях уровня, следующих за одиночной волной. Расхождения между исследованиями могут быть связаны с различными способами моделирования волн, так в работе, описывающей испытания в Ганновере, сказано что, модели солитонов были получены с помощью поршневого волнового генератора [192], данный способ больше походит на способ моделирования N-волн в разработанной экспериментальной установке, только без изначального моделирования впадины волны. За счет этого волна формируется без всплеска как получалось при моделировании в НИУ МГСУ моделей оползневых цунами, при котором появлялась более мелкая волна в противоположном направлении к наклонной поверхности, которая сразу отражается от нее, данные возникшие колебания и приводили к более быстрому затуханию волны. Подобное можно наблюдать на результатах моделирования цунами на озере Аксья [191], на рисунке 3.27, в конце записи уровень воды начинает опять подниматься и гребень формируется на более низких отметках.



### 3.10 Выводы к третьей главе

Глава 3 представляет основные экспериментальные исследования волн цунами, проведенных в НИУ МГСУ, благодаря разработанной экспериментальной установке. Описаны исследования по изучению формы полученных N-волн и определено, какие параметры влияют на генерацию. Также проведены исследования по изменению формы одиночных волн в зависимости от угла наклона поверхности, по которой соскальзывает блок, формирующий волну, и проведен сравнительный анализ полученных N-волн и одиночных волн. В результате проведенных исследований, в рамках данной главы, можно сделать выводы:

1. Разработанный универсальный генератор волн типа цунами различной формы, справляется с поставленными задачами. Благодаря сконструированной установке были получены модели волн цунами сейсмического происхождения (N-волн), а также оползневые цунами (одиночные волны или солитоны). Во время опытов были апробированы обе методики моделирования волн цунами, заявленные при разработке экспериментальной установки, а также была проверена конструкция генератора волн на надежность и устойчивость;

2. 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. Также было проверено влияние увеличения выпускного отверстия на высоту полученных волн, однако, при большем выпускном отверстии волны получились более мелкие.

3. Важным исследованием стало изучение зависимости формы и высоты сейсмических волн от глубины воды. Был проведен разбор теоретической составляющей трансформации волн цунами на подходе к берегу, исследование данного вопроса в теории длинных волн, а также экспериментальные

исследования, благодаря которым возможно более детально проанализировать форму и поведение волн при различной глубине воды. Так при 5см глубине была неоднократно воспроизведена ударная волна типа бор, а при большей глубине в 10см были получены волны кноидальной формы, сопоставимые с реальными цунами в открытом море. Экспериментальные исследования также были обоснованы теоретическими наблюдениями. Построенные графики зависимости скорости деформации волны от значения локальной глубины в волне и скорости деформации волны от глубины воды, 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.

4. Проведены исследования зависимости формы и высоты волны от габаритов сечения воздушного клапана. Экспериментально подтверждено, что при увеличении габаритов клапана, волновой профиль имеет большую крутизну, что также влияет и на размеры отраженных волн;

5. Проведена отдельная серия опытов, посвященная отражениям N-волн, в ходе которой была показана важность эффекта отражения волн цунами, а также важность учета столкновения отраженной волны с последующей смоделированной волной, в реальных условиях это может быть опасным для судов, находящихся в зоне действия волн цунами;

6. Отдельным исследованием стала, проведенная серия опытов по моделированию оползневых цунами в зависимости от угла наклона поверхности, по которой происходит опускание твердого блока в воду. По результатам анализа было выявлено, что при большем угле наклона получаются менее крупные волны, что связано с направлением движения блока;

7. Проведено сопоставление одиночной волны и N-волны, в ходе которого, экспериментально показаны основные различия двух типов волн. 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.

8. Проведено сопоставление формы сгенерированных волн цунами сейсмического происхождения, полученных в ходе экспериментов в НИУ МГСУ с реальными волнами цунами, произошедшими в Никарагуа и Окушире [186, 189]. Проведя сравнительный анализ, подтверждено, что универсальный генератор волн типа цунами различной формы воспроизводит N-волны типа LDN (впереди впадина).

9. Проведено сопоставление формы волн цунами оползневого происхождения, полученных в НИУ МГСУ, с зарубежными и отечественными исследованиями по моделированию подобных волн. В ходе сравнения результатов исследований было подтверждено, что универсальный генератор волн типа цунами различной формы воспроизводит модели волн цунами оползневого происхождения. Также, при сравнении отраженных волн, была выявлена нестыковка с результатами, полученными в Ганновере [192], отраженные волны зарубежного исследования оказались почти с одинаковой высотой с первоначальной волной, в то время как при экспериментах в НИУ МГСУ отраженные волны получались меньше. Это объясняется различными способами моделирования волн подобного типа, волны полученные в Ганновере, в отличие от других волн были смоделированы поршневым волнопродуктором [192], в то время как остальные исследования, в том числе и в НИУ МГСУ использовали тот или иной соскальзывающий материал по наклонной поверхности, имитирующий оползень.

## ГЛАВА 4. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЗОК ОТ ВОЛН ЦУНАМИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

### 4.1 Введение

Четвертая глава диссертационного исследования посвящена проектированию и расчетам портовых гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах. Представлены, опирающиеся на нормативные документы, рекомендации по сбору исходных данных для проектирования, методика по определению параметров цунами в прибрежной зоне и при выходе на берег, а также методика расчета гидротехнических сооружений на примере конструкций вертикального типа.

На основании анализа методов расчета нагрузок от цунами, а также других волновых воздействий на портовые гидротехнические сооружения, представлено обоснованное предложение по дополнению к расчету сооружений необтекаемого типа для определения давления на вертикальную стенку при ложбине волны цунами перед стенкой.

Четвертая глава диссертации опирается на действующую нормативную документацию [73, 196], поэтому в связи с различиями условных обозначений в научной литературе и нормативных документах, в четвертой главе диссертационной работы, введены следующие изменения по обозначениям волновых характеристик:

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

### 4.2 Особенности проектирования и расчетов гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах

Как ранее было сказано, в России, портовые гидротехнические сооружения, находящиеся в районах, где существует опасность цунами волн, проектируются и рассчитываются в соответствии со Сводом правил №292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» [73].

Нормативный документ обобщает известную на сегодняшний день информацию о нагрузках от цунами, а также предлагает методики для расчета различных по конструкциям гидротехнических сооружений на нагрузки от необрушенных волн цунами, а также от трансформированных при выходе на побережье цунами в виде ударной волны типа бор.

Далее подробно рассмотрим основные шаги проектирования гидротехнического сооружения в цунамиопасном районе на основании существующих нормативов.

#### **4.2.1 Исходные данные для проектирования гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах**

Согласно СП №292.1325800.2017 [73], исходными данными, необходимыми для начала проектирования являются:

- Результаты проведенных инженерных изысканий (инженерно-геодезические, инженерно-геологические, инженерно-гидрометеорологические и инженерно-экологические);
- Информация об опасных природных воздействиях для региона проектирования;
- Данные о расчетных параметрах цунами волн в данном регионе.

Инженерно-геодезические изыскания, включают в себя топографический план (геоподоснову) для прибрежной территории цунамиопасного района, совместно с прилегающей территорией акватории.

Расчетными параметрами воздействия волн цунами, согласно СП №292.1325800.2017 [73], являются:

- Значение вертикального заплеска волны определенной повторяемости;
- Период волны;
- Частота повторяемости.

Расчетные параметры задаются различными способами.

Способы задания волны цунами:

- Задание значения вертикального заплеска цунами заданной повторяемости (50, 100, 500 лет), данные параметры принимаются по картам цунамиопасности побережий РФ, представленных в приложении А данного СП №292.1325800.2017 [73].

- По инструментальным записям параметров волны, гидромониторинг, запись профиля волны (рисунок 4.1). Данные записи, регистрируют около побережья цунамиопасной территории с помощью системы мониторинга и контроля, при фиксации профиля необрушенного гребня цунами определяются максимальные величины высоты цунами и периода волны.

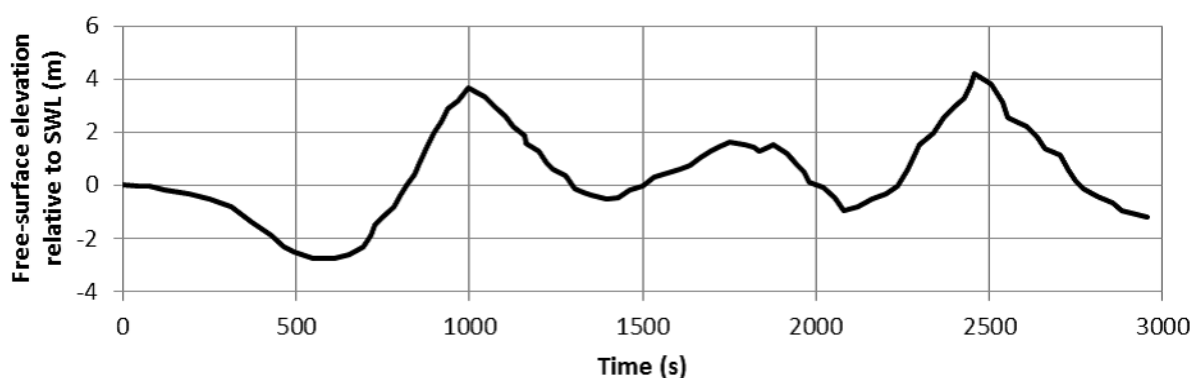


Рисунок 4.1 – Пример записи колебаний уровня во время прохождения цунами 2004 года в Индийском океане [197]

- Задание параметрами воздействия цунами, конкретизированных цунамимикрорайонированием. Работы по цунамимикрорайонированию опираются на методы и результаты математического и физического моделирования, также в их состав входит модель рельефа прибрежной территории и акватории.

- Качественными или количественными показателями волны цунами, силу которой описывают наблюдаемыми на побережье эффектами. Данный способ задания волны в основном используется для разработки и анализа сценариев разрушений от цунами волны, а также для оценочных расчетов.

- Расчетными сценариями воздействия волны цунами, содержащие триггерные события, которые нужны в тех ситуациях, когда происходят на цунамиопасной территории.

- С помощью комплексного энергетического параметра, который характеризует поток энергии волны.

Выбор способа задания воздействия волны цунами основывается на задачах, которые планируется решать, получив исходные данные, их составе и масштабе. Данную информацию вносят в задание на проектирование [73].

#### 4.2.2 Особенности оценки параметров цунами в прибрежной зоне и на берегу. Определение обрушения волны

После получения исходных параметров волн для расчетов, необходимо определить параметры волны цунами в прибрежной зоне и на берегу.

В соответствии с СП №292.1325800.2017 [73], параметры волны цунами, могут быть рассчитаны одним из методов, которые определяется на основании задания волны в исходных данных:

1. Исходными параметрами для расчета являются прогнозируемая величина заплеска  $h_{run}$  (зависит от типа прогноза и может быть  $h_{100}$ ,  $h_{50}$ ,  $h_{50;01}$  и  $h_1$ ), период волн цунами  $T$ , частота повторяемости крупных цунами  $f$ , а также параметр заложения откоса  $m$ ;

2. Исходные параметры — это параметры подходящей волны заданной повторяемости.

Первым действием, является определение типа наката волны на берег:

- Накат происходит без обрушения на береговой откос;
- Во время наката происходит обрушение и формируется ударная волна типа бор.

Критерием, определяющим обрушение цунами, является параметр обрушения  $Br$ , который рассчитывается по формуле (4.1):

$$Br = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{h_{run} m^2}{g} \quad (4.1)$$

В случае если  $Br < 1$  – накат происходит без обрушения, если  $Br = 1$ , тогда при накате образуется ударная волна типа бор [73].

### 4.2.3 Накат на берег необрушенных цунами

Согласно СП №292.1325800.2017 [73], есть несколько методик для определения параметров наката необрушенных волн цунами. Каждая из методик опирается на свои исходные данные, так для методики №1 исходными величинами являются период волны и максимальная высота вертикальный заплеска волны цунами, повторяемостью 1 раз в 100 лет, а для методики №2, исходными данными выступают параметр заложения откоса берега и высота подходящей волны. Далее более подробно рассмотрим каждую из методик.

#### 4.2.3.1 Методика №1

В данном случае, в соответствии с [73], исходные данные для расчетов — это значения  $h_{100}$  и  $T$ .

Первым этапом определяется среднее значение максимального заплеска  $h_1$  (подъем уровня воды) за определенное количество лет  $t$  по выражению (4.2):

$$h_1 = h_{100} \frac{\ln(ft)}{\ln(100t)} \quad (4.2)$$

где  $f$  - частота воздействий крупных цунами волн (принимается по приложению А, СП №292.1325800.2017 [73]).

Далее определяется максимальное значение заплеска  $h_{t,\theta}$  с обеспеченностью  $\theta$  за  $t$  лет по выражению (4.3):

$$h_{t,\theta} = \frac{h_{100}}{\ln(100 \cdot f)} \ln \left[ -\frac{ft}{\ln(1-\theta)} \right] \quad (4.3)$$

Если получившиеся значения заплеска по формулам (4.2) и (4.3), меньше 0,5м, тогда воздействие цунами волны незначительное.

Формулы (4.2) и (4.3) используют при оценке цунами параметров за время  $t$  лет, которое удовлетворяет следующему условию:  $\frac{3}{f} < t < 300$  лет.

Далее определяются безразмерные уровни цунами:

$\frac{h_{max}(x)}{h_{run}}$  – максимальный уровень при накате;



$\frac{h_{min}(x)}{h_{run}}$  – минимальный уровень при откате.

Данные уровни связаны со значением прогнозируемого заплеска  $h_{run}$ , в зависимости от безразмерной координаты  $\tilde{x} = \frac{x}{mh_{run}}$ , которая отсчитывается от невозмущенного уреза воды (положительное значение от уреза это направление в море, отрицательное значение это направление в сторону берега), при этом значение параметра  $Br$  можно вычислить по номограмме в СП №292.1325800.2017 [73].

Безразмерные максимальные скорости потока определяется выражением (4.4):

$$\tilde{u} = u_{max} \frac{T}{2\pi mh_{run}} \quad (4.4)$$

Также, как максимальные уровни, максимальные скорости потока связаны со значением прогнозируемого заплеска  $h_{run}$ , в зависимости от безразмерной координаты  $\tilde{x} = \frac{x}{mh_{run}}$ , также отсчитывается от невозмущенного уреза воды, при этом значение параметра  $Br$  вычисляется по номограмме в СП №292.1325800.2017 [73]. Максимальное абсолютная величина скорости потока  $u = \frac{2\pi mh_{run}}{T}$  происходит на изменяющемся (подвижном) урезе в открытом море, на расстоянии  $x = \frac{(2\pi h_{run})^2 m^3}{2gT^2}$  от берега [73].

#### 4.2.3.2 Методика №2

Методика №2, в соответствии с [73], используется при задании волны по инструментальным записям параметров цунами на гидромониторинге, при этом исходными данными будут высота подходящей волны  $h_d$  и параметр заложения откоса.

Относительная высота наката волны  $\frac{h_{run}}{d}$  рассчитывается, исходя от относительной высоты подходящей волны  $\frac{h_d}{d}$  и заложения откоса  $ctg\varphi$  по таблицам СП №292.1325800.2017 [73] для грунтовых откосов каменной наброски, защищенных плитами и откосов из фасонных блоков.

Далее рассчитывается высота волны на береговом откосе волны  $h_6$  при уклоне  $i$  в соответствии с формулой (4.5):

$$h_6 = \left(1 - \frac{x}{mh_{100}}\right) h_{max} \quad (4.5)$$

где  $x$  – горизонтальная координата рассматриваемой точки, которая отсчитывается от уреза воды,  $h_{max}$  – высота волны на урезе воды, которая определяется по графику СП №292.1325800.2017 [73].

Максимальная возможная высота вышедшего на берег потока со сложным профилем определяется выражением (4.6):

$$h_6 = h_{max} \left(1 - \frac{z}{h_{100}}\right) \quad (4.6)$$

где  $z$  – вертикальная координата рассматриваемой точки, которая расположена выше расчетного уровня.

Когда длина откоса составляет  $L < 0,4\lambda$ , накат волны происходит без обрушения.

Осредненная по глубине горизонтальная скорость потока необрушенной волны под гребнем  $u_{гр}$ , определяется выражением (4.7):

$$u_{гр} = h \frac{\sqrt{g(d+h)}}{d+\eta} \quad (4.7)$$

где  $h$  – высота начальной волны,  $\eta$  – возвышение водной поверхности,  $d$  – глубина воды от спокойного уровня.

Время подхода волны от места с глубиной  $d$  до уреза воды определяется по выражению (4.8):

$$t_{yp} = mk_n \sqrt{\frac{d}{g(1+\frac{h}{d})}} \quad (4.8)$$

где  $k_n$  – коэффициент, определяемый по графику СП №292.1325800.2017 [73].

Время, за которое происходит затопление берегового откоса, определяется по выражению (4.9):

$$t_3 = mk_3 \sqrt{\frac{h}{g}} \quad (4.9)$$

где  $k_3$  – коэффициент, определяемый по графику СП №292.1325800.2017 [73].

После определения параметров наката цунами происходит выбор типа конструкции проектируемого сооружения в зависимости от характеристик волн, места расположения сооружения и экономических параметров. Далее производится расчет нагрузок от волн цунами на сооружение.

#### 4.2.4 Расчет нагрузок от воздействия цунами на необтекаемые гидротехнические сооружения

Согласно СП №292.1325800.2017 [73], сначала определяется наибольшее возвышение свободной поверхности  $\eta_{max}$  около вертикальной стенки сооружения при глубине  $d$ , которое отсчитывается от расчетного уровня в соответствии с формулой (4.10):

$$\eta_{max} = 2h \quad (4.10)$$

где  $h$  - высота волны при входе на акваторию.

Возвышение свободной поверхности при максимальной величине волнового давления определяется формулой (4.11):

$$\eta_c = 2k_c h \quad (4.11)$$

где  $k_c$  – коэффициент, принимаемый по графику в СП №292.1325800.2017 [73] ( $0,55 \leq k_c \leq 1$ ).

Горизонтальная  $P_{xc}$  и вертикальная  $P_{zc}$  удельные нагрузки от цунами, определяются по эпюре волнового давления (рисунок 4.2). Давление на уровне  $z$  определяют по следующим формулам (4.12, 4.13, 4.14):

$$p = 0, \text{ при } z = \eta_c \quad (4.12)$$

$$p = \rho g \eta_c \text{ при } z = 0, \quad (4.13)$$

$$p = 2k_f \rho g h \text{ при } z = d_f, \quad (4.14)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $k_f$  – коэффициент, принимаемый по графику в СП №292.1325800.2017 [73] (тот же график, что и для определения  $k_c$ ),  $0,52 \leq k_f \leq 0,75$ .

Возвышение свободной поверхности у сооружения откосного типа на урзе воды при максимальной величине давления определяется выражением (4.15):

$$\eta_c = 2\sqrt{2} h e^q \sin\left(\frac{\pi}{4} - \sigma\right) \quad (4.15)$$

где  $q, \sigma$  – параметры, которые определяются в зависимости от заложения откоса по таблице СП №292.1325800.2017 [73].

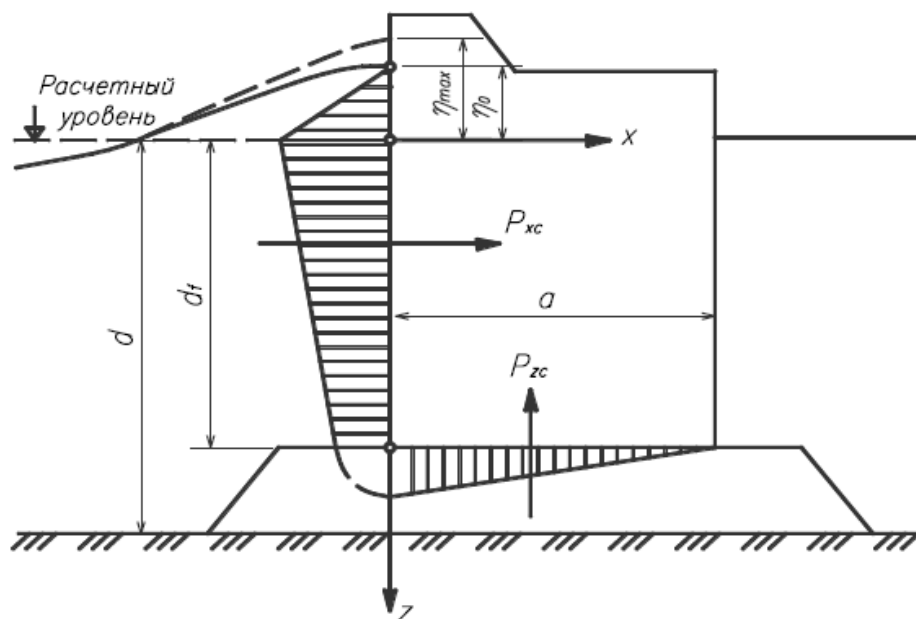


Рисунок 4.2 – Эпюры давления цунами на вертикальную стенку [73]

Горизонтальная линейная нагрузка от цунами на наклонную грань сооружения, определяется также по эпюре волнового давления. Давление на уровне  $z$  определяют по следующим формулам (4.16, 4.17, 4.18):

$$p = 0, \text{ при } z = -\eta_c \quad (4.16)$$

$$p = \rho g \eta_c \text{ при } z = 0, \quad (4.17)$$

$$p = \frac{\rho g \eta_c}{e^{qchf}} \text{ при } z = d, \quad (4.18)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $d$  – глубина воды при входе на акваторию,  $g$  – ускорение свободного падения,  $f$  – параметр, подбираемый по таблице СП №292.1325800.2017 [73].

### **4.3 Сравнительный анализ расчета нагрузок от волн цунами на гидротехнические сооружения типа вертикальной стенки с аналогичными расчетами от других видов волн**

В ходе диссертационного исследования, для более полного понимания особенностей расчета воздействий цунами, описанных в нормативных документах, было проведен сравнительный анализ расчета нагрузок от волн цунами на гидротехнические сооружения типа вертикальной стенки с аналогичными расчетами от других видов волн.

На сегодняшний день, нагрузки от волновых и ледовых воздействий на гидротехнические сооружения, рассчитываются по СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» [196]. Данный нормативный документ систематизирует расчеты от ветровых, стоячих и судовых волн на гидротехнические сооружения, в то время как СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» [73] сконцентрирован именно на расчетах нагрузок от цунами.

Первым делом было проведено сравнение эпюр давления на вертикальную стенку от цунами (рисунок 4.3а) с эпюрами давления от следующих волн:

- разбивающиеся волны (рисунок 4.3б);
- стоячие волны (рисунок 4.3в, г);
- прибойные волны (рисунок 4.3д, е).

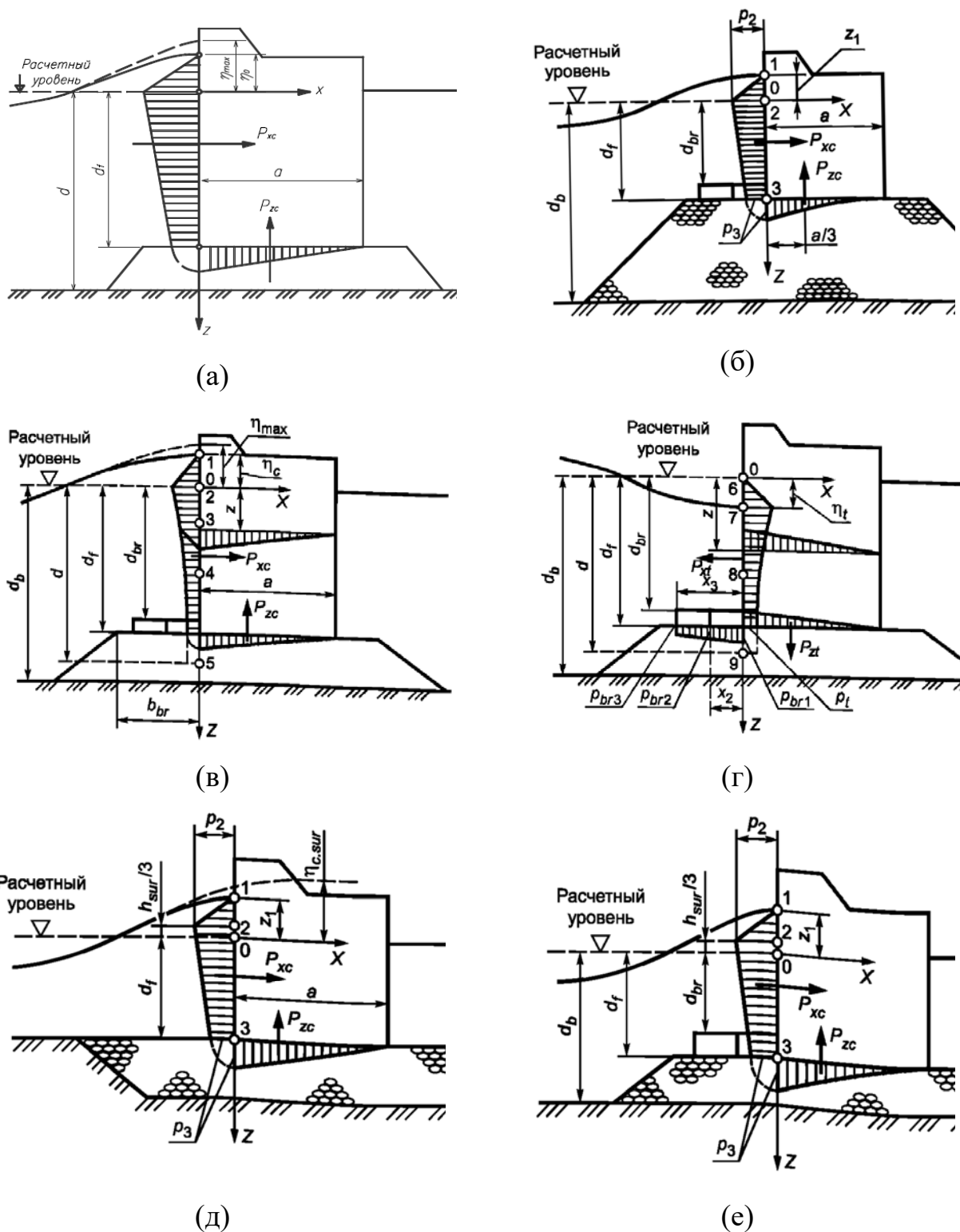


Рисунок 4.3 – Эпюры давления от волновых нагрузок на вертикальные стенки: а – от волн цунами [73], б – от разбивающихся волн [196], в – от стоячих волн при гребне волны [196], г – от стоячих волн при ложбине волны [196], г – от прибойных волн с верхом постели сооружения на уровне дна [196], д – от прибойных волн с возвышающейся над поверхностью дна постелью

Далее были рассмотрены расчеты эпюр волнового давления при воздействии каждой волны:

1. Цунами. В соответствии с СП 292.1325800.2017 [73], для построения эпюры, давление определяется на 3 уровнях ( $z = \eta_c, z = 0, z = d_f$ ) по формулам (4.12, 4.13, 4.14), представленным в предыдущем параграфе.

2. Разбивающиеся волны. В соответствии с СП 38.13330.2018 [196], горизонтальная нагрузка  $P_{xc}$  определяется по эпюре волнового бокового давления, для которой значения  $p$  рассчитывается для 3 уровней  $z_1, z_2, z_3$ , по следующим формулам (4.19, 4.20, 4.21):

$$p_1 = 0, \text{ при } z_1 = -h \quad (4.19)$$

$$p_2 = 1,5\rho gh \text{ при } z_2 = 0, \quad (4.20)$$

$$p_3 = 2k_f\rho gh \text{ при } z_3 = d_f, \quad (4.21)$$

Вертикальная нагрузка  $P_{zc}$  принимается равной площади эпюры взвешивающего давления и определяется по формуле (4.22):

$$P_{zc} = \mu \frac{p_3 a}{2} \quad (4.22)$$

где  $\mu$  – коэффициент, равный:

$$\mu = 0,55 + 0,05 \frac{a}{d_b - d_f} \quad (4.23)$$

при  $\frac{a}{d_b - d_f} \leq 3$ , принимают  $\mu = 0,7$ ;

при  $\frac{a}{d_b - d_f} \geq 9$ , принимают  $\mu = 1$ .

3. Стоячие волны. В отличии от других видов волн которые мы рассматриваем, при расчете нагрузок от стоячих волн, согласно СП 38.13330.2018 [196], учитывается сразу два случая воздействия волны:

- гребень волны;
- ложбина волны.

Эпюра давления при воздействии гребня стоячей волны на вертикальные стенки строится в пяти точках по значениям давления, определяемого согласно выражениям (4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28):

$$z = \eta_c, p_1 = 0 \quad (4.24)$$

$$z = 0, p_2 = k_2 \rho g \eta_c \quad (4.25)$$

$$z = 0,25d, p_3 = k_3 \rho g h \quad (4.26)$$

$$z = 0,5d, p_4 = k_4 \rho g h \quad (4.27)$$

$$z = d, p_5 = k_5 \rho g h \quad (4.28)$$

где  $k_2, k_3, k_4, k_5$  – коэффициенты, принимаемые по графикам в СП 38.13330.2018 [196] ( $0,1 \leq k_2 \leq 1,15$ ;  $0,1 \leq k_3 \leq 1,05$ ;  $0,1 \leq k_4 \leq 1,0$ ;  $0,01 \leq k_5 \leq 0,9$ ),  $\eta_c$  – также как и при расчетах воздействий цунами, возвышение свободной поверхности при максимальном значении волновой нагрузки  $p$  на спокойного горизонта воды.

Эпюра давления при воздействии ложбины стоячей волны на вертикальные стенки строится в четырех точках по значениям давления, определяемого согласно выражениям (4.29, 4.30, 4.31, 4.32):

$$z = 0, p_6 = 0 \quad (4.29)$$

$$z = \eta_t, p_7 = -\rho g \eta_t \quad (4.30)$$

$$z = 0,5d, p_8 = k_8 \rho g h \quad (4.31)$$

$$z = d, p_9 = k_9 \rho g h \quad (4.32)$$

где  $k_8, k_9$  – коэффициенты, принимаемые по графикам в СП 38.13330.2018 [196] ( $0,1 \leq k_8 \leq 0,75$ ;  $0,1 \leq k_9 \leq 0,7$ ),  $\eta_t$  – минимальное понижение уровня свободной поверхности у стенки.

4. Прибойные волны. В соответствии с СП 38.13330.2018 [196], горизонтальная нагрузка  $P_{xc}$  определяется по эпюре волнового бокового давления, для которой значения  $p$  рассчитывается для 3 уровней  $z_1, z_2, z_3$ , по следующим формулам (4.33, 4.34, 4.35):

$$p_1 = 0, \text{ при } z_1 = -h_{sur} \quad (4.33)$$

$$p_2 = 1,5 \rho g h_{sur} \text{ при } z_2 = \frac{1}{3} h_{sur}, \quad (4.34)$$

$$p_3 = \frac{\rho g h_{sur}}{ch \frac{2\pi}{\lambda_{sur}} d_f} \text{ при } z_3 = d_f, \quad (4.35)$$

где  $h_{sur}$  – высота прибойной волны;



$\lambda_{sur}$  – средняя длина прибойной волны;

Вертикальная нагрузка  $P_{zc}$  принимается равной площади эпюры взвешивающего давления и определяется по формуле (4.36):

$$P_{zc} = 0,7 \frac{p_3 a}{2} \quad (4.36)$$

Следует отметить, что в СП 38.13330.2018 [196] сказано, что расчет на нагрузки от прибойных волн необходимо производить при глубине  $d_b \leq d_{cr}$  на участке дна около сооружения, протяженность которого равна не менее  $0,5\lambda$ , а также представлена формула для расчета возвышения вершины максимальной прибойной волны (4.37):

$$\eta_c = 0,5d_{cr} + h_{sur} \quad (4.37)$$

где  $d_{cr}$  – критическая глубина.

Рассмотрев расчеты от различных видов волн на сооружения типа вертикальной стенки, и сопоставив с расчетами от волн цунами, были сделаны следующие выводы:

- в расчете разбивающихся волн, согласно СП 38.13330.2018 [196], представлена формула (4.22) для расчета вертикальной нагрузки  $P_{zc}$ , в которой присутствует коэффициент  $\mu$ , зависящий от ширины сооружения и высоты постели сооружения  $(\frac{a}{d_b - d_f})$ . Также данный коэффициент добавляется и при расчете вертикальной нагрузки  $P_{zc}$  приливных волн (4.36), где он сразу представлен равным 0,7. В случае цунами, согласно СП 292.1325800.2017 [73], данный коэффициент вообще не упоминается, как и формула расчета  $P_{zc}$ , только сказано, что горизонтальная и вертикальная нагрузки определяются по эпюре волнового давления, в связи с этим рекомендуется дополнить пункт 7.1 СП 292.1325800.2017 [73] необходимой уточняющей информацией по расчету вертикальной нагрузки  $P_{zc}$ .

- для прибойных волн представлены две эпюры давления (рисунки 4.3д, е), рассматривается случай с верхом постели на уровне дна и возвышающейся над дном постелью, однако расчет представлен только для одного случая и в СП 38.13330.2018 [196] не уточняется для какого именно. Возвращаясь к

предыдущему пункту выводов, можно предположить, что вертикальная нагрузка  $P_{zc}$  прибойных волн, рассчитанная по формуле (4.36), представлена для случая с возвышающейся над дном постелью, так как для случая с верхом постели на уровне дна, коэффициент  $\mu$  невозможно будет рассчитать, так как  $d_b = d_f$ . В связи с этим, рекомендуется дополнить пункт 5.20 СП 38.13330.2018 [196] необходимой уточняющей информацией о разнице или сходстве расчетов для случаю воздействия прибойной волны на сооружение с возвышающейся над дном постелью и сооружением с верхом постели на уровне дна. В расчете нагрузок от волн цунами, согласно СП 292.1325800.2017 [73], не рассматривается случай с верхом постели на уровне дна, рекомендуется также дополнить пункт 7.1 необходимой уточняющей информацией;

- наиболее важным моментом в сопоставлении расчетов стало рассмотрение нагрузок от стоячих волн. В соответствии с СП 38.13330.2018 [196], при расчете нагрузки от стоячих волн на гидротехнические сооружения типа вертикальной стенки помимо случая гребня учитывается момент ложбины волны, когда вода движется в противоположную сторону от берега (рисунок 4.3г). Данный факт, позволяет сделать предположение, что подобный расчет необходим и для волн цунами, вызванных землетрясениями. В связи с этим было решено провести дополнительное исследование по изучению физики стоячих волн и более детального сравнения их с волнами цунами.

#### **4.4 Исследование сходства взаимодействия стоячих волн и цунами с гидротехническими сооружениями вертикального типа**

В первую очередь разберем сходство между физикой поведения стоячих волн и физикой поведения волн цунами. Стоячие волны или сейши, также как и цунами, представляют собой длиннопериодные гравитационные волны, которые могут образоваться как на совсем небольших озерах, так и в море, также общей чертой является то, что в процессе волнения может быть задействована вся толща воды (рисунок 4.4), как и в случаях цунами. Более того, существовали такие случаи, когда сейши были образованы благодаря цунами волнам. Так в 1946 году,

волна цунами, обрушившаяся на Гавайи, создала сейшу в заливе. В том событии интервал между гребнями цунами был около 15 минут, а в естественном состоянии залив Хило имеет резонансный период 30 минут, следовательно каждая вторая волна цунами попадала в такт движения залива, что и повлияло на создание сейш [198]. Одиночные волны (солитоны) и приливы также могут привести к образованию прибрежных стоячих волн.

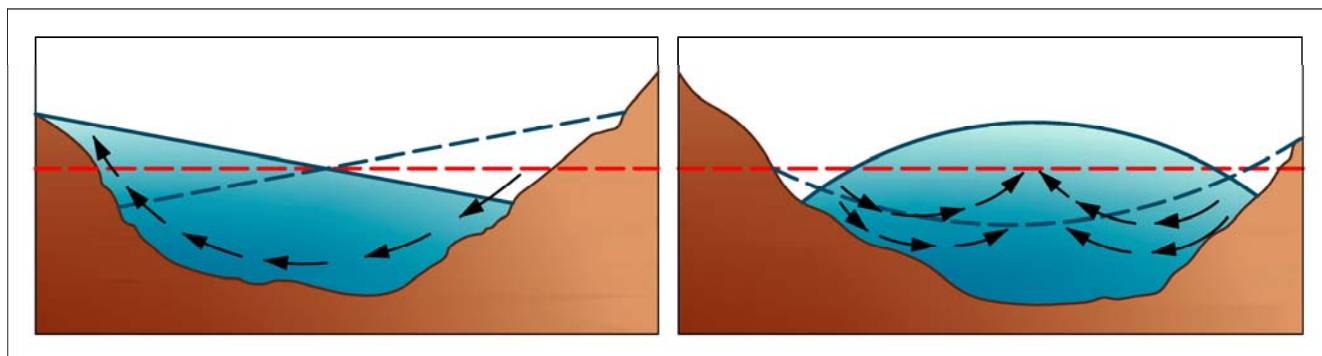


Рисунок 4.4 – Схема движения воды при стоячих волнах (адаптировано из [199])

Возвращаясь к расчетам нагрузок, проанализируем сходство схемы эпюр нагрузок на вертикальные стенки от волн цунами с аналогичной схемой для стоячих волн. Стоит отметить, что эпюры давления цунами, как от разбивающихся и прибойных волн, линейны (рисунок 4.3 а, б, д, е), а эпюры стоячих волн изменяются по экспоненте (рисунок 4.3 в, г), однако глубина у сооружения обычно небольшая, следовательно полученные значения давления в характерных точках не имеют сильного перепада, поэтому распределение давления является близким к линейному, что позволяет сравнивать эпюры стоячих волн с эпюрами цунами.

Эпюра давления при воздействии гребня волны цунами на вертикальные стенки строится по значениям давления в трех точках, определяемых выражениями 4.12, 4.13, 4.14. При построении эпюры давления при воздействии гребня стоячей волны на вертикальные стенки, эпюра строится по значениям давления в пяти точках, определяемых выражениями 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28.

В обоих рассматриваемых случаях, по площади построенной эпюры, определяются горизонтальная  $P_{xc}$  и вертикальная  $P_{zc}$  удельные нагрузки от волны, точки приложения которых, расположены по центру тяжести эпюры.

Но как ранее было сказано, в отличии от расчетов волновых нагрузок от цунами, методика расчета стоячих волн, рассматривает еще один случай, который также очень важен, для проверки проектируемого сооружения. Это случай, когда рассматривается ложбина стоячей волны, что на первый взгляд кажется не совсем существенным, но на самом деле, играет не менее важную роль в расчетах портовых гидротехнических сооружений. В данном случае происходит проверка сооружения на обратное опрокидывание, в сторону, противоположную от берега. При проектировании гидротехнических портовых сооружений отдается приоритет лицевой части конструкции, которая направлена в сторону открытого моря, в то время как задняя часть, направленная к берегу, как правило, воспринимает меньше нагрузки, за счет этого, может быть менее укрепленной. В случае стоячих волн может произойти отход массы воды в другую часть водоема (рисунок 4.4), при этом, в месте расположения оградительного сооружения, возникает впадина. В данной ситуации, горизонтальная и вертикальная составляющие удельной нагрузки от волны, будут направлены в противоположную сторону (рисунок 4.3 г), в отличии от рассмотренных ситуаций с воздействием гребня.

Также как и в случае с гребнем волны, по площадям построенных эпюр, определяются горизонтальная  $P_{xt}$  и вертикальная  $P_{zt}$  удельные нагрузки от волны, точки приложения которых, располагаются по центру тяжести эпюры.

Данный случай расчета нагрузок при ложбине волны, присутствующий в методике расчета стоячих волн, также может возникнуть и при воздействии волны цунами от землетрясения, однако в нормативной документации по цунами [57], представлена только методика расчета нагрузок при гребне волны. Отсутствие второй части расчета, можно оправдать рассмотрением волн цунами именно как одиночных волн (солитонов), при воздействии которых, происходит сразу повышение уровня воды [18, 112, 113]. В таком случае, расчет,

представленный в СП 292.1325800.2017 [73] можно считать достаточным для проверки портовых гидротехнических сооружений, однако не стоит забывать, что цунами представляют собой волны различного профиля, и помимо солитонов, существуют еще N-волны, типа LDN [97, 98, 99, 100, 101, 114, 115], воздействие которых, начинается с понижения уровня свободной поверхности воды и движением ее, в противоположную от берега сторону. Данный факт позволяет предположить, что поведение LDN волны похоже на поведение сейш, так как происходит тот же отход массы воды в сторону открытого моря, как и при стоячих волнах (рисунок 4.5 а, б).

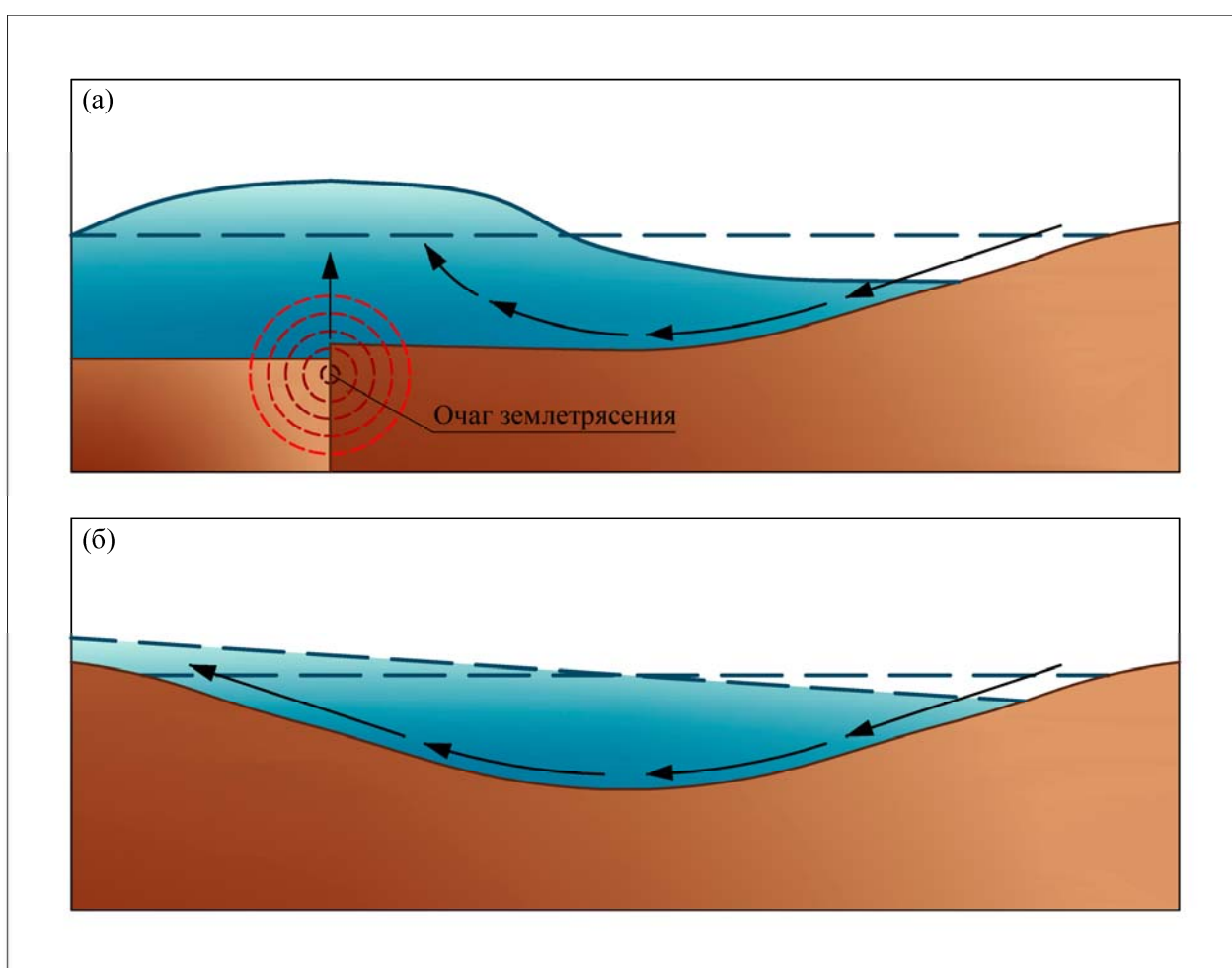


Рисунок 4.5 – Сравнение траектории движения водной массы при стоячих волнах (слева) и при LDN волнах: а – схема движения волны цунами, вызванной землетрясением (LDN волна), б – схема движения стоячей волны

На основании вышеизложенного, можно сделать вывод, что для проектируемых гидротехнических портовых сооружений, находящихся в цунамиопасных районах, где есть вероятность воздействия цунами волн

сейсмического происхождения (N-волны), требуется учитывать особенности физики поведения данных волн, когда перед ударной волной происходит понижение уровня воды и поток направлен в противоположную сторону от береговой полосы. В связи с этим, рекомендуется проводить вторую часть расчета по определению горизонтальной  $P_{xt}$  и вертикальной  $P_{zt}$  удельных нагрузок от волны в момент впадины.

#### **4.5 Предложение по расчету эпюры давления при ложбине волны цунами**

Для определения эпюры давления при впадине волны цунами определим 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 волны цунами. Исходя из описания физики N-волн [97, 98, 99, 100, 101, 114, 115], представленного во второй главе диссертации, LDN волны могут быть двух видов:

- обобщенная LDN волна, когда впадина имеет отличную амплитуду от гребня (рисунок 4.6);
- равнобедренная LDN волна, когда амплитуда впадины и гребня волны совпадают (рисунок 4.7).

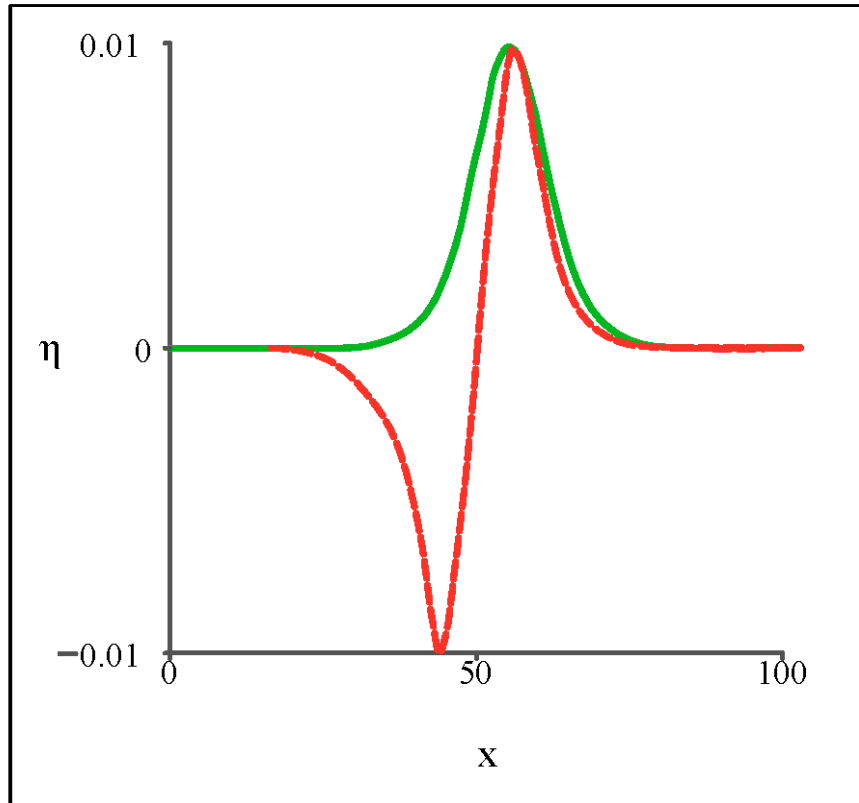


Рисунок 4.6 – Сравнение профилей волн: солитон – зеленый график, обобщенная LDN волна – фиолетовый график (адаптировано из [114])

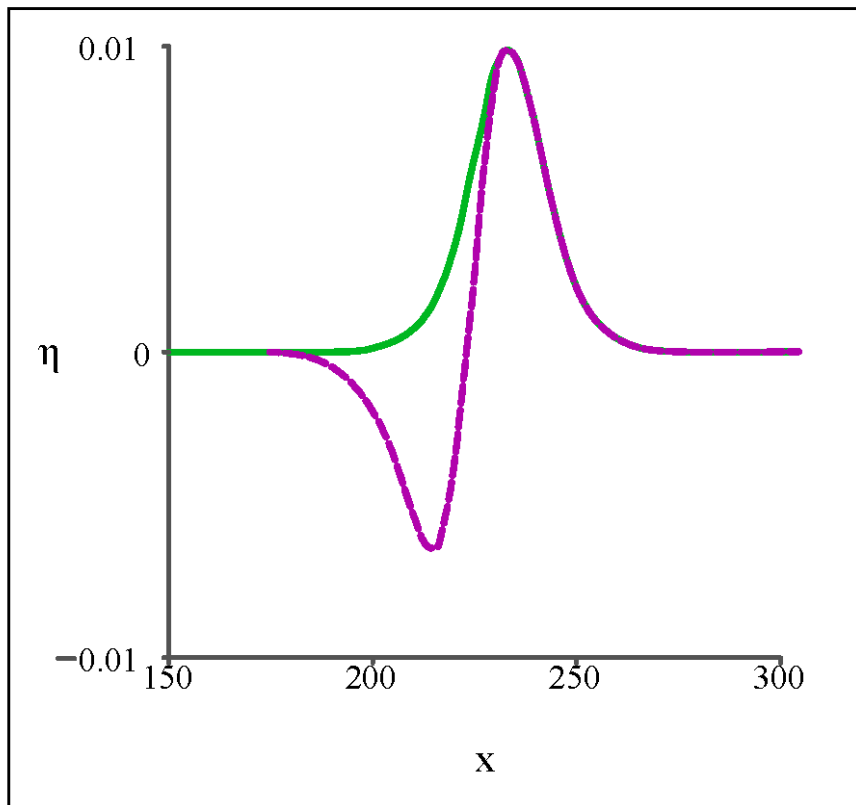


Рисунок 4.7 – Сравнение профилей волн: солитон – зеленый график, равнобедренная LDN волна – красный график (адаптировано из [114])

Учитывая особенности LDN волн, а также, что в расчетах СП 292.1325800.2017 [73] при гребне, наибольшее возвышение свободной поверхности воды принимается равным  $\eta_{max} = h$ , минимальное значение волновой поверхности у стенки  $\eta_t$  будет равняться следующему выражению (4.28):

$$\eta_t = k_{tN} h \quad (4.28)$$

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 (4.29, 4.30, 4.31):

$$z = 0, p = 0, \quad (4.29)$$

$$z = \eta_t, p = -\rho g \eta_t \quad (4.30)$$

$$z = d_f, p = -k_{fN} \rho g h \quad (4.31)$$

где  $k_{fN}$  – вводимый поправочный коэффициент, который определяется по формуле в соответствии с методом Goda [200] для полного диапазона волновых воздействий (4.32):

$$k_{fN} = 1 - \frac{d_f}{d} \left( 1 - \frac{1}{\cosh 2\pi d / \lambda} \right) \quad (4.32)$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Значения горизонтальной  $P_{xt}$  и вертикальной  $P_{zt}$  удельных нагрузок от волны, будут также направлены как и в случае эюр стоячих волн в противоположную сторону от берега, а их значения будут определяться по площадям построенных эюр (рисунок 4.8).



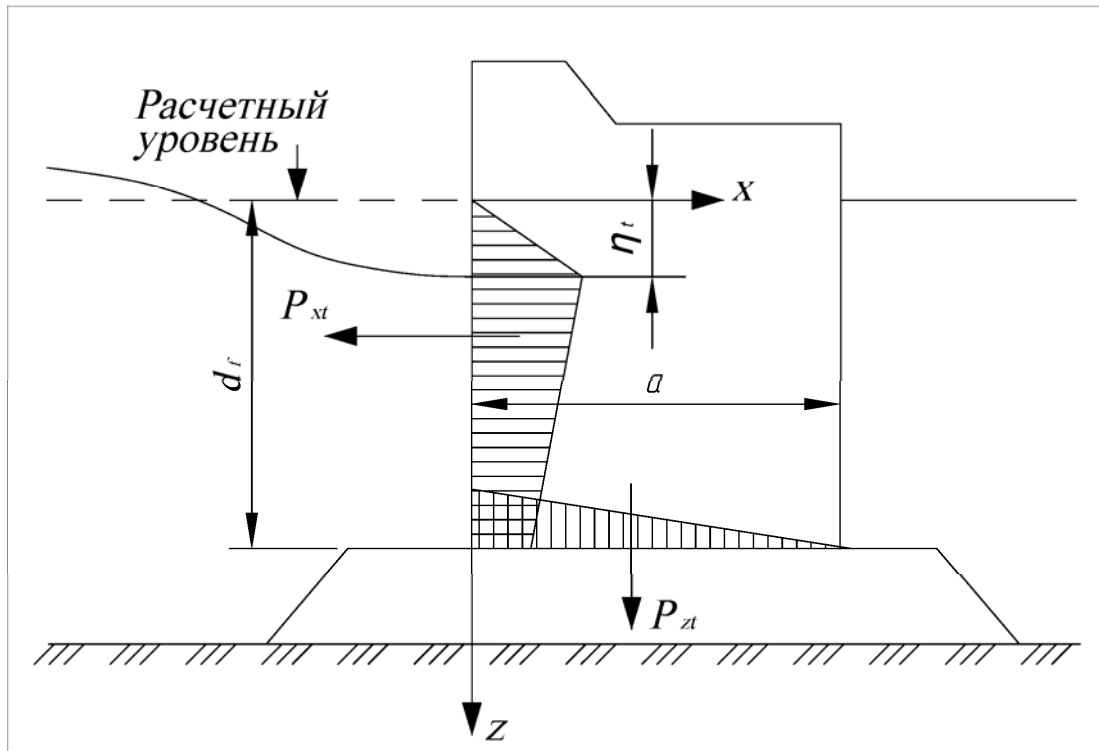


Рисунок 4.8 – Эпюры давления волн цунами на вертикальную стенку при впадине волны

#### 4.6 Проверка предложенной методики на примере расчета нагрузок от волн цунами в морском порту Корсаков

Для подтверждения предложенного расчета по определению значений горизонтальной  $P_{xt}$  и вертикальной  $P_{zt}$  удельных нагрузок при впадине волны цунами, было принято решение рассчитать данные нагрузки на примере реальных волн цунами, зарегистрированных в морском порту Корсаков (Сахалинская область) и представленных в отчете о научно-исследовательской работе по прогнозу волнового режима и детальному цунами районированию [201]. Для расчета были приняты наиболее крупные волны цунами, зарегистрированные в рассматриваемой местности (таблица 4.1).

Таблица 4.1. Волны цунами, принятые для расчета [7, 201, 202, 203].

№	Дата возникновения цунами и ссылка на источник информации	Максимальная высота волны, зафиксированная в морском порту Корсаков, м	Период волны, мин
1	04.11.1952 [7]	1,0	31
2	22.05.1960 [202]	1,2	9
3	11.03.2011 [203]	0,67	20-30

Даты волн и максимальные высоты были взяты из отчета [201], периоды волн были взяты из открытых источников [7, 202, 203].

В качестве расчетного сооружения примем один из существующих молов – средний мол, длиной  $l=100$ м, шириной  $a=6$ м (рисунок 4.9) [201]. Глубину около сооружения примем  $d=9$ м. Габариты мола и глубина перед сооружением были приняты в соответствии со схемами отчета [201]. Глубину над подошвой сооружения примем  $d_f=8,5$ м (постель сооружения принимаем для расчета – 0,5м).

Для расчета нагрузки от гребня волны, была использована методика СП 292.1325800.2017 [73]. В соответствии с формулами 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 были рассчитаны значения горизонтальной  $P_{xt}$  и вертикальной  $P_{zt}$  удельных нагрузок и представлены в таблице 4.2.

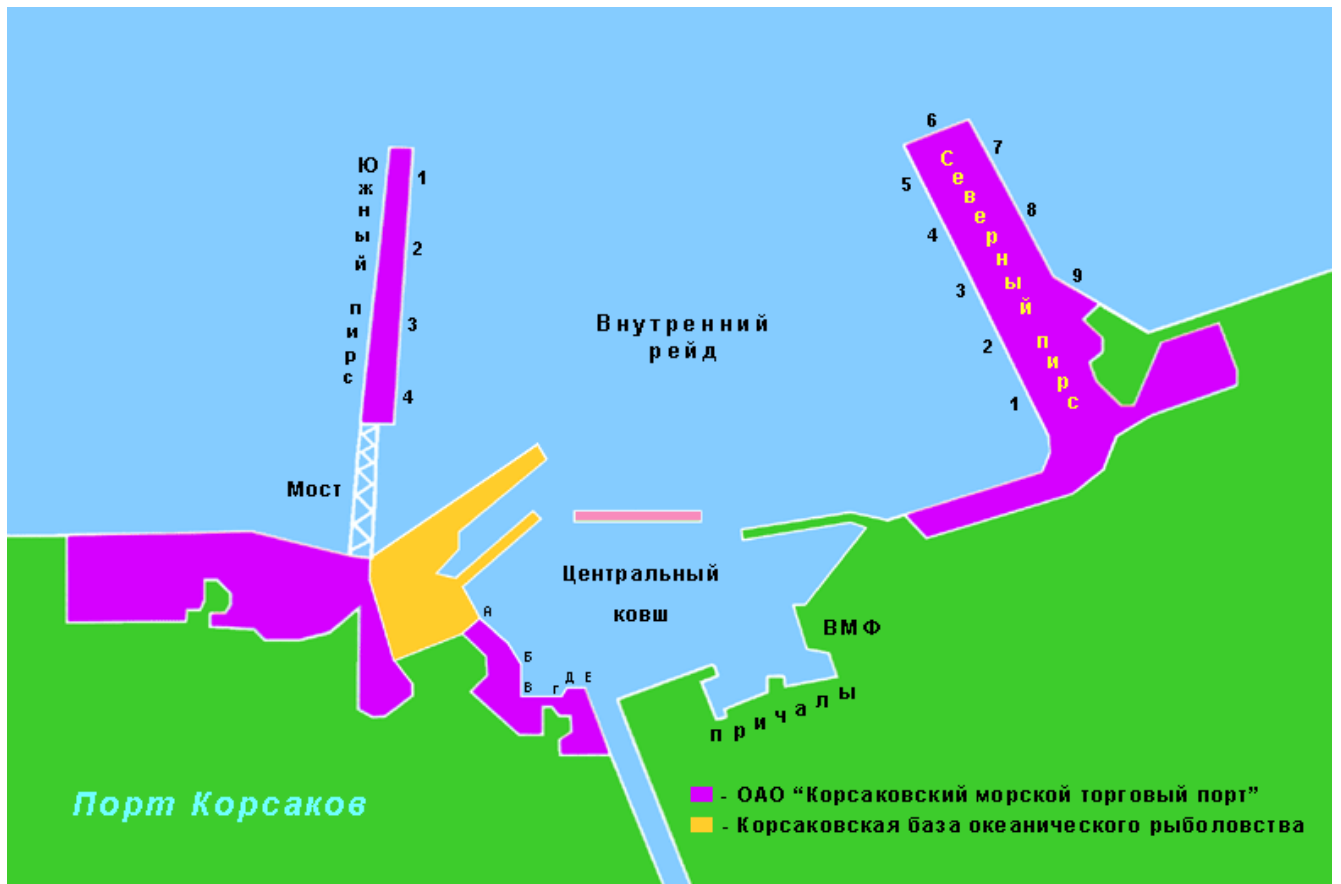


Рисунок 4.9 – Схема генерального плана морского порта Корсаков с обозначенным розовым цветом, средним молом, используемым для расчета (адаптировано из [201])

Для расчета нагрузки от ложбины (впадины), была использована предложенная методика в параграфе 4.6. В соответствии с формулами 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 были рассчитаны значения горизонтальной  $P_{xt}$  и вертикальной  $P_{zt}$  удельных нагрузок и представлены в таблице 4.3. Расчеты производились для наиболее опасного случая, когда волна цунами является равнобедренной LDN волной, т.е. амплитуда гребня равна амплитуде впадины и коэффициент  $k_{tN} = 1$ . Для получения значения коэффициента  $k_{fN}$  (4.32), были определены длины расчетных волн по формуле 1.3.

В соответствии с получившимися значениями давлений на различных расчетных уровнях, были построены эпюры давления от гребней и впадин волн, которые представлены на рисунках 4.10, 4.11.

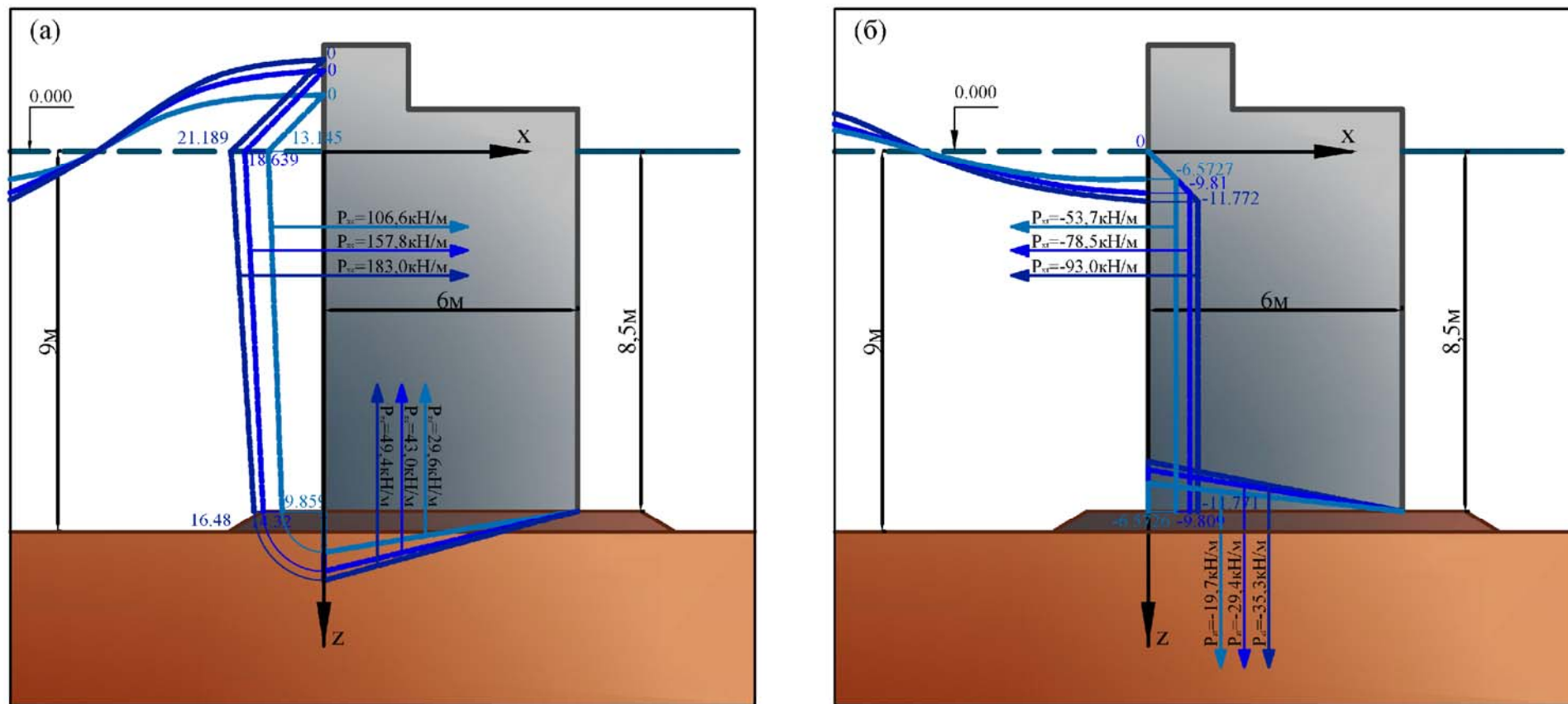
Значения горизонтальной  $P_{xt}$  и вертикальной  $P_{zt}$  удельных нагрузок и при гребне, и при впадине волны были получены по площадям построенных эпюр.

Таблица 4.2. Расчет нагрузки от гребня цунами на оградительное сооружение

№ расчетной волны	$h$ (м)	$k_c$	$\eta_c$ (м)	$d$ (м)	$d_f$ (м)	$a$ (м)	$k_f$	Давление $p$ (кПа) на уровне $z=\eta_c$	Давление $p$ (кПа) на уровне $z=0$	Давление $p$ (кПа) на уровне $z=d_f$	Горизонтальная удельная нагрузка $P_{xc}$	Вертикальная удельная нагрузка $P_{zc}$
1	1	0,95	1,9	9	8,5	6	0,73	0	18,639	14,3226	157,79385	42,9678
2	1,2	0,9	2,16	9	8,5	6	0,7	0	21,1896	16,4808	182,983968	49,4424
3	0,67	1	1,34	9	8,5	6	0,75	0	13,1454	9,85905	106,5763305	29,57715

Таблица 4.3. Расчет нагрузки от впадины цунами на оградительное сооружение

№ расчетной волны	$h$ (м)	$k_{tN}$	$\eta_t$ (м)	$d$ (м)	$d_f$ (м)	$T$ (с)	$\lambda$ (м)	$a$ (м)	$k_{fN}$	Давление $p$ (кПа) на уровне $z=0$	Давление $p$ (кПа) на уровне $z=\eta_t$	Давление $p$ (кПа) на уровне $z=d_f$	Горизонтальная удельная нагрузка $P_{xt}$	Вертикальная удельная нагрузка $P_{zt}$
1	1	1	1	9	8,5	1860	17477,07	6	0,9999951	0	-9,81	-9,80995155	-78,47981832	-29,42985465
2	1,2	1	1,2	9	8,5	540	5073,989	6	0,9999414	0	-11,772	-11,7713103	-92,99628248	-35,31393081
3	0,67	1	0,67	9	8,5	1800	16913,3	6	0,9999947	0	-6,5727	-6,57266534	-53,6659598	-19,71799602



- Цунами, высотой  $h=0,67\text{м}$
- Цунами, высотой  $h=1,0\text{м}$
- Цунами, высотой  $h=1,2\text{м}$

Рисунок 4.10 – Эпюры давления от расчетных волн цунами на вертикальную стенку: а – при гребне волны, б – при впадине волны

На основании проведенных расчетов были сделаны следующие выводы:

- была апробирована предложенная методика расчета нагрузки от волны цунами на гидротехнические сооружения типа вертикальной стенки, на примерах существующих волн, зарегистрированных в морском порту Корсаков;
- полученные горизонтальные и вертикальные удельные нагрузки при впадине по значениям оказались меньше чем при гребне, однако следует учесть, что при впадине волны, воздействие на сооружение происходит с обратной менее укрепленной стороны (от берега), что увеличивает опасность разрушения и опрокидывания сооружения под воздействием обратного потока. Предложенный расчет, позволяет понять, какую нагрузку должна выдержать задняя стенка сооружения.

#### **4.7 Выводы к четвертой главе**

Четвертая глава диссертации рассматривает основные вопросы проектирования гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах. Были разобраны следующие значимые этапы, на которые следует обратить внимание при разработке портовых гидротехнических сооружений:

- 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.

Важной составляющей главы стало сравнение методик расчета нагрузок от цунами и расчета нагрузок от других видов волн, таких как стоячие, разбивающиеся и прибойных волн. Были проанализированы расчеты и эпюры при воздействии каждого из видов волновых воздействий, на основе чего, были сделаны выводы и рекомендации по дополнению необходимой информацией СП 292.1325800.2017 [73] и СП 38.13330.2018 [196]. Значимым моментом в сравнении методик стало рассмотрение нагрузок от стоячих волн. В соответствии с СП 38.13330.2018 [196], 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 физики стоячих волн и более детального сравнения их с волнами цунами.

На основании данного сопоставления, а также анализа информации по воздействиям цунами типа N-волн было разработано и представлено обоснованное предложение по дополнению к расчету сооружений типа вертикальной стенки для определения давления на вертикальную стенку при ложбине волны цунами.

Проведенные исследования, в рамках данной главы, позволяют сделать следующие выводы:

1. На сегодняшний день, работы по проектированию гидротехнических сооружений, следует проводить в соответствии с действующим СП№292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» [73]. Данный нормативный документ обобщает всю имеющуюся на данный момент информацию о цунами и систематизирует порядок этапов по выполнению работ проектирования.

2. В основе любого проектирования лежит правильный подбор исходных данных. Данное правило особенно актуально, для проектируемых сооружений в цунамиопасных районах. Внимательно требуется отнестись к выполняемым инженерно-геодезическим изысканиям, так как форма волн цунами и ее характеристики, как ранее было сказано и подтверждено опытами, зависит от рельефа дна и глубин воды на акватории. Также очень серьезно нужно отнестись к способам задания волны цунами, так как необходимо правильно оценить расчетную волну для получения верных нагрузок на проектируемое сооружение, что будет влиять на конструкцию и габариты сооружения.

3. Для проектируемых гидротехнических портовых сооружений, находящихся в цунамиопасных районах, где есть вероятность воздействия цунами волн сейсмического происхождения (N-волны), необходимо учитывать особенности физики поведения данных волн. В первую очередь, когда перед ударной волной происходит понижение уровня воды и поток направлен в противоположную сторону, что может привести к обратному опрокидыванию сооружения. В связи с этим, для заданных волн цунами сейсмического происхождения (N-волны) рекомендуется производить вторую часть расчета по определению горизонтальной  $P_{xt}$  и вертикальной  $P_{zt}$  удельных нагрузок от волны цунами.



## 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 [73] и СП 38.13330.2018 [196] 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 [73] 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[73], 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» [73].

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 [73] и СП 38.13330.2018 [196], уточняющей информацией как производить расчет горизонтальной  $P_{xc}$  и вертикальной  $P_{zc}$  удельных нагрузок, информацией по коэффициенту  $\mu$ , 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»[73].

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 ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Котицына С.С. Разрушения в порту, производимые волнами цунами / С.С. Котицына, И.Г. Кантаржи // Гидротехническое строительство. – 2020.– № 11. – С. 33–38.
2. Kotitsyna S.S. Destructions in the Port Caused by Tsunami Waves / S.S. Kotitsyna, I.G. Kantarzhi // Power Technology and Engineering. – 2021.– № 55. – P. 20–25.
3. Войт С. С. Волны цунами. // Исследование цунами. 1987. №2. С. 8–26.
4. Носов М.А. Введение в теорию волн цунами. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений/ М.А. Носов. - ООО Издательство Янус-К, 2019. – С.1–168.
5. Действие волн на берег. Трансформация волн на мелководье // Myzooplanet.ru. URL: [https://myzooplanet.ru/oceanologiya-oceanografiya\\_918/deystvie-voln-bereg-transformatsiya-voln-18607.html](https://myzooplanet.ru/oceanologiya-oceanografiya_918/deystvie-voln-bereg-transformatsiya-voln-18607.html) (дата обращения: 02.06.2022).
6. Носов М.А. Физика цунами/ М.А. Носов. – Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова – С. 1–90.
7. Global Historical Tsunami Databele // NOAA National Geophysical Data Center. URL: [https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml) (дата обращения: 20.04.2023).
8. Пушаровский Ю. М., Тектоническое развитие Земли: Тихий океан и его обрамление/ Ю. М. Пушаровский, Е. Н. Меланхолина – Наука, 1992. – С.20-22;
9. Bethany D. Ring of Fire: An Encyclopedia of the Pacific Rim's Earthquakes, Tsunamis, and Volcanoes. D. Bethany R. Hinga. S. Barbara // CA: ABC-CLIO, 2015. – P. 17–20.
10. Tsunami laboratory // Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics. URL: [http://tsun.sccc.ru/tgi\\_1.htm](http://tsun.sccc.ru/tgi_1.htm) (дата обращения: 22.04.2023).

11. Лаверов Н.П. Фундаментальные исследования океанов и морей. Книга 1/ Н. П. Лаверов. – Наука, 2006. – С. 191–209.
12. What Is A Tsunami? // Pitara. URL: <https://www.pitara.com/science-for-kids/5ws-and-h/what-is-a-tsunami/> (дата обращения: 15.03.23).
13. Кайстренко В.М. Проявление цунами 26 декабря 2004 года на побережье Индонезии / В. М. Кайстренко, Н. Г. Разжигаева, Ю. П. Королев, Н. В. Полухин, А. И. Зайцев // Вестник ДВО РАН. – 2006.– № 1. – С. 123–130.
14. Землетрясение в Индийском океане (2004) // Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8F%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5\\_%D0%B2\\_%D0%98%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BC\\_%D0%BE%D0%BA%D0%B5%D0%B0%D0%BD%D0%B5\\_%282004%29](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8F%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%B2_%D0%98%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BC_%D0%BE%D0%BA%D0%B5%D0%B0%D0%BD%D0%B5_%282004%29) (дата обращения: 16.02.23).
15. Айзенберг Я.М. Землетрясение и цунами в Японии 11 марта 2011 года/ Я.М. Айзенберг// Сейсмостойкое строительство. безопасность сооружений. – 2011. – №5. – С.46–50.
16. Kawai H. Characteristics of the 2011 Tohoku tsunami waveform acquired around Japan by NOWPHAS equipment / H. Kawai, M. Satoh, K. Kawaguchi, K. Seki // Coastal Engineering Journal. – 2013.– № 55. – P. 1350008–1–27.
17. Фотоподборки Японии цунами землетрясения // Заметки путешественника. URL: <https://bangkokbook.ru/zametki/yaponiya-cunami-zemletryaseniya-84-foto.html> (дата обращения: 16.02.23).
18. Иванова А.А. Генерация цунами подводным оползнем вблизи восточного побережья о. Сахалин. Вестник Московского университета / А.А. Иванова, Е. А. Куликов, И.В. Файн, Б.В. Баранов // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2018.– № 22. – С.111–116.
19. Костенко И.С.. Случаи возникновения цунами от различных обвалов и оползней/ И.С. Костенко // Экологические системы и приборы. – 2021. – №11. – С.78-85.

20. Цунами: что это такое, причины возникновения, виды, последствия, фото и видео // Научно-популярный журнал: «Как и Почему». URL: <https://kipmu.ru/cunami-/> (дата обращения: 19.02.23).

21. Mader Charles L.. The International Journal of The Tsunami Society/ Charles L. Mader // Science of tsunami hazards. – 2002. – V.20. – №5. – P.241-245.

22. Мегацинами в заливе Литуйя // Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%B3%D0%B0%D1%86%D1%83%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8\\_%D0%B2\\_%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%B5\\_%D0%9B%D0%B8%D1%82%D1%83%D0%B9%D1%8F](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%B3%D0%B0%D1%86%D1%83%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8_%D0%B2_%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%B5_%D0%9B%D0%B8%D1%82%D1%83%D0%B9%D1%8F) (дата обращения: 07.12.23).

23. Ушакова Л.А. Крупнейшие сейсмические и вулканические катастрофы XX в. международное десятилетие по сокращению ущерба от землетрясений, вулканических извержений и цунами/ Л.А. Ушакова, И.С. Ушакова // Жизнь Земли. – 1996. – Том 29. – С.222-229.

24. Пелиновский Е.Н. Цунами, вызванные извержениями вулкана на острове Монтсеррат в Карибском море/ Е.Н. Пелиновский, Н. Зайбо, П. Данкли, Т.Г. Талипова, А.С. Куркин, И.Ф. Николкина, Н.М. Самарина // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – 2004. – Том 6. – С.31-59.

25. Семенова И.С. Последствия катастрофического извержения вулкана Кракатау в 1883 году / И.С. Семенова // География: развитие науки и образования. – 2016. – С.262-266.

26. Диденкулова И.И. Сравнение характеристик измеренных волн цунами в Индийском океане: Кракатау (1883 г.) и Индонезия (2004 г.) / И.И. Диденкулова, Е.Н. Пелиновский // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2005. – №13. – С.95-98.

27. Белоусов А.Б. Вулканические цунами: от Кракатау до Карымского / А.Б. Белоусов, М.Г. Белоусова // Природа. – 2011. – №6(1150). – С.26-34.

28. Анак Кракатау: Имитация цунами в обрушившемся вулкане // Eng news. URL: <https://eng-news.ru/Anak-Krakatau-Collapsed-volcano-s-tsunami-simulated> (дата обращения: 27.03.23).

29. Рабинович А.Б. Метеорологические цунами: что это такое? / А.Б. Рабинович, Я. Шепич // Природа. – 2016. – №1. – С.12-26.
30. Долгих С.Г. Геосферные особенности проявления метеоцунами / С.Г. Долгих, Г.И. Долгих // Физика Земли. – 2019. – №5. – С. 104-109.
31. Ковалев Д.П. Распространение метеоцунами у побережья о. Сахалин/ Д.П. Ковалев, Г.В. Шевченко, П.Д. Ковалев // Сборник трудов конференции: «Геодинамические процессы и природные катастрофы. опыт нефтегорска: всероссийская научная конференция с международным участием». – 2015. – С. 312-316.
32. Землетрясение в Таиланде, цунами. Статистика, прогноз. Описание событий 2004, 2010, 2011, 2016, 2017 годов // Touristam.com. URL: <https://touristam.com/zemletryasenie-v-tailande.html> (дата обращения: 28.03.23).
33. В. В. Ефимов // Prirodainfo. URL: <https://prirodainfo.ru/gidrosfera/tsunami> (дата обращения: 15.11.22).
34. Сасорова Е.В. О проблеме локальных цунами и возможностях их предупреждения/ Е.В. Сасорова, М.Е. Коровин, В.Е. Морозов, П.В. Савочкин // Океанология. – 2008. – Том 48. – №5. – С. 685-697.
35. Гусяков В.К. Сильнейшие цунами мирового океана и проблема безопасности морских побережий/ В.К. Гусяков // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Том 50. – №5. – С. 496-507.
36. Куликов Е.А. Физика цунами/ Е.А. Куликов // Физика. – 2005.. – №11.
37. Trefill J. Природа науки. 200 законов мироздания / J. Trefil - ООО Издательство Geleos, 2007. – С.129-131.
38. Гусяков В.К. Цунами на дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика/ В.К. Гусяков // Геология и геофизика. – 2016. – Том 57. – № 9. – С.1601—1615.
39. Клячко М. А. Обеспечение устойчивой безопасност и морских побережий при воздействии цунами/ М.А.Клячко, А.И. Зайцев, Т.Г. Талипова, Е.Н. Пелиновский //Геориск. – 2022. – Том 16 . – №1. - С.32-55.

40. Диденкулова И.И. Цунамиподобные явления в российских внутренних водоемах / И.И. Диденкулова, Е.Н. Пелиновский // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2009. – № 3(5). – С. 52–64.

41. Махинов А.Н. Крупный оползень в долине реки Буряя и цунами в водохранилище Буреинской ГЭС / А.Н. Махинов, В.И. Ким, А.В. Остроухов, Д.В. Матвеев // *Вестник ДВО РАН*. – 2019. – № 2. – С. 35–44.

42. Gusiakov V. Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk / V. Gusiakov, A. Makhinov. – *ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction*. – 2018. – P. 351-360.

43. Пинегина Т. К. Исследования палеоцунами на дальневосточном побережье России / Т. К. Пинегина, Н. Г. Разжигаева. - М.: Научный мир, 2013. – С.488–498.

44. Соловьев С. Л., 1968. Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // *Проблема цунами*. М.: Наука, 1968, с. 7–50.

45. Крашенинников С.П. Описание земли Камчатки: с приложением рапортов, донесений и других неопубликованных материалов / С.П. Крашенинников. - ООО Издательство Главсевморпути, 1949. – С.842.

46. Чуян Г. Н. О высоте цунами 1737 г. на острове Беринга/ Г.Н. Чуян, В.Е. Быскалов // *Вестник ДВО РАН*. – 2011. – №2. – С.155-161.

47. Стеллер Г. В. Описание плавания из Петропавловска на Камчатке к западному побережью Америки, а также происшествий, имевших место на обратном пути. Последняя экспедиция Витуса Беринга / Г. В. Стеллер // М.: Прогресс-Пангея. – 1992. – С.47–132.

48. Стеллер Г. В. Дневник плавания с Берингом к берегам Америки, 1741–1742/ Г. В. Стеллер. - М. : Изд-во «ПАН», 1995. – С.224.

49. Цунами. Япония. 1854 // Livejournal. URL: <https://callmycow.livejournal.com/42041.html> (дата обращения: 15.11.22).

50. Suppasri A. Fragility Curves Based on Data from the 2011 Tohoku-Oki Tsunami in Ishinomaki City, with Discussion of Parameters Influencing Building



Damage/Earthquake Spectra / A. Suppasri, I. Charvet, K. Imai, F. Imamura // Earthquake Spectra. – 2019. – Vol. 31. – №2. – P. 841-868.

51. Bourgeois J. The 1997 Kronotsky earthquake and tsunami and their predecessors, Kamchatka, Russia / J. Bourgeois, T. Pinegina // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2018. – №18 (1). – P. 335-350.

52. Никонов А.А. Курильская катастрофа 1952 г., вызванная цунами/ А.А. Никонов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2006. – №2. - С.48-58.

53. Шевченко Г.В. Цунами 5 ноября 1952 г. в Северо-Курильске и его эхо в последующие 70 лет/ Г.В Шевченко, Т.Н. Ивельская, В.М. Кайстренко // Природа. – 2022. – №4(1280). – С.12-26.

54. Гусяков В.К. Цунами на дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика/ В.К. Гусяков // Геология и геофизика. – 2016. – Том 57. – №9. – С.1601-1615.

55. Никонов А.А. Волна, которая обошла весь мир/ А.А. Никонов // Природа. – 2005. – №5(1077). – С.23-29.

56. Синельщикова Е. Как за несколько минут целый советский город исчез с лица земли // Узнай Россию. URL: <https://ru.russiabeyond.com/read/1782-severo-kurilsk-tsunami-1952> (дата обращения: 10.03.23).

57. Цунами. Памятка для жителей Приморского края // Примпогода. URL:[https://primpogoda.ru/articles/sezonnnye\\_osobennosti/cunami\\_pamyatka\\_dlya\\_zhit\\_elej\\_primorskogo\\_kraja](https://primpogoda.ru/articles/sezonnnye_osobennosti/cunami_pamyatka_dlya_zhit_elej_primorskogo_kraja) (дата обращения: 08.04.23).

58. Скоркина А.А. К вопросу оперативной оценки магнитуды на близких расстояниях в системе предупреждения о цунами (СПЦ) на Дальнем Востоке России/ А.А. Скоркина, Д.А. Ототюк, В.М. Нановский, Д.В. Чебров // Сборник научных трудов по материалам IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 2 томах. Том 1. Пермский государственный национальный исследовательский университет. – 2016. – С.365-368.

59. Зыскин И.А. Российская система предупреждения о цунами нового поколения - анализ практики функционирования/ И.А. Зыскин, Шершаков В.М., Камаев Д.А. // Материалы XIX Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. – 2014.– С.134-143.

60. Кулаков В.В. Катастрофический оползень и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС (бассейн Амура) / В. В. Кулаков, А. Н. Махинов, В. И. Ким, А. В. Остроухов// Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2019. – №3. – С.12-20.

61. Крамарева Л.С. Наблюдение зоны обрушения сопки в районе реки Бурей 11 декабря 2018 года / Л. С. Крамарева, Е. А. Лупян, Ю.А. Амельченко и др.// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т.15. – №7. – С. 266-271.

62. Остроухов А.В. Оценка морфометрических параметров оползня на Бурейском водохранилище и его последствий на основе ДДЗЗ и данных полевых измерений / А. В. Остроухов, В. И. Ким, А. Н. Махинов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – №1. – С. 254-258.

63. Махинов А.Н. Оползень и цунами на реке Бурее 11 декабря 2018 года/ А.Н. Махинов // Природа. – 2019. – № 4 (1244)– С.12-22.

64. Улучшение эксплуатационных характеристик Сарафовского рыбного порта // Сарафово Инфо. URL: [https://www.sarafovo.info/2016/06/blog-post\\_23.html](https://www.sarafovo.info/2016/06/blog-post_23.html) (дата обращения: 01.04.23).

65. Japan Is Building A Massive 250-Mile Seawall To Block Tsunamis // BuzzFeed News. URL: <https://www.buzzfeednews.com/article/mbvd/japan-is-building-a-massive-250-mile-seawall-to-block-tsunam> (дата обращения: 01.04.23).

66. Удовиченко В.Н. Морские и речные гидротехнические сооружения/ В.Н. Удовиченко, П.И.Яковлев. – М.: Издательство «Транспорт», 1976. – С.11-18.

67. Смирнов Г.Н. Порты и портовые сооружения/ Г.Н. Смирнов, В.В. Аристархов, С.Н. Левачев, А.Г. Сидорова, Е.А. Корчагин. - М.: Издательство АСВ, 2003. – С.193-250.

68. Balaclava Bay // Wikipedia. URL: [https://en.turkcewiki.org/wiki/Balaclava\\_Bay](https://en.turkcewiki.org/wiki/Balaclava_Bay) (дата обращения: 01.04.23).

69. Формы поперечного сечения оградительных сооружений // Студопедия. URL: <https://studopedia.info/4-231.html> (дата обращения: 19.04.23).

70. Сысоев С.В. Устройство и оборудование морских портов. Учебное пособие / С.В. Сысоев. - ВМПК,2013. – С.79.

71. Беляев Н.Д. Морские гидротехнические сооружения. Основы, содержание и методика курсового проектирования. Учебное пособие / Н.Д. Беляев, М.Е. Миронов. - СПб.: Издательство Политехнического университета, 2013.– С.10.

72. Защита территорий от волн цунами // Studizba. URL: <https://studizba.com/lectures/bezopasnost-zhiznedeyatelnosti-i-ohrana-truda/inzhenernoe-obespechenie-meropriyatiy-v-chs/846-zaschita-territoriy-ot-voln-cunami.html> (дата обращения: 04.04.23).

73. СП 292.1325800.2017. Свод правил. Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования. 2017.

74. Кантаржи И. Г. Численное и физическое моделирование в МГСУ морских портовых гидротехнических сооружений / И.Г. Кантаржи, К.П. Мордвинцев // Ежеквартальный научный журнал «Наука и Безопасность». – 2015.– № 2(15). – С. 2–15.

75. Волкова Е. С. Отчет о научно-исследовательской работе. Оценка волногасящей способности разрабатываемых гидротехнических сооружений методом гидравлического моделирования в волновом лотке. / Е. С. Волкова, А. Ю. Ивасюк, В. М. Лактионов, Ю.П. Грабчилов, А.П. Кириленко. – Сочи: Филиал ОАО ЦНИИС «НИЦ «Морские берега», 2019. – С.34.

76. Кантаржи И.Г. Физическое и численное моделирование волн у портовых гидротехнических сооружений / И.Г. Кантаржи // Береговая зона – взгляд в будущее: Материалы XXV международной береговой конференции. – 2014.– С.13–17.

77. Кантаржи И.Г. Численное и физическое моделирование портовых гидротехнических сооружений / И.Г. Кантаржи, Н.В. Шунько // Сборник материалов Международной научной конференции. Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. – 2015.– С. 639–643.

78. Пиляев С.И. К вопросу о моделировании волнения на акваториях портов, защищенных оградительными сооружениями / С. И. Пиляев, Р. Н. Гусаров, Е. Е. Сотников // Научное обозрение. – 2016. – №3. – С.36-41.

79. Пиляев С.И. Особенности моделирования волновых процессов на акваториях портов/ С. И. Пиляев// Вестник МГСУ. – 2011. – Том 2. – №4 – С.30-35.

80. Юмашева М.А. Экспериментальное обоснование гидродинамической структуры потока при его взаимодействии с донными защитными покрытиями: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук/ М.А. Юмашева. - М.: НИУ МГСУ, 2019. – С. 50–65.

81. Шелушинин Ю.А. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах / Ю.А. Шелушинин, К.Н. Макаров // Строительство: наука и образование. – 2019.– Том 2.– № 2(32). – С. 1–15.

82. Материально-техническая база. НОЦ «Гидротехника» // НИУ МГСУ. URL:[https://press.mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/Gidravl\\_i\\_gidroteh\\_str/material-technical-base/](https://press.mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/Gidravl_i_gidroteh_str/material-technical-base/) (дата обращения: 16.04.23).

83. Методическое пособие «Проектирование зданий и сооружений в цунамиопасных районах» // Москва. – 2018.

84. Кантаржи И.Г. Физическое моделирование воздействия волн цунами на береговые сооружения / И.Г. Кантаржи, А.Н. Акулинин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2017.– Том 10.– № 3. – С. 78–90.

85. Wiegel R.L. Laboratory studies of gravity waves generated by the movement of a submerged body / R.L. Wiegel // *Transactions of the American Geophysical Union*. – 1955.– Vol. 36.– № 5. – С. 759–774.

86. Wiegel R.L. Waterwaves generated by landslides in reservoirs / R.L. Wiegel, E.K. Noda, E.M. Kuba, D.M. Gee, G.F. Tornberg // *Transactions of the American Geophysical Union*. – 1970.– № 96(WW2). – С. 307–333.

87. Heller V. Improved landslide-tsunami predictions: effects of block model parameters and slide model / V. Heller, J. Spinneken // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2013.– Vol. 118.– № 3. – С. 1489–1507.

88. Heller V. Landslide generated impulse waves in reservoirs - Basics and computation. / V. Heller, W.H. Hager, H.E. Minor – VAW-Mitteilung 211, edited by R. Boes, ETH Zurich, Zurich, 2009. – P.106.

89. Heller V. Geometrical effects on landslide-generated tsunamis / V. Heller, M. Moalemi, R.D. Kinnear, R.A. Adams // *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering Impact Factor & Key Scientometrics*. – 2012. – № 138(4). – С. 286-298.

90. Mohammed F. Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides / F. Mohammed, H.M. Fritz // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2012.– Vol. 117.– № C11015 – С. 1–20.

91. Mohammed F. Experiments on tsunamis generated by 3D granular landslides / F. Mohammed, H.M. Fritz // *Submarine Mass Movements and Their Consequences, Adv. Nat. Technol. Hazards Res.* – 2010.– Vol. 28.– P. 705–718.

92. Mohammed F. Tsunami generation by 3D deformable granular landslides, in *Solutions to Coastal Disasters 2011* / F. Mohammed, B. C. McFall, H.M. Fritz // *Proceedings of the 2011 Solutions to Coastal Disasters Conference, June 25–29* – 2011.– P. 98–108.

93. Hofland B. Wave measurement techniques for the new largescale Delta Flume / B. Hofland, R. Hoffmann, R. Lindenbergh // Proceedings Coastlab2012 – 2012.– P. 1–10.
94. Hofland B. Description of the new Delta Flume / B. Hofland, I. Wenneker, M. van Gent // Proceedings Coastlines, Marine – 2013.
95. Hammack, J. L. 1972 Tsunamis: a model of their generation and propagation / J. L. Hammack. - Laboratory of Hydraulics and Water Resources Report, 28. California Institute of Technology , Pasadena, CA., 1972. – C.1-261.
96. Hammack J.L. A note on tsunamis: their generation and propagation in an ocean of uniform depth / J. L. Hammack // Journal of Fluid Mechanics. – 1973.– Vol. 60.– P. 769–799.
97. Rossetto T. Analysis of tsunami hazards by modelling tsunami wave effects/ T. Rossetto, W. Allsop, D. Robinson, I. Charvet, B. Pierre-Henri // Flood Risk Management. – 2008. – 30 September to 2 October – P.515–521.
98. Allsop W. A Unique tsunami generator for physical modeling of violent flows and their impact/ W. Allsop, D. Robinson, I. Charvet, T. Rossetto, R. Abernethy // Proceedings of International Conference in Ocean Engineering, ICOE 2009 IIT Madras, Chennai, India. – 1-5 Feb. 2009. – P.1–9.
99. Charvet I. Physical modelling of violent flows and their impact using a new tsunami generator/ I. Charvet, W. Allsop, T. Rossetto, D. Robinson, P.H. Bazin, T. Robinson // WCCE – ECCE – TCCE Joint Conference: Earthquake & Tsunami. – January 2010. – P.1–9.
100. Charvet I. Advances in physical modelling of nearshore tsunami waves and their impact using a unique tsunami generator/ I. Charvet, T. Rossetto, W. Allsop, T. Lloyd, T. Robinson, D. Robinson // Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering Compte Rendu de la 9ième Conférence Nationale Américaine et 10ième Conférence Canadienne de Génie Parasismique. – 25-29 July 2010. – P.1848.

101. Rossetto T. Physical modelling of tsunami using a new pneumatic wave generator / T. Rossetto, W. Allsop, I. Charvet, D.I. Robinson // Coastal Engineering. – 2011.– Vol. 58. – № 6. – С. 517–527.

102. Charvet I. New tsunami runup relationships based on long wave experiments / I. Charvet, I. James, T. Rossetto // Ocean Modelling. – 2013. – №69 – P.79–92;

103. Allsop W. Improvements in the physical modelling of tsunamis and their effects/ W. Allsop, I. Chandler, M. Zaccaria // Proceedings of the 5th International Conference on The Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Coastlab14, Varna, Bulgaria. – 29 Sep.-2 Oct.. 2014. – P.1–22.

104. Chandler I. Understanding wave generation in pneumatic tsunami simulators/ I. Chandler, W. Allsop, I.B. Granged, D.J. McGovern // Proceedings of the 6th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science, Ottawa, Canada – 10-13 May 2016. – P.1–10.

105. McGovern D.J. Pneumatic long-wave generation of tsunami-length waveforms and their runup / D.J. McGovern, I.D. Chandler, D.I. Robinson, W. Allsop // Coastal Engineering. – 2017.– Vol. 138. – P. 80–97.

106. Алексеева А. В. Размыв дна у гравитационной платформы от фронтального воздействия регулярных волн и течений / А.В. Алексеева, Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, К.К. Семенов, Д.И. Щемелинин // Гидротехническое строительство. – 2018.– № 1. – С. 35–44.

107. Беляев Н.Д. Методика расчета экстремальных нагрузок на плавучий объект от прямого воздействия волн цунами на основе экспериментальных исследований / Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, К.К. Семенов, Д.И. Щемелинин // Гидротехническое строительство. – 2022.– № 3. – С. 46–50.

108. Alekseeva A. V. Seafloor scour near gravity platforms from the frontal impact of regular waves and currents / A.V. Alekseeva, N. D. Belyaev, V. V. Lebedev, I. S. Nudner, K. K. Semenov, D. I. Shchemelinin // Power Technology and Engineering. – 2018.– Vol. 52.– № 2. – P. 152–161.

109. Nudner I.S. Numerical model of the hydrowave laboratory for studying the interaction of sea waves with hydrotechnical structures / I. S. Nudner, K. K. Semenov, V. V. Lebedev, G.S. Khakimzyanov, Y.N. Zakharov // Computational technologies. – 2019.– Vol. 24.– № 1. – P. 86–105.

110. Zakharov Y.N. Mathematical modeling of a hydraulic flume for carrying out numerical experiments on coastal waves and erosion of cohesive soil / Y.N. Zakharov, A.I. Zimin, I. S. Nudner, M.E. Yashin // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. – 2020.– Vol. 1441.– № 1. – P. 012182.

111. Беляев Н.Д. Экспериментальные исследования воздействия волн типа цунами на грунт у оснований морских гравитационных платформ / Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, А.В. Мишина, К.К. Семенов, Д.И. Щемелинин // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – №6. – С.4–12.

112. Доценко С.Ф. Накат одиночной волны цунами на наклонный берег/ С.Ф. Доценко // Морской гидрофизический журнал. – 2005.. – №4. – С.11–18.

113. Диденкулова И.И. Накат одиночных волн различной формы на берег/ И.И. Диденкулова, Куркин А.А., Е.Н. Пелиновский // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Том 43. – №3. – С.419– 425.

114. Tadepalli, S. The Run-Up of N-Waves on Sloping Beaches, Proceedings of the Royal Society A / S. Tadepalli, C. E. Synolakis // Proceedings of the Royal Society A. – 1994.– №445(1923) .– С. 99– 112.

115. Titov V.V. Modeling of breaking and nonbreaking long-wave evolution and runup using VTCS-2/ V.V. Titov, C. E. Synolakis // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. – 1995. – Vol. 121. – №6. – P. 308-316.

116. Madsen P.A. On the Solitary Wave paradigm for Tsunamis / P.A. Madsen, D.R. Fuhrman, H.A. Schäffer // Journal of Geophysical Research. – 2008. – Vol. 113. – №C12. – P. 2169–9380.

117. Boussinesq, J. The'orie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquid contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond / J. Boussinesq // Journal de Mathématiques Pures et Appliquées. – Vol.17.– P.55–108.



118. Charvet I. Physical Modelling/ I. Charvet, I. Eames, T. Lloyd, T. Robinson, // UCL Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering. – P.1.
119. Rayleigh L. On waves / L. Rayleigh // Philosophical Magazine. – 1 – P.257–279.
120. Russell J. S. Report on waves / J.S. Russell // Report of the 14th Meeting of the British Association for the Advancement of Science, 1844. – 1844. – P. 311–390.
121. Пиляев С.И. Волновые расчеты при проектировании портов. Учебное пособие / С.И. Пиляев, Н.А. Губина – НИУ МГСУ, 2010. – С.1–94.
122. Левачев С. Н. Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа. Ч.2. Порты и портовые сооружения / С.Н. Левачев, Е.А. Корчагин, С.И. Пиляев, Кантаржи И.Г. – М.: АСВ, 2015. – С.1534.
123. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений / И.И. Леви. - ООО М.: Энергия, 1967. – С.1-235.
124. Пиляев С.И. О моделировании волнения на крупномасштабных пространственных моделях портовых акваторий / С. И. Пиляев, Р. Н. Гусаров, Е. Е. Сотников // Научное обозрение . – 2016. – №14. – С.58-61;
125. 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.
126. HM162. Experimental Flume 309x450mm / U. Linke. Hamburg : GUNT Gerätebau GmbH. – 2013. – С.52 p.
127. Юмашева, М.А. Экспериментальные исследования скоростных характеристик потока при его взаимодействии с гибкими защитными покрытиями / М.А. Юмашева, Ю.В. Брянская // Гидротехническое строительство. - 2018. - №10. – С.6-10.
128. Брянская, Ю.В. Гидравлические характеристики потока при обтекании защитных бетонных матов / Брянская Ю.В., В.С. Боровков, И.А. Рылова, М.А. Юмашева // Гидротехническое строительство. - 2016. - №10. - С.132-137.

129. 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.

130. 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.

131. 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.

132. 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.

133. 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.

134. 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.

135. Гусаров Р.Н. Физическое моделирование длинных волн / Р.Н. Гусаров // Гидротехническое строительство. – 2022.– № 5. – С. 50–53.

136. 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.

137. 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.

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

139. Wave Gauge system. User manual / HR Wallingford. . – May, 2013. – P. 1-3.

140. Цунами, формирование волн, признаки приближения к берегу, подготовка и поведение во время и после цунами // Survinat. Энциклопедия выживания. URL: <https://survinat.ru/2018/11/cunami-formirovanie-voln-priznaki-priblizhenija> (дата обращения: 27.04.23).

141. Причины и последствия цунами // РИА Новости. URL: <https://ria.ru/20110311/344797796.html?in=t> (дата обращения: 27.04.23).

142. Вольцингер Н.Е. Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский. –Л.: Гидрометеиздат, 1989.– С.272.

143. Родин А. А., Пелиновский Е. Н. Динамика длинных волн в прибрежной зоне моря с учетом эффектов обрушения / А. А. Родин, Е. Н. Пелиновский – Нижний Новгород: 2014 – С.5– 22.

144. Tsunami Pictures // Tsunamis.com. URL: <http://www.tsunamis.com/tsunami-pictures.html> (дата обращения: 25.04..23).

145. Цунами и другие последствия землетрясения в Японии // Big Picture. URL: <https://bigpicture.ru/cunami-i-drugie-posledstviya-zemletryaseniya-v-yaponii/> (дата обращения: 25.04.23).

146. Стокер Дж. Волны на воде / Дж. Стокер. – М.: ИЛ, 1959. – С.618.

147. Шулейкин В.В. Физика моря / В.В. Шулейкин. – М: Наука, 1968. – 1083 с.

148. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский.– Горький: ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
149. Арсеньев А.С. Динамика морских длинных волн / А.С. Арсеньев, Н.К. Шелковников.– М.: МГУ, 1991.– 88 с.
150. Диденкулова И.И. Накат нелинейно деформированных волн на берег / И.И. Диденкулова, Н. Заибо, А.А. Куркин, Б.В. Левин, Е.Н. Пелиновский, Т. Соомере // Доклады Академии Наук.– 2006а.– Т. 410. – № 5. – С. 676– 678.
151. Zahibo N. Analytical and numerical study of nonlinear effects at tsunami modeling / N. Zahibo, E. Pelinovsky, T. Talipova, A. Kozelkov, A. Kurkin // Applied Mathematics and Computation. – 2006. –Vol. 174(2).–P. 795– 809.
152. Favre H. Etude Théorique et Expérimentale des Ondes de Translation dans les Canaux Découverts (Theoretical and Experimental Study of Travelling Surges in Open Channels) / H. Favre // Dunod Edition. (in French). Paris, France, 1935. – P. 215.
153. Накамура, С. О гидравлическом боре и применении результатов его изучения к проблеме возникновения и распространения цунами / С. Накамура // Волны цунами. Труды СахКНИИ. Южно-Сахалинск. Вып. 32. – 1973. – С. 129– 151.
154. Tsuji, Y. Tsunami ascending in rivers as an undular bore / Y. Tsuji, T. Yanuma, I. Murata, S. Fujiwara // Natural Hazards. –1991. –Vol. 4.–P. 257-266.
155. Пелиновский, Е.Н. Распространение длинных волн в проливах / Е.Н. Пелиновский, Е.Н. Трошина // Морские гидрофизические исследования. –1993. – № 1. – С. 47-52.
156. Вольцингер, Н.Е. Длинные волны на мелкой воде / Н.Е. Вольцингер – Л.: Гидрометеиздат, 1985.–С.160.
157. Курант, Р. Сверхзвуковое течение и ударные волны / Р. Курант, К. Фридрихс. – М.: Издательство иностранной литературы, 1950. – С.426.
158. Ле Меоте Б. Введение в гидродинамику и теорию волн на воде / Б. Ле Меоте – Л.: Гидрометеиздат, 1974 – С.277– 278.
159. Miller, D.J. (1960), Giant waves in Lituya Bay, Alaska. Geological Survey Professional Paper No. 354-C, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

160. Müller, L. (1964), The rock slide in the Vajont Valley, *Rock Mech. Eng. Geol.*, 2(3-4), P.148–212.
161. Slingerland, R.L. Occurrences, properties and predictive models of landslide-generated impulse waves / R.L. Slingerland, B. Voight. - *Rockslides and avalanches*, vol. 2, edited by B. Voight, 1979. – P.317-397.
162. Huber A. Impulse waves in Swiss lakes as a result of rock avalanches and bank slides / A. Huber // *Proceedings 14th Congrès des Grands Barrages*, Rio de Janeiro, ICOLD, Paris. – 1982.– P.455-476.
163. Panizzo A.P. Great landslide events in Italian artificial reservoirs / A.P. Panizzo, P. De Girolamo, M. Di Risio, A. Maistri, A. Petaccia // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2005(a).– № 5(5). – P. 733–740.
164. Walder J.S. Tsunamis generated by subaerial mass flows / P. Watts, O.E. Sorensen, K. Janssen // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. –Vol. 108.– № B5. – P. 2236(2).
165. Fritz H.M. Near field characteristics of landslide generated impulse waves / H.M. Fritz, W.H. Hager, H.E. Minor // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. – 2004. –Vol. 130.– № 6. – P. 287–302.
166. Panizzo A.P. Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides / A.P. Panizzo, P. De Girolamo, A. Petaccia // *Journal of Geophysical Research*. – 2005(b). –Vol. 110.– № C12. – P. 1–23.
167. Heller V. Impulse product parameter in landslide generated impulse waves / V. Heller, P. W.H. Hager // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. – 2005(b). –Vol. 136.– № 3. – P. 145–155.
168. Quecedo M. M. Numerical modeling of impulse wave generated by fast landslides / M. M. Quecedo, M. Pastor, M.I. Herreros // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2004. – № 59. – P. 1633–1656.

169. Liu, P.L.-F. Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses / P.L.-F. Liu, T.-R. Wu, F. Raichlen, C.E. Synolakis, J.C. Borrero // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2005. – Vol. 536. – P. 107–144.

170. Lynett, P. A numerical study of the run-up generated by three-dimensional landslides / P. Lynett, L.-F. Liu // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110. – P. 1–16.

171. Løvholt, F. Oceanic propagation of a potential tsunami from the La Palma Island / F. Løvholt, G. Pedersen, G. Gisler // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – Vol. 113. – № C9. – P. 1–21.

172. Abadie S. Numerical simulation of waves generated by landslides using a multiple-fluid Navier-Stokes model / S. Abadie, D. Morichon, S. Grilli, S. Glockner // *Coastal Engineering*. – 2010. – Vol. 57. – № 9. – P. 779–794.

173. Abadie S. Numerical modeling of tsunami waves generated by the flank collapse of the Cumbre Vieja Volcano (La Palma, Canary Islands): Tsunami source and near field effects / S. Abadie, J. C. Harris, S. Grilli, R. Fabre // *Journal of Geophysical Research*. – 2012. – Vol. 117. – № C5. – P. 1–26.

174. Giachetti T. Numerical modelling of the tsunami triggered by the Güimar debris avalanche, Tenerife (Canary Islands): Comparison with field-based data / T. Giachetti, R. Paris, K. Kelfoun, F.J. Pérez-Torrado // *Marine Geology*. – 2011. – Vol. 284. – № 1–4. – P. 189–202.

175. Kamphuis J.W. Impulse waves generated by landslides / J.W. Kamphuis, R.J. Bowering // *Proceedings 12th Coastal Engineering Conference*. – 1972. – Vol.1.– P. 575–588.

176. Monaghan J.J. Scott Russell's wave generator / J.J. Monaghan, A. Kos // *Physics of Fluids*. – 2000. – Vol. 12. – № 3. – P. 622–630.

177. Walder J.S. Tsunamis generated by subaerial mass flows / J.S. Walder, P. Watts, O.E. Sorensen, K. Janssen // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108. – № B5. – P. 2236(2).

178. Heller V. Optimising landslide-tsunami prediction based on physical model tests / V. Heller, J. Spinneken // Proceedings 2nd European conference of IAHR, paper B22, Munich, IAHR, Madrid. – 2012.– P.1–16.
179. Huber A. Forecasting impulse waves in reservoirs / A. Huber, W.H. Hager // Proceedings 19th Congrès des Grands Barrages, Florence, ICOLD, Paris. – 1997.– P. 993–1005.
180. Cruden D.M. Landslide types and processes, in Landslides / D.M. Cruden, W.H. D.J. Varnes // Special report 247. – 1996.– P. 36–75.
181. Heller V. Discussion of “Experimental investigation of impact generated tsunami; related to a potential rock slide / V. Heller, R.D. Kinnear // Coastal Engineering. – 2010. – Vol. 57. – № 8. – P. 773–777.
182. Noda E. Water waves generated by landslides / E. Noda // Journal of the Waterways. – 1970. – Vol. 96. – № WW4. – P. 835–855.
183. Ataie-Ashtiani B. Impulsive waves caused by subaerial landslides / B. Ataie-Ashtiani, A. Nik-Khah // Environmental Fluid Mechanics. – 2008. – № 8. – P. 263–280.
184. Zweifel A. Impulswellen: Effekte der Rutschdichte und der Wassertiefe. PhD Thesis / A. Zweifel. - ETH Zurich, Zurich, 2004. – P. 217.
185. Satake K. Tsunami Field Survey of the 1992 Nicaragua Earthquake/ K. Satake, J. Bourgeois, K. Abe, K. Abe, T. Yoshinobu, F. Imamura, I. Y. Iio, H. Katao, E. Noguera, F. Estrada// Eos. – 1993. – Vol.74. – №13. – P.145–160.
186. Ide S. Source characteristics of the Nicaraguan Tsunami Earthquake of September 2, 1992/ S. Ide, F. Imamura, K. Abe// Geophysical Research Letters.– 1993. – Vol.20. – №9. – P.863-866.
187. Satake K. Linear and Nonlinear Computations of the 1992 Nicaragua Earthquake Tsunami/ K. Satake // PAGEOPH,.– 1995. – Vol.144.. – P.455–470.
188. Higman B. Deposits of the 1992 Nicaragua tsunami/ B. Higman, J. Bourgeois // Tsunamiites,.– 2021. – №1. – P.85–107.
189. Цуканова Е.С. Численное моделирование окуширского цунами (Хоккайдо) 1993 года/ Е.С.Цуканова, И.П. Медведев, А.Ю. Медведева//

Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых. Москва.– 2021.– С.436–437.

190. Sif Gylfadottir S. The 2014 Lake Askja rockslide-induced tsunami: Optimization of numerical tsunami model using observed data/ S. Sif Gylfadottir, J. Kim, J. Kristinn Helgason , S. Brynjólfsson, A. Hoskuldsson, T. Jóhannesson, C. Bonnevie Harbitz, F. Løvholt // Journal of Geophysical Research: Oceans.– 2017. – Vol.122. – № 5. – P. 4110–4122.

191. Rauter M. Granular porous landslide tsunami modelling – the 2014 Lake Askja flank collapse / M. Rauter, S. Viroulet, S. Sif Gylfadóttir, W. Fellin, F. Løvholt // Nature communications. – 2022. – № 2. – P. 1–13.

192. Abdalazeez A. Nonlinear deformation and run-up of single tsunami waves of positive polarity: numerical simulations and analytical predictions / A. Abdalazeez, I. Didenkulova, D. Dutykh // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2019. – №19. – P. 2905–2913.

193. Didenkulova I. Effect of asymmetry of incident wave on the maximum runup height / I. Didenkulova, P. Denissenko, A. Rodin, E. Pelinovsky // Journal of Coastal Research. – 2013. – №65. – P. 207–212.

194. Mulligan R.P. Simulations of Landslide Wave Generation and Propagation Using the Particle Finite Element Method / R. P. Mulligan, A. Franci, M. A. Celigueta, W. A. Take// Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2020. – Vol.125. – № 6. – P. 1–17.

195. Heller V. Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2007. P. 1–178.

196. СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). 2018.

197. Siffer, T., 2005. “Mercator” depth gauge recording of 26 December 2004 tsunami. Ref Type: Data File From the Meteorological Database of the Netherlands. Previously available at <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/zeer-zware-aardbeving-en-tsunami-in-azie>



198. Haiti Earthquake 2010. // ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/haiti-earthquake-2010> (дата обращения: 17.08.22).

199. Сейши. Динамические явления в озерах // Озера России. URL: <https://ozera.info/lakes/about/science/limnology/seiches> (дата обращения: 20.08.22).

200. Goda, Y. A new method of wave pressure calculation for the design of composite breakwater / Y. Godal // In Proceedings of the 14th Conference on Coastal Engineering. – 1974. – P. 1702–1720.

201. Зайцев А. И. Отчет о научно-исследовательской работе по прогнозу волнового режима и детальное цунами районирование по объекту: «Рыбный порт» входящий в состав проекта реконструкции объектов портовой инфраструктуры в морском порту Корсаков «Логистический технопарк (Корсаковский порт)» (причалы БПН-1, БПН-2, причалы №1, №2, №3, Южный мол, Средний мол, Северная берегоукрепительная стенка), расположенных в Среднем ковше морского порта Корсаков на участках с кадастровым номером 65:04:0000037:101 и 65:04:0000037:82, по адресу: Сахалинская область, Корсаковский р-н, г Корсаков, ул. Портовая, д 2. / А.И. Зайцев, Е. Н. Пелиновский, И. Г. Кантаржи, А.Г Гогин, И.С. Костенко, А.А. Москвитин, Л.С. Шабрамова. – Южно-Сахалинск: СКБ САМИ ДВО РАН, 2022. – С.3–145.

202. The tsunami of 22 may 1960, in the Samoa and Cook Islands // Tsunami Digital Library. URL: <https://tsunami-dl.jp/document/070> (дата обращения: 20.04.2023).

203. Japan Tsunami 2011 // Southern California costal ocean observing system. URL: <https://sccoos.org/projects/2011-japan-tsunami/> (дата обращения: 20.04.2023).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМАТИКЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

За время проведения научных исследований и подготовки диссертационной работы, полученные результаты были 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.

### 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:

1. 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:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

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

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ДОКУМЕНТЫ ПО ПАТЕНТУ НА РАЗРАБОТАННУЮ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНУЮ УСТАНОВКУ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 220024**

**Универсальный генератор волн типа цунами различной  
формы**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный университет" (НИУ  
МГСУ) (RU)*

Авторы: *Гусаров Роман Николаевич (RU), Кантаржи  
Измаил Григорьевич (RU)*

Заявка № 2023109613

Приоритет полезной модели 14 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 21 августа 2023 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 14 апреля 2033 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) **220 024** (13) U1

(51) МПК  
 G01M 10/00 (2006.01)  
 G09B 25/06 (2006.01)  
 (52) СПК  
 G01M 10/00 (2023.05)  
 G09B 25/06 (2023.05)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 21.08.2023)

<p>(21)(22) Заявка: <a href="#">2023109613</a>, 14.04.2023</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: <b>14.04.2023</b></p> <p>Дата регистрации: <b>21.08.2023</b></p> <p>Приоритет(ы):        (22) Дата подачи заявки: <b>14.04.2023</b></p> <p>(45) Опубликовано: <b>21.08.2023</b> Бюл. № <b>24</b></p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2652643 C1, 28.04.2018. RU 2016109423 A, 18.09.2017. RU 127987 U1, 10.05.2013. SU 901872 A1, 30.01.1982. CN 110196150 B, 20.11.2020.</p> <p>Адрес для переписки:        129337, Москва, Ярославское ш., 26, МГСУ,        начальнику отдела реестра и        капитализации интеллектуальной        собственности Кольчугину Д.Ю.</p>	<p>(72) Автор(ы):        Гусаров Роман Николаевич (RU),        Кангаржи Измаил Григорьевич (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и):        Федеральное государственное бюджетное        образовательное учреждение высшего        образования "Национальный        исследовательский Московский        государственный строительный        университет" (НИУ МГСУ) (RU)</p>
---	---

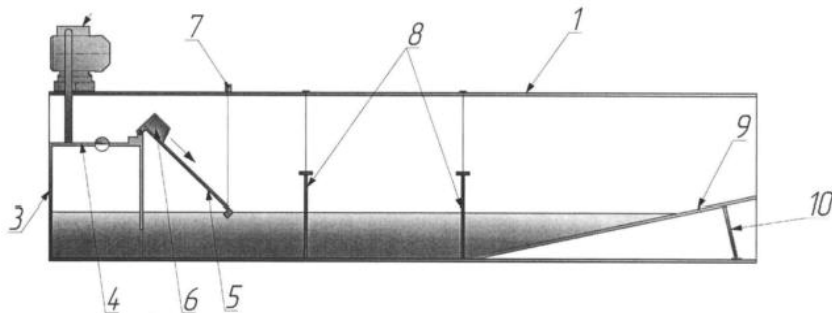
## (54) Универсальный генератор волн типа цунами различной формы

## (57) Реферат:

Полезная модель относится к области гидротехнического строительства и может быть использована при проверке моделей проектируемых гидротехнических сооружений на воздействие различных по форме волн цунами. Универсальный генератор волн типа цунами различной формы содержит гидравлический лоток для проведения опытов, вакуумный насос, резервуар, клапан для подачи воздуха в резервуар, датчики волнографы, наклонную поверхность, имитирующую береговой откос, металлический стержень, регулирующий наклон этой поверхности, и регулирующую наклонную поверхность для моделирования оползневых цунами и лебедку. Наклонная поверхность, имитирующая береговой откос, одним концом крепится к дну гидравлического лотка для проведения опытов, а плоскостью опирается на металлический стержень, регулирующий наклон поверхности, имитирующей береговой откос. Регулируемая наклонная поверхность выполнена с возможностью запуска блока для моделирования оползневых цунами и крепится одним концом к верхней плоскости резервуара, а нижним концом зацеплена за трос лебедки, длина которого позволяет менять угол наклона регулируемой наклонной поверхности. Технический результат заключается в создании универсального генератора волн типа цунами различной формы. Универсальный генератор способен воспроизводить как волны сейсмического происхождения, так и волны, вызванные



оползнями и падением других объектов в воду. 4 ил.



Фиг. 1

Полезная модель относится к области гидротехнического строительства и может быть использована при проверке моделей проектируемых гидротехнических сооружений на воздействие различных по форме волн цунами.

Цунами представляют собой огромные волны различной формы и поэтому при проектировании гидротехнических сооружений необходимо оценивать их возможное негативное воздействие. Для этих целей разрабатываются и используются различные системы моделирования таких волн.

Из уровня техники известна система моделирования морских волн цунами CN 11308956 A Offshore tsunami wave simulation system (Система моделирования морских волн цунами). Система моделирования морских волн цунами содержит бассейн для генерации морских волн цунами, устройство для генерации одиночных волн, первую дренажную систему и вторую дренажную систему. На дне морского бассейна образован водозаборник. Устройство для генерирования одиночных волн расположено в морском бассейне и расположено с одной стороны, вблизи первого конца, водоприемника. Недостатком данного аналога является моделирование только одного типа волн цунами - одиночных волн (солитонов).

Также известен пневматический цунами генератор, разработанный в университете HR Wallingford и описанный в научной статье: Rossetto T., Allsop W., Charvet I., Robinson D. «Physical modelling of tsunamis using a new pneumatic wave generation»), журнал Coastal Engineering, №58, 2011 г, с 517-527. Пневматический генератор из неразборной конструкции канала, металлического бака и пневматического насоса. Установка моделирует волны цунами, благодаря работе пневматического насоса. Недостатком данного аналога является моделирование только волн цунами, вызванных сейсмической активностью, а также тяжелая неразборная конструкция.

Прототипом заявленной полезной модели являются экспериментальная установка по моделированию волн цунами в НИУ МГСУ, описанная в научной статье: Гусаров Р.Н., Кантаржи И.Г., Волгин Г.В. «Теоретические и практические исследования длинных волн в НИУ МГСУ», журнал «Гидротехническое строительство»), №1, 2023 г, с 47-52.

Основной недостаток прототипа заключается в том, что в нем реализован только способ моделирования волн цунами сейсмического происхождения. Заявленный универсальный генератор способен воспроизводить волны и сейсмического происхождения и волны, вызванные оползнями и падениями других объектов в воду.

Технический результат, на достижение которого направлено предлагаемое техническое решение, является создание универсального генератора волн типа цунами различной формы, имеющего возможность в лабораторных условиях воспроизводить волновые воздействия от волн типа цунами различной формы, а также проводить исследования поведения данных волн.

Технический результат достигается тем, что предложена конструкция универсального генератора волн типа цунами различной формы, содержащая гидравлический лоток для проведения опытов, вакуумный насос, резервуар, клапан для подачи воздуха в резервуар, датчики и волнографы, наклонную поверхность, имитирующую береговой откос, металлический стержень, регулирующий наклон этой поверхности, и регулируемую наклонную поверхность для моделирования оползневых цунами и лебедку, при этом наклонная поверхность, имитирующая береговой откос, одним концом крепится к дну гидравлического лотка для проведения опытов, а плоскостью опирается на металлический стержень, регулирующий наклон поверхности, имитирующей береговой откос, а регулируемая наклонная поверхность выполнена с возможностью запуска блока для моделирования оползневых цунами и крепится одним концом к верхней плоскости резервуара, а нижним концом зацеплена за трос лебедки, длина которого позволяет менять угол наклона регулируемой наклонной поверхности.

Предлагаемое решение поясняется

фиг. 1 - схема универсального генератора волн типа цунами различной формы;

фиг. 2 - основные этапы проведения эксперимента (моделирование волн сейсмического происхождения);

фиг. 3 - основные этапы проведения эксперимента (моделирование волн от оползней);

фиг. 4 - рабочий чертеж универсального генератора волн типа цунами различной формы, на которых показаны следующие позиции:

- 1 - гидравлический лоток для проведения опытов;
- 2 - вакуумный насос;
- 3 - резервуар;
- 4 - клапан для подачи воздуха в резервуар;
- 5 - регулируемая наклонная поверхность для моделирования оползневых цунами;
- 6 - блок, имитирующий процесс схода оползня;
- 7 - лебедка
- 8 - датчики волнографы;
- 9 - наклонная поверхность, имитирующая береговой откос;
- 10 - металлический стержень, регулирующий наклон береговой поверхности.

Волновой генератор представляет собой следующую конструкцию: с одной стороны гидравлического лотка для проведения опытов (1) расположен универсальный сборный волнопродуктор - резервуар (3), соединенный с вакуумным насосом (2), к которому также прикреплена регулируемая наклонная поверхность для моделирования оползневых цунами (5). Данная регулируемая наклонная поверхность вышолнена с возможностью запуска блока для моделирования оползневых цунами (6). На другой стороне лотка установлена наклонная поверхность, имитирующая береговой откос (9), опирающаяся на металлический стержень, регулирующий наклон береговой поверхности (10).

Часть генератора способна воспроизводить волны типа цунами, вызванные оползнями или другими падающими объектами в воду (солитоны), путем размещения в лотке регулируемой наклонной поверхности для моделирования оползневых цунами (5), способной менять угол наклона, благодаря лебедке (7), прикрепленной к направляющим гидравлического лотка для проведения опытов (1), угол наклона поверхности для моделирования оползневых цунами (5) может регулироваться от 0 до 90°, под которым будет опускаться твердое тело - блок, имитирующий процесс схода оползня (6) в воду. Другая часть установки способна воспроизводить волны типа цунами от сейсмической активности (N-волны), благодаря резервуару (3), подключенному к нему вакуумному насосу (2) и воздушному клапану для подачи воздуха в резервуар (4). При воспроизведении N-волны, регулируемая наклонная поверхность для моделирования оползневых цунами (5), поднимается при помощи лебедки (7) и не мешает процессу воспроизведения волны, а при моделировании оползневого цунами наоборот выключается вакуумный насос (2) и опускается регулируемая наклонная поверхность для моделирования оползневых цунами (5). Для фиксации характеристик волн, а также формы волны, в гидравлическом лотке для проведения опытов (1) установлены два датчика волнографа (8). Датчики волнографы (8) возможно передвигать и устанавливать в любом сечении лотка.

Конструкция работает следующим образом, при моделировании сейсмических цунами в начале эксперимента включается вакуумный насос (2) и начинает откачивать воздух из резервуара (3), вследствие чего, вода в нем начинает подниматься, а уровень воды в гидравлическом лотке для проведения опытов (1) начинает понижаться. Как и в реальных условиях цунами, уровень воды опускается ниже спокойного уровня, когда перед ударной волной происходит понижение уровня воды в береговой зоне. Как только вода в резервуаре (3) достигает верхних отметок, открывается клапан для подачи воздуха в резервуар(4) и происходит освобождение набранного объема воды. Как только открывается клапан для подачи воздуха в резервуар (4), на выпускном отверстии резервуара (3) формируется волна.

При моделировании оползневых цунами, конструкция работает следующим образом.

В начале эксперимента, происходит фиксация регулируемой наклонной поверхности для моделирования оползневых цунами (5) под определенном углом наклона, после чего запускают блок, имитирующий процесс схода оползня (6), который соскальзывает в воду. При соприкосновении блока, имитирующего процесс схода оползня (6)с водой образуется волна.

Благодаря разработанному универсальному генератору появилась возможность качественно моделировать волны типа цунами, что позволит более детально изучать поведение данных волн в береговой зоне, а также воспроизвести волны цунами различной формы. Проведение экспериментов позволит проверять проектируемые гидротехнические сооружения на нагрузку от волн цунами. Таким образом, достигается заявленный технический результат.

#### Формула полезной модели

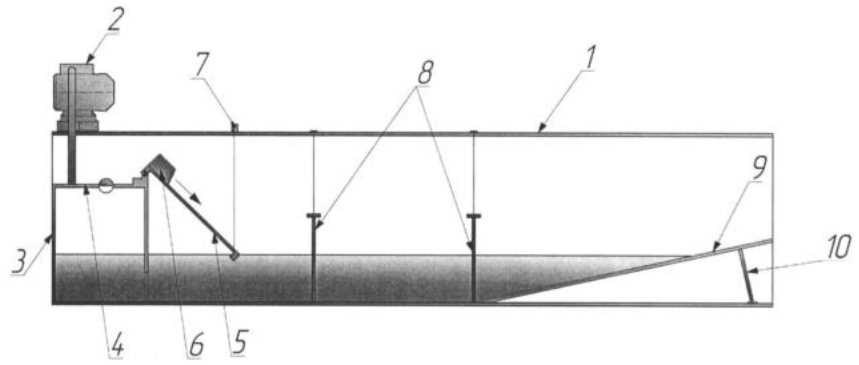
Универсальный генератор волн типа цунами различной формы, содержащий гидравлический лоток для проведения опытов, вакуумный насос, резервуар, клапан для подачи воздуха в резервуар, датчики-волнографы, отличающийся тем, что

25.08.2023, 11:49

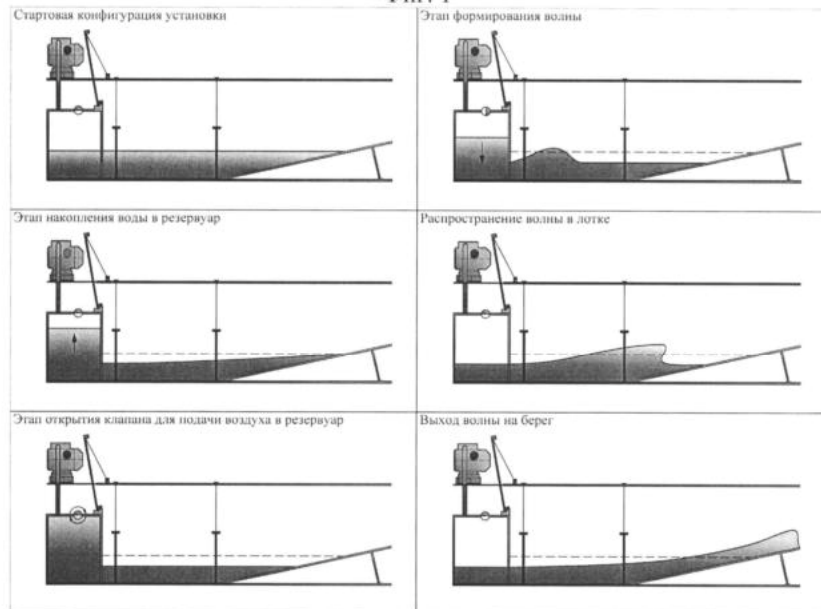
ПМ №220024

дополнительно содержит наклонную поверхность, имитирующую береговой откос, металлический стержень, регулирующий наклон этой поверхности, регулирующую наклонную поверхность для моделирования оползневых цунами и лебедку, при этом наклонная поверхность, имитирующая береговой откос, одним концом крепится к дну гидравлического лотка для проведения опытов, а плоскостью опирается на металлический стержень, регулирующий наклон поверхности, имитирующей береговой откос, регулируемая наклонная поверхность выполнена с возможностью запуска блока для моделирования оползневых цунами и крепится одним концом к верхней плоскости резервуара, а нижним концом зацеплена за трос лебедки, длина которого позволяет менять угол наклона регулируемой наклонной поверхности.

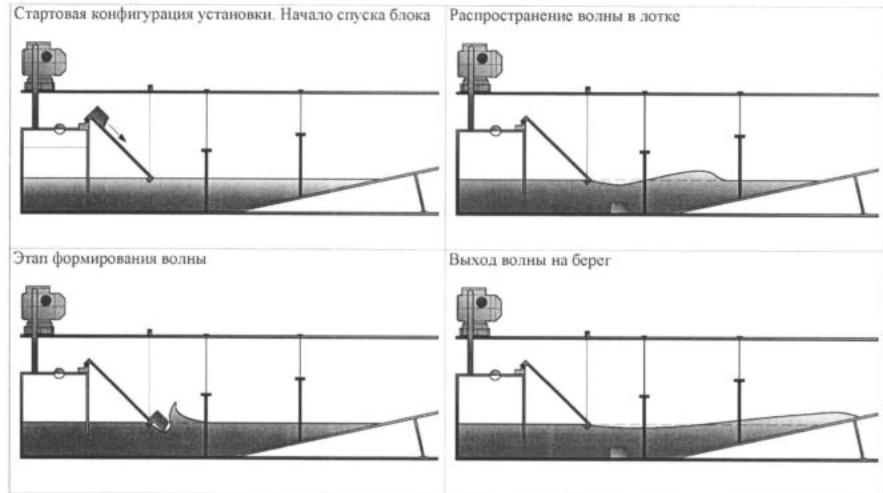




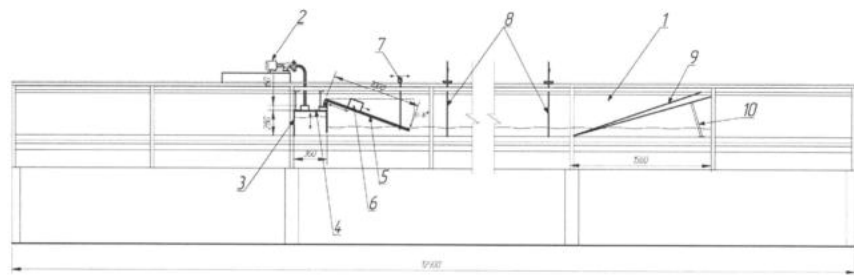
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4