

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора  
Александра I»

**Яковлев Антон Дмитриевич**

**Сейсмостойкость зданий и сооружений в цунамиопасных районах**

Специальность: 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения  
Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Белаш Т.А.

Санкт-Петербург-2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА .....	11
1.1 Природа происхождения цунами .....	11
1.2 Проявления цунами на тихоокеанском побережье .....	15
1.3 Магнитуда и интенсивность цунами.....	20
1.4 Последствия цунами .....	27
1.5 Защита от цунами.....	32
1.5.1 Цунамирайонирование территории .....	32
1.5.2 Нормативно-правовое обеспечение .....	34
1.5.3 Прогнозирование и оповещение о возможных цунами .....	37
1.5.4 Моделирование волн цунами.....	38
1.5.5 Эвакуационные мероприятия .....	43
1.5.6 Инженерные сооружения и природные системы защиты .....	45
1.5.7 Цунамистойкое строительство .....	50
1.6 Выводы по главе. Цель и задачи исследования .....	57
2 ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СРЕДСТВА ЦУНАМИЗАЩИТЫ .....	60
2.1 Общие положения .....	60
2.2 Изучение динамического влияния волн цунами на строительные конструкции различных объектов.....	61
2.3 Обоснование предлагаемого конструктивного решения цунамизащиты зданий.....	74
2.4 Предварительная расчетное обоснование предлагаемого средства цунамизащиты .....	83
2.5 Выводы по главе.....	93
3 РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ .....	95
3.1 Общие положения .....	95
3.2 Разработка методологии проведения расчетного исследования.....	96
3.3 Анализ результатов исследования .....	103
3.4 Выбор параметров предлагаемого решения цунамизащиты.....	109
3.5 Расчет на землетрясение уровня МРЗ.....	115

3.6 Проверка предлагаемого решения цунамизащиты зданий на защиту от прогрессирующего обрушения.....	116
3.7 Влияние грунтовых условий на сейсмостойкость предлагаемого решения цунамизащиты зданий .....	119
3.8 Выводы по главе.....	124
<b>4 РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЦУНАМИСТОЙКОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ .....</b>	<b>126</b>
4.1 Общие положения.....	126
4.2 Определение значения величины нагрузки от волн цунами .....	127
4.3 Результаты расчета.....	133
4.4 Сравнение воздействия цунами на здание, расположенное на уровне земли и на эстакаде .....	136
4.5 Проверка предлагаемого решения цунамизащиты зданий на защиту от прогрессирующего обрушения с учетом волны цунами .....	142
4.6 Моделирование наката волны в расчетном комплексе ANSYS 2021.....	144
4.7 Выводы по главе.....	151
<b>5 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕАЛИЗАЦИИ.....</b>	<b>153</b>
5.1 Общие положения .....	153
5.2 Архитектурно-планировочные решения .....	153
5.3 Конструктивные решения .....	156
5.4 Выводы по главе.....	158
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>160</b>
Список работ, опубликованных автором по теме диссертации.....	160
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>163</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>175</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность избранной темы.**

Восточная часть Российской Федерации является одним из наиболее перспективных районов развития страны. Она богата энергетическими ресурсами, полезными ископаемыми и другими природными богатствами. Например, согласно Федеральной целевой программе «Социально-экономическое развитие Курильских островов (Сахалинская область) на 2016 - 2025 годы», на этой территории должны быть осуществлены крупные проекты по строительству и реконструкции различных общественных и промышленных зданий, а также ряда крупных транспортных объектов. Особенностью данного региона является наличие двух опасных стихийных бедствий: высокая сейсмическая активность и возможность возникновения волн цунами. Последствия этих природных явлений весьма велики. Так, землетрясение, произошедшее на Курилах 5 октября 1994 года, привело к разрушению сотни домов, а что не разрушило землетрясение, было уничтожено волнами цунами. Ущерб, который нанесла стихия, оказался велик не только с экономической точки зрения, но и со стороны морально-психологического состояния людей. В связи с этим, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений в условиях возможного возникновения обоих этих воздействий становится сложной инженерной задачей.

Для обеспечения безопасности зданий и сооружений в таких условиях должно непрерывно осуществляться развитие как конструктивных решений, позволяющих бороться с опасными воздействиями, так и развитие нормативно-правовой базы, позволяющей проектировщикам в полной мере учесть все возможные нагрузки и воздействия.

Работа посвящена решению обозначенных проблем, что и определяет ее актуальность.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Проблемы сейсмостойкости зданий и сооружений отражены в работах ряда авторов: Я.М. Айзенберга, Т.Ж. Жунусова, И.Л. Корчинского, С.В. Полякова, О.А.

Савинова, А.М. Уздина, Э.Е. Хачияна, С.Г. Шульмана, А.К. Chopra, J.M. Gere, N.M. Newmark и др. Вышеперечисленные авторы в своих работах освещают в основном вопросы сейсмобезопасности зданий и сооружений.

Проблемы безопасности зданий и сооружений в условиях возможного возникновения волн цунами рассмотрены в исследованиях: Н.Д. Беляева, Ю.Л. Воробьева, А.А. Дорфмана, Н.Г. Заритовского, В.М. Кайстренко, М.А. Клячко, Г.Л. Коффа, П.П. Кульмача, Б.В. Левина, И.С. Нуднера, Е.Н. Пелиновского, С.И. Рогачко, Ю.Л. Рутмана, В.З. Филиппенка, Г.С. Хакимзянова, Л.Б. Чубарова, Ю.И. Шокина, В.Н. Шульчина, В.В. Яковлева, Н.Р. Riggs, I.N. Robertson, K. Satake, R. Triatmadja и др. При этом данные авторы часто освещают вопросы безопасности гидротехнических сооружений, а вопросам безопасности зданий и сооружений, находящихся на берегу, уделяется недостаточное внимание.

Анализ выполненных исследований свидетельствует о том, что проблема обеспечения безопасности проживания в рассматриваемых условиях еще далека до завершения. Подтверждением этого являются последствия сильных землетрясений и цунами, произошедших в последние годы как на территории России, так и зарубежных стран. Поэтому **целью исследования** является дальнейшее изучение вопросов безопасности зданий и сооружений в районах подверженных совместному проявлению сейсмической активности и волн цунами с разработкой практических рекомендаций по снижению влияния этих воздействий на жизнедеятельность человека.

#### **В задачи исследования входило:**

1. Выполнить анализ работ в области цунамибезопасности строительных конструкций, как в России, так и за рубежом, включая оценку различных средств цунамизащиты зданий и сооружений.
2. Изучить особенности влияния волн цунами на различные строительные объекты.
3. На основе анализа предложить вариант цунамизащиты зданий, обладающий высокой сейсмо- и цунамибезопасностью, использование которого

будет способствовать сохранению жизней людей и их имущества в условиях сейсмической активности и наката волн цунами.

4. Дать расчетное обоснование предлагаемого решения с учетом современных нормативных подходов проектирования сейсмостойких зданий и сооружений, выполнить подбор рациональных параметров предлагаемого конструктивного решения.

5. Изучить особенности влияния волн цунами на предлагаемое решение с учетом существующих норм определения нагрузки от волн цунами.

6. Разработать методику определения вертикальной нагрузки от волн цунами на предлагаемую конструкцию цунамизащиты и на аналогичные сооружения.

**Объектом исследования** являются здания и сооружения, строительные конструкции которых подвергаются совместному воздействию сейсмических сил и волн цунами.

**Предметом исследования** является оценка сейсмо- и цунамистойкости строительных конструкций зданий и сооружений.

**Научная новизна исследования** заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Получены новые сведения о влиянии параметров воздействия волны цунами (её скорости и высоты) на величину гидродинамического давления, при этом показано, что степень этого влияния существенно зависит не только от параметров волны, но и от конструктивного решения самого строительного объекта.

2. Подтверждено, с помощью численного моделирования, что наличие сквозного пространства в зданиях и сооружениях, обеспечивающее беспрепятственное движение волн во время действия цунами, является наиболее предпочтительным конструктивным вариантом для повышения их цунамистойкости.

3. Предложен вариант цунамизащиты, отвечающий одновременно требованиям сейсмо- и цунамистойкости, защищенный патентом.

4. На основании расчетно-теоретического анализа обоснована сейсмостойкость и цунамистойкость предлагаемой конструкции защиты в зависимости от её конструктивных особенностей, характеристик сейсмического воздействия и воздействия волн цунами с учетом влияния её пространственной работы.

5. Разработана прикладная методика расчета вертикальной составляющей нагрузки от волн цунами при проектировании зданий и сооружений, высота которых может быть ниже высоты волны.

**Теоретическая значимость** диссертационного исследования заключается в том, что на основании математического моделирования волн (с помощью компьютерных моделей) показана степень гидродинамического воздействия волн цунами на строительные объекты, обосновано конструктивное решение защиты зданий в условиях совместного проявления высокой сейсмической активности и волн цунами.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в том, что полученные результаты позволяют обеспечить гарантию безопасности людей и их материального имущества во время сейсмических воздействий и волн цунами, а также расширить градостроительные возможности развития удаленных населенных пунктов, повысить экономическую эффективность строительства зданий и транспортных сооружений в этих районах, кроме того полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития нормативной базы по проектированию зданий и сооружений в цунамиопасных районах.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационного исследования включены в Изменение №1 СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования».

**Методология и методы исследования.** Решение поставленных задач достигалось путем численного моделирования с использованием метода конечных элементов с последующим анализом напряженно-деформированного состояния строительных конструкций на основе детальных пространственных моделей при сейсмических воздействиях и нагрузках от волн цунами.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности ВАК: 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения, направление соответствует п. 2 паспорта специальности: «Обоснование, разработка и оптимизация объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, экономической и конструкционной безопасности на основе математического моделирования с использованием автоматизированных средств исследований и проектирования»; а также п. 4 паспорта специальности: «Развитие методов оценки надежности строительных конструкций, зданий и сооружений, прогнозирование сроков их службы, безопасности при чрезвычайных ситуациях и запроектных воздействиях».

**Достоверность и обоснованность результатов исследований** обеспечивается использованием нормативных данных, применением обоснованных методов и методик, разработанных отечественными и зарубежными учеными, занимающимися вопросами обеспечения безопасности зданий и сооружений в условиях сейсмической активности и воздействия волн цунами, а также применением надежных и апробированных вычислительных программ и методов моделирования.

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

1. Анализ результатов численного моделирования степени влияния параметров волны цунами и типов конструктивных решений зданий и сооружений на величину гидродинамического воздействия на строительные конструкции.
2. Предлагаемый вариант цунамизащиты, отвечающий требованиям сейсмо- и цунамистойкости.
3. Результаты расчетно-теоретического обоснования сейсмостойкости и цунамистойкости предлагаемой конструкции с учетом её пространственной работы.
4. Методика расчета вертикальной составляющей нагрузки от волн цунами при проектировании зданий и сооружений, высота которых может быть ниже высоты волны.



5. Рекомендации по практической реализации предлагаемого варианта сейсмо- и цунамизащиты.

### **Апробация результатов**

Результаты исследований докладывались на конференциях:

– Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения профессора Н.Н. Леонтьева и 110-летию профессора В.З. Власова «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы», г. Москва, ФГБОУ ВПО НИУ МГСУ, 21 июня 2017 г.;

– Национальная научно-техническая конференция, ФГБОУ ВО ПГУПС, г. Санкт-Петербург, 2018 г.

– Научно-методической конференции, посвященной 155-летию кафедры «Здания», ФГБОУ ВО ПГУПС, г. Санкт-Петербург, 17 апреля 2019 г.;

– XIII Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием). г. Санкт-Петербург, 01-06 июля 2019 года

– IX Савиновские чтения, ФГБОУ ВО ПГУПС, Санкт-Петербург, 2020 г.

Результаты исследований опубликованы в альбоме инновационных предложений РААСН (выпуск 2017-1).

**Публикации:** Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 4 научных статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий ВАК, 1 публикация, индексируемая международной системой цитирования Scopus. Также получен патент на предлагаемое средство цунамизащиты.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение, список литературы из 116 источников и приложение. Объем диссертационного исследования составляет 175 страниц машинописного текста, включая 113 рисунков и 19 таблиц.

**В первой главе** на основании литературных источников, посвященных изучаемой проблеме, определены причины возникновения волн цунами, дана характеристика цунамиопасности территории Российской Федерации, описаны основные характеристики волн цунами. Также большое внимание уделено последствиям наката волн цунами и различным мероприятиям по цунамизащите как населения, так и материального имущества.

**Во второй главе** представлены результаты исследования влияния параметров воздействия волны цунами на гидродинамическое давления от волны на различные строительные объекты, предложен вариант цунамизащиты зданий и обоснована возможность его использования.

**В третьей главе** представлены результаты исследования сейсмостойкости предлагаемой конструкции. При этом первоначально основное внимание было уделено выбору наиболее рациональных геометрических и жесткостных параметров конструкции, выполнен подбор сечений и произведены проверки с учетом расчета от прогрессирующего обрушения. Далее был выполнен анализ поведения предлагаемой конструкции при сейсмических воздействиях различного частотного состава, а также с учетом свойств грунтового основания.

**В четвертой главе** было детально рассмотрено влияние волны цунами на предлагаемую конструкцию, а именно была произведена оценка цунамистойкости предлагаемого решения, выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния зданий, расположенных на уровне земли и на автомобильной эстакаде, смоделирован накат волны на предлагаемую конструкцию, доказана необходимость учета вертикальной составляющей волны цунами на пролетное строение мостовых сооружений и разработана методика для определения численного значения этой составляющей.

**В пятой главе** были представлены рекомендации по практической реализации предлагаемого варианта цунамизащиты. Предложены варианты типовой планировки жилых зданий, варианты стандартных решений по обеспечению шумо- и виброзащиты помещений от воздействия автомобильного транспорта, а также альтернативные варианты конструктивной реализации объекта: металлическая

рамно-связевая конструктивная система и железобетонная каркасная взамен ранее изученной металлической рамной конструктивной системы.

В **заключении** приведены общие выводы по результатам диссертационной работы.

## **1 СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА**

### **1.1 Природа происхождения цунами**

Анализ научного материала по природе цунами свидетельствует, что это стихийное бедствие относится к наиболее разрушительным явлениям природы. Эти гигантские волны способны стереть с лица Земли целые города. Во многих работах представлены исторические справки по этому опасному явлению. Согласно данным исследователя Злобина Т.К. [24], о цунами было известно еще более 2500 лет назад. Рассказы очевидцев этих явлений переходили из поколения в поколения и казались легендами, согласно одной из которых погибла Атлантида.

Волны эти называют «цунами», что в переводе с японского языка означает «большая волна в гавани». Американский исследователь Вильям Ван Дорн (William Van Dorn) в 1968 г. дал определение: «цунами – это японское название системы гравитационных волн, возникающих в море вследствие крупномасштабных возмущений свободной поверхности» [78], [100].

Причинами возникновения цунами могут быть: сейсмические, гравитационные, вулканические, метеорологические, техногенные явления и другие явления.

По данным исследователя Воробьева Ю.Л. [11] и сотрудников «Камчатского УГМС» [26], сейсмические явления вызывают абсолютное большинство цунами (по разным источникам до 90%). При этом возникают вертикальные или горизонтальные подвижки морского дна. При вертикальном смещении часть дна опускается, а часть – поднимается (рисунок 1.1а). Вместе с дном приподнимается весь столб воды над данным участке дна. Вода стремится вернуться в исходное

положение (средний уровень моря), в результате чего приходит в колебательные движения, порождая серию волн.

Ученым Поповым М.А. [62] отмечается, что при горизонтальном смещении (субдукции) одна литосферная плита погружается под другую, при этом, если хотя бы одна из этих плит с крутым склоном, то она толкает толщу воды, вызывая цунами, что показано на рисунке 1.1б.

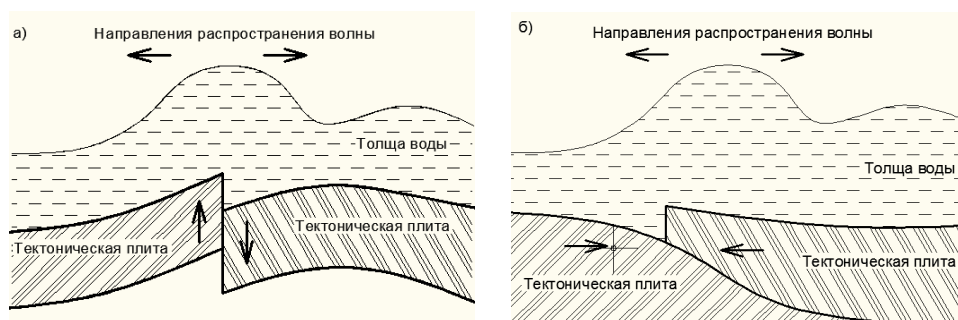


Рисунок 1.1 – Происхождение сейсмического цунами

Стоит отметить, что не любое землетрясение вызывает цунами. Исследователем Злобиным Т.К. в работе [24], сформулированы следующие условия возникновения сейсмического цунами:

- Землетрясение должно быть большой силы, с магнитудой  $M > 5$ ;
- Очаг расположен под дном моря или океана;
- Над эпицентром находится большая толща воды;
- Глубина очага землетрясения порядка 10-60 км.

Гравитационные цунами возникают в результате падения в воду больших масс или сходе на дно по подводному склону мутьевых потоков.

По данным ученого Воробьева Ю.Л. [11] и геологов Злобина Т.К. [24] и Сывороткина В.Л. [78] в первом случае цунами вызывает падение с высоты объекта большой массы и большого объема. К таким объектам относят обломки ледников, горные породы, оползни и др. Но теоретически более опасное цунами вызовет падение в воду крупного небесного тела, обладающего огромной кинетической энергией, которая будет передана воде.

Так, согласно одной теории, огромный астероид, упавший на Землю 65,5 лет назад и оставивший гигантский кратер Чиксулуб, вызвал сильнейшее землетрясение и цунами, которые привели к массовой гибели живых существ [107].

Во втором случае цунами вызывают потоки мутьевых осадочных пород. В результате вибраций, осадочное вещество, разжижаясь, приходит в движение. Данный поток, обладая большой плотностью и большой скоростью (до 90км/ч), действует подобно поршню, передавая импульс воде, что показано на рисунке 1.2 [11], [24].

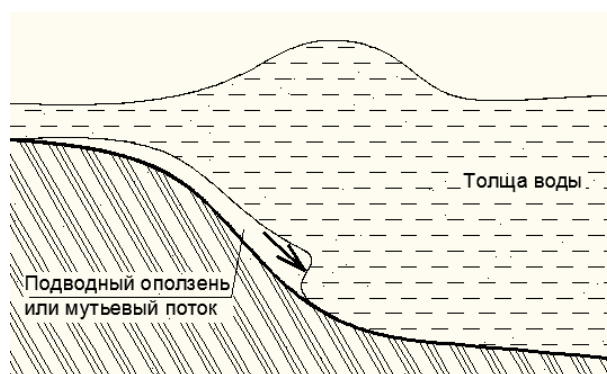


Рисунок 1.2 – Образование гравитационного цунами

По данным сотрудников «Камчатского УГМС» [26], извержение подводных вулканов вызывает около 5% всех цунами. В результате сильного взрыва ударная волна передает импульс воде, вызывая цунами (рисунок 1.3). Кроме того, в результате провала вершины вулкана от взрыва образуются котлообразные впадины с крутыми склонами и ровным дном (кальдеры). Вода моментально заполняет эти впадины, в результате чего возникает длинная невысокая волна.

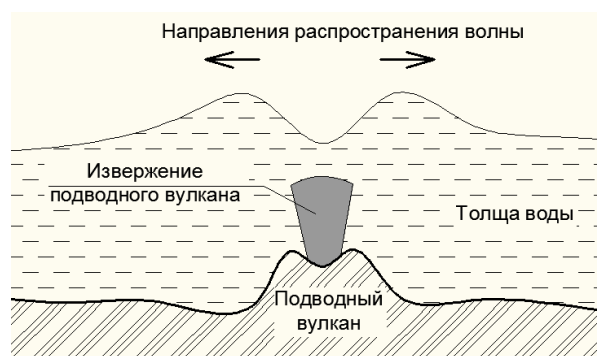


Рисунок 1.3 – Происхождение вулканического цунами

Метеорологические цунами вызывает циклон, если он длительное время не заполняется и не смещается (рисунок 1.4). Так как уменьшение атмосферного давления на 1 мм приводит к уменьшению уровню моря на 13,6 мм, в центре циклона, где наблюдается область с минимальным атмосферным давлением, создается подобие небольшого водяного холма. Образованию такого холма могут способствовать ветра, сгоняющие воду к центру циклона. Холм под действием силы тяжести быстро оседает в результате резкого смещения или заполнения циклона, образуя волны цунами [11], [26].

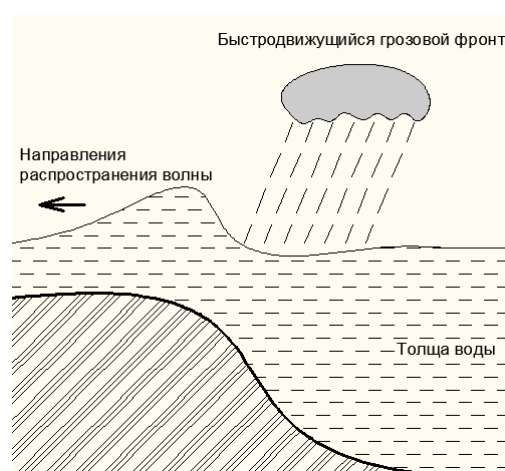


Рисунок 1.4 – Образование метео-цунами

Техногенное цунами образуется в результате человеческой деятельности. Например, взрыв атомной или водородной бомбы может привести к возникновению высоких волн (рисунок 1.5). Однако данные волны несут локальный характер. Высота такой волны быстро уменьшается, так как для дальнего распространения волны необходимо быстро вытеснить или поглотить некоторый объем воды [26].

По мнению ученого Сывороткина В.Л. [78], инженерные работы, проводимые в прибрежных зонах, также являются техногенной причиной возникновения цунами. В данном случае такие работы могут спровоцировать появление оползня, который и вызывает цунами.

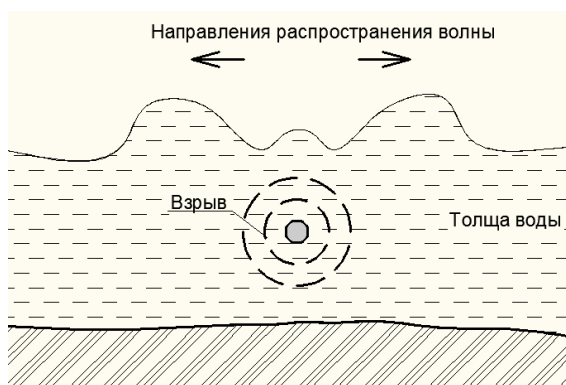


Рисунок 1.5 – Образование цунами вследствие взрыва

Таким образом, существует несколько причин образования волн цунами. Во всех работах данной тематики упоминаются три основные причины: сейсмические, гравитационные и вулканические явления, которые ведут за собой появление волн такого масштаба. Также к причинам стоит отнести техногенные и метеорологические формы образования цунами.

## 1.2 Проявления цунами на тихоокеанском побережье

На территории РФ наиболее цунами опасными регионами являются районы Тихоокеанского побережья, в которых, из-за данного природного явления, существенным образом осложняется человеческая деятельность.

Как показывает статистика, в соответствии с данными [24], [62], на периферии Тихого океана возникает около 75% всех цунами, что существенно превышает значения на других водных акваториях.

По данным ученых Левина Б.В. и Носова М.А. [41], 1300 из 1500 цунами произошли на периферии Тихого океана. Таким образом, Тихий океан является самым частотным регионом нашей планеты по проявлению волн цунами.

По данным сотрудников ФГБУ «Камчатское УГМС», 10 из 11 самых разрушительных цунами в XX и начале XXI в. произошли также в Тихом океане. Таким образом, Тихий океан – это место не только самого большого количества цунами, но и место самых опасных из них [26].

Важно отметить, что на территории РФ цунами происходили не только в Тихом океане. Так в Черном море задокументировано 22 события (6 из которых произошли в 20-м веке). Также хорошо известно цунами, произошедшее в Каспийском море 8 июля 1895 г. в результате чрезвычайно мощного Красноводского землетрясения с магнитудой 8.2. Кроме того в данном регионе хорошо известны Дербентское цунами 957 г., цунами 31 декабря 1902 г. в районе г. Баку и цунами, наблюдаемое 6 марта 1986 г. в районе Ливановой банки. Несмотря на это, высота и повторяемость цунами в Черном и Каспийском морях существенно меньше, чем в дальневосточных морях. [30]

Учеными были выявлены основные причины такого проявления цунами на побережье Тихого океана. Во-первых, высокая сейсмичность данного района, которая обусловлена постоянным движением литосферных плит. Во-вторых, большая глубина океана [57].

Первая причина обусловлена движением в разные стороны с разными скоростями относительно друг друга литосферных плит, в результате чего происходит их взаимодействие.

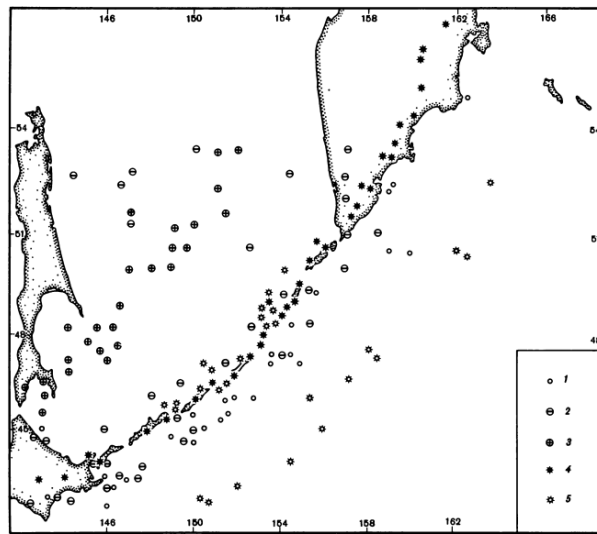
Вторая причина обусловлена средней глубиной Тихого океана, которая составляет примерно 4,5км. Он является самым глубоким на планете. Кроме того, в нем находится несколько глубоководных желобов, глубина в которых достигает 10000 метров и более.

По мнению исследователя [24], землетрясения, очаг которых расположен на больших глубинах в Курило-Камчатском глубоководном желобе, являются наиболее опасными причинами возникновения цунами на Курильских островах. Сейсмофокальные зоны в данном желобе имеют выход на дно, т.е. очаги землетрясений – мелкофокусные и близповерхностные. Таким образом, появляется возможность возникновения волны максимальной высоты, очаг которой будет расположен близко к Курильским островам.

Данные землетрясения в Курило-Камчатском глубоководном желобе возникают из-за движения навстречу друг другу двух больших литосферных плит:



Тихоокеанской и Охотской, которая является частью Северо-Американской (рисунок 1.6) [57] [92]



1-3 — эпицентры землетрясений с глубиной очага 0—60 км (1), 61-300 км (2), более 300 км (3); 4 — действующие вулканы суши; 5 — подводные вулканы  
Рисунок 1.6 – Вулканизм и землетрясения в районе Курило-Камчатского желоба

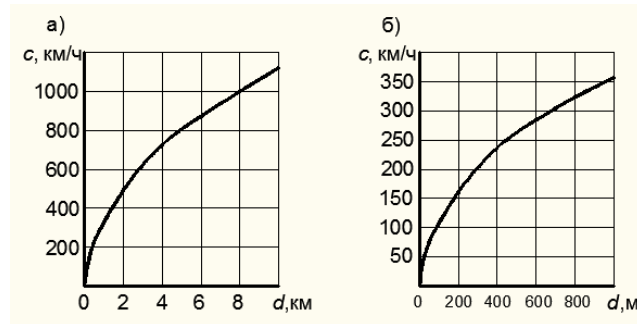
Глубина напрямую влияет на опасность возникшей волны цунами. Скорость движения волны в открытом пространстве определяется по формуле Лагранжа (1.1) [24], [41], [62], [95], [100]:

$$v = \sqrt{gH}, \quad (1.1)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,

$H$  – глубина бассейна в месте определения скорости.

Используя данную формулу, исследователи Кульмач П.П. и Филиппенок В.З. [39] составили зависимость скорости распространения волн цунами от средней глубины океана, представленную на рисунке 1.7. Учитывая неравномерность рельефа, по данным графика можно лишь примерно определить скорость распространения волн. Так, например, скорость волны цунами, образовавшейся в Курило-Камчатском желобе на глубине 10000 метров, составит 1126 км/ч. Далее при глубинах 3000, 1000 и 500 метров скорость волны будет составлять соответственно 615, 360 и 252 км/ч.



- а – общий (при глубине до 10 км) график скорости распространения волн;  
 б – уточненный (при глубине до 1000 м) график скорости распространения волн.

Рисунок 1.7 – Графики скоростей распространения волн цунами

Другим важным параметром волн цунами является их высота. По мнению ученых Кульмача П.П. [39] и Клячко М.А. [33], в открытом океане она не превышает 1-2 м и, по мнению Воробьева Ю.Л. [11], в среднем составляет около 60 см. При этом высота ветровых волн в открытом океане значительно больше, обычно достигает 5-7 м.

Ученые Левин Б.В. и Носов М.А. [41] отмечают, что проблема обнаружения волн цунами в открытом океане связана с малой амплитудой волн цунами по сравнению с ветровыми волнами. Данная проблема усугубляется большим периодам этих волн.

Под периодом морских волн исследователи Кульмач П.П. и Филиппенко В.З. понимают промежуток времени между моментами прохождения двух соседних вершин через некоторый взятый створ. К волнам цунами относят волны с периодом  $T=2\div 200$  минут, большими периодов обычных ветровых волн ( $T < 20$  с) и меньшими полусуточных или суточных периодов приливных волн [39].

Последний параметр волн цунами представлен в виде ее длины. Длиной волны является расстояние по горизонтали между двумя соседними вершинами на волновом профиле. Длина волны цунами в большинстве случаев превышает 100 км и в основном зависит от условий образования очага [39].

Как отмечают исследователи Кульмач П.П. и Филиппенко В.З. [39], геометрические характеристики очага влияют на параметры образовавшейся волны. Например, если очаг представляет собой форму круга, т.е. представляет

собой сосредоточенный источник, волны являются кольцевыми и распространяются по радиальным направлениям от источника; если очаг принимает удлиненную форму, т.е. является протяженным источником, то образуются линейные волны, распространяющиеся по направлению, перпендикулярному к оси очага.

Параметры волны начинают заметно меняться у границы материковой отмели, где глубина до 200 м, и происходит интенсивнее с глубины 10-15 метров. При подходе волны к берегу все ее параметры меняются. Волна деформируется: ее скорость уменьшается, в результате происходит сжатие волнового потока в пространстве и увеличение амплитуды волны с одновременным увеличением крутизны переднего фронта. Приближаясь к берегу, он начинает опрокидываться, создавая пенящийся, бурлящий, большой высоты водяной поток, что приводит к значительным разрушениям на берегу (рисунок 1.8). [26], [41], [95], [100]

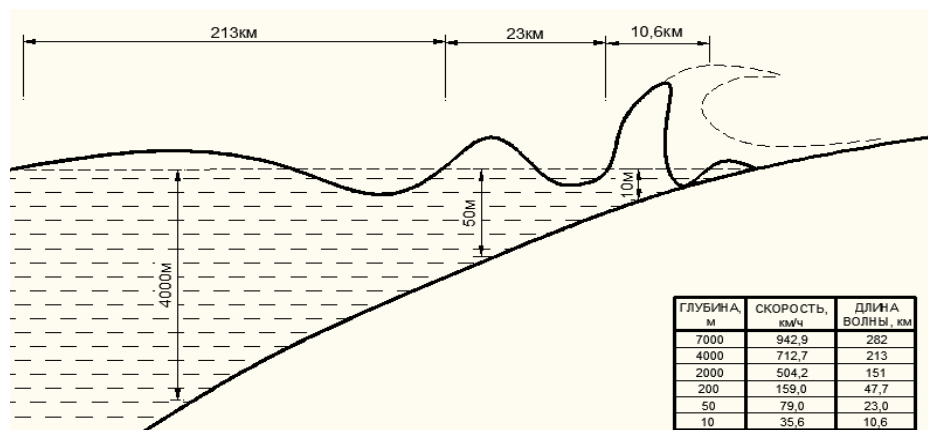


Рисунок 1.8 – Распространение волн цунами

Высота волны на мелководье может быть вычислена по формуле Эри-Грина (1.2):

$$H_{\text{мелк}} = H_{\text{глуб}} \sqrt[4]{\frac{V_{\text{глуб}}}{V_{\text{мелк}}}}, \quad (1.2)$$

где  $H_{\text{глуб}}$  – начальная высота волны в глубоком месте;

$V_{\text{глуб}}$  – глубина воды в глубоком месте;

$V_{\text{мелк}}$  – глубина воды в прибрежной отмели [24].

Вышеприведенные формулы Лагранжа и Эри-Грина с достаточной точностью показывают, как серьезно влияет глубина моря на два важных параметра волны цунами: ее скорость и высоту [24].

Таким образом, в результате землетрясений, происходящих в Курило-Камчатском желобе на глубине около 10 км, образуются волны. Их высота не превышает 2 метров в открытом океане, а скорость более 1000 км/ч. Однако при приближении к побережью Курильских островов их скорость уменьшается до 10-30 км/ч, но высота при этом увеличивается - до 30м. При выходе на побережье, волны такой высоты приводят к значительным разрушениям, это подтверждает, что Курильские острова являются и одним из цунамиопасных регионов нашей планеты.

### 1.3 Магнитуда и интенсивность цунами

В исследованиях Воробьева Ю.Л., Акимова В.А. и Соколова Ю.И. [11] подчеркивается, что основными характеристиками цунами являются: магнитуда, интенсивность на конкретном побережье и скорость движения волны. Магнитудой цунами является натуральный логарифм колебаний уровня воды (в метрах), измеренный стандартным мареографом у береговой линии на расстоянии от 3 до 10 км от источника цунами.

Магнитуда цунами, в отличие от магнитуды землетрясения, характеризует только часть энергии цунами (которая сама является частью сейсмической энергии). Существует зависимость между сейсмической магнитудой ( $m_s$ ), магнитудой цунами ( $m$ ) и высотой главной волны цунами ( $h$ ) (таблица 1.1). [11], [33]

Таблица 1.1 – Зависимость магнитуды и высоты цунами от магнитуды землетрясения

Магнитуда землетрясения, $m_s$	Магнитуда цунами, $m$	Максимальная высота головной волны цунами $h$ , м
6	незначительная	

6,5	-1	0,5 – 0,75
7	0	1 – 1,5
7,5	1	2 – 3
8	2	4 – 6
8,25	3	8 - 12
8,5	4	14-20

Магнитуда цунами определяет интенсивность воздействия волны на берег, от которой напрямую зависит разрушительная сила. Эта разрушительная сила зависит от нескольких факторов. Во-первых, от направления движения волны по отношению к береговой линии, береговому склону и шельфу. Интенсивность и, следовательно, разрушительная сила цунами прямо пропорциональны скорости выхода волны на берег. Во-вторых, от мощности течения отхода воды, в результате чего происходит смыв почвы и склонов, размыв насыпей дорог, фундаментов сооружений и оснований мостов и других наземных сооружений. В-третьих, от объема затопления морской водой береговой территории. В-четвертых, от наличия и силы волнений на водном пространстве вблизи берега [11].

Перечисленные выше факторы зависят в первую очередь не от силы землетрясения, а от величины произошедших при этом изменений земной коры. То есть чем больше смещаются плиты во время подводного землетрясения, тем большая масса воды приходит в движение и, следовательно, тем сильнее и разрушительнее цунами [11].

Аналогично шкале интенсивности землетрясений, существует и шкала интенсивности цунами в магнитудах. В работе [41] Левин Б.В. и Носов М.А. отмечают, что первая такая классификация была разработана Зибергом А., который ввел 6-бальную шкалу интенсивности цунами подобно шкале интенсивности землетрясений. Эта условная шкала сегодня не используется, так как она основана исключительно на описании макроскопических эффектов, показывающих степень разрушений, при этом никак не связана с физическими параметрами цунами, такими как высота волн, и дальность залеска. В дальнейшем шкала Зиберга А. была несколько модифицирована Амбрейсисом.

Сегодня для оценки интенсивности цунами часто используют шкалу Амбрейсиса, которая привязана как к физическим параметрам волн, так и к степени разрушения от этих волн.

Существует также шкала интенсивности цунами, названная шкалой Соловьева-Имамуры (рисунок 1.9). Данная шкала определяется зависимостью момента магнитуды  $M_w$  для цунамигенных событий, произошедших в акватории Тихого океана с 1991 по 1998 г. [11]

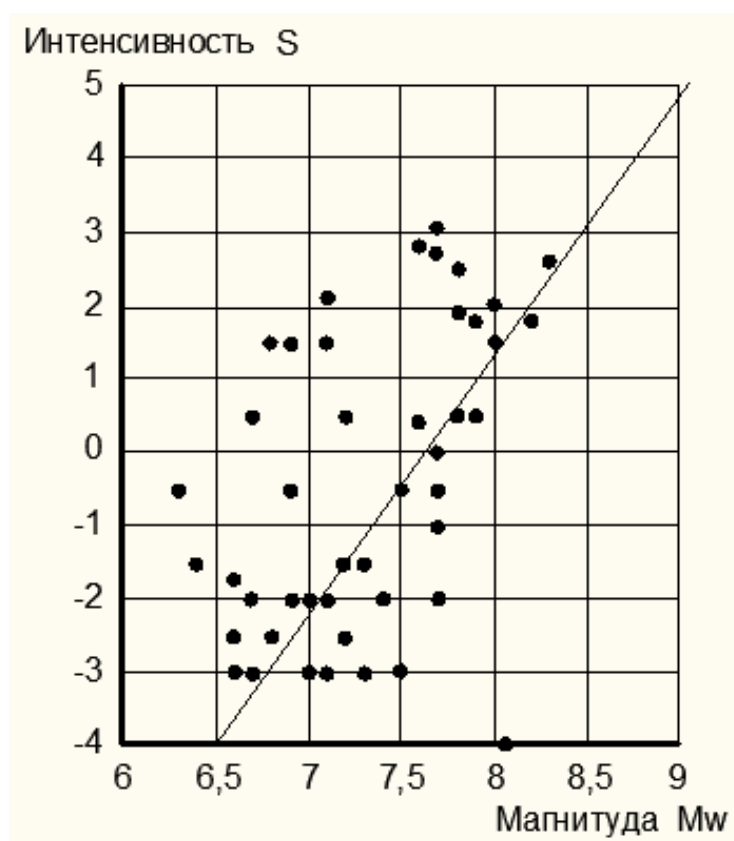


Рисунок 1.9 – Шкала Соловьева-Имамуры

Шкала интенсивности Соловьева-Имамуры появилась в результате попытки улучшить шкалу Имамуры-Ииды С.Л. Соловьевым, который вводит интенсивность цунами, определяемую по формуле (1.3):

$$I = \frac{1}{2} + \log_2 H, \quad (1.3)$$

где  $H$  – средняя высота цунами на ближайшем к источнику побережье [41].

В настоящее время такое определение интенсивности широко распространено [41].

В 2001 году Д.Пападопулосом и Ф.Имамурой была представлена новая 12-балльная шкала измерения интенсивности цунами. Данная шкала была предложена для того, чтобы соответствовать 12-балльной шкале интенсивности землетрясений MSK-64 [11].

При ее составлении учитывался более чем 100-летний опыт, накопленный сейсмологами при составлении шкал интенсивности землетрясений. Шкала подобно шкале Зибберга не связана с какими-либо количественными физическими параметрами цунами. Она организована по следующим трем признакам:

- а) воздействию на людей;
- б) воздействию на природные и искусственные объекты, включая суда различных размеров;
- с) ущерб, причиняемый зданиям [41].

Поэтому цунами, обрушившееся на малонаселенное побережье, будет иметь по шкале Пападопулоса-Имамуры интенсивность меньшую, чем похожее по физическим параметрам цунами, обрушившееся на густонаселенное побережье [41].

В СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» [72] приведена усовершенствованная шкала опасности/интенсивности цунами, которая представлена на таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Усовершенствованная шкала опасности/интенсивности цунами

Интенсивность $I_{ts}$		Типичные эффекты / последствия, наблюдаемые на побережье и прилегающей акватории
Качественная характеристика (термин) по силе, последствиям	Количественная характеристика, баллы	
Незаметное	0	(α) Высота заплеска не превышает 0,5 м, что незаметно и отмечается только мареографами

Интенсивность $I_{ts}$		Типичные эффекты / последствия, наблюдаемые на побережье и прилегающей акватории
Качественная характеристика (термин) по силе, последствиям	Количественная характеристика, баллы	
Очень слабое / заметное	I	( $\alpha$ ) Высота заплеска 0,5-1 м, что замечается немногими и фиксируется мареографами. ( $\beta$ ) Некоторые прибрежные сооружения категории уязвимости (f) и отдельные прибрежные сооружения категории уязвимости (vh) получают повреждения степени 1
Слабое	II	( $\alpha$ ) Высота заплеска 1-2 м, что наблюдается всеми. ( $\beta$ ) Плоские побережья затапливаются; легкие суда выбрасываются на берег. ( $\gamma$ ) Многие прибрежные сооружения категории уязвимости (f) получают ущерб степени 1, а отдельные - степени 2; прибрежные сооружения категории уязвимости, отличной от (f), и большинство береговых сооружений не получают повреждений
Умеренное/ повреждающее	III	( $\alpha$ ) Высота заплеска 2-4 м. ( $\beta$ ) Легкие суда выбрасываются или уносятся; берега засоряются обломками и мусором. ( $\gamma$ ) Многие здания и сооружения категорий уязвимости (f) и (vh) имеют повреждения степени 3, некоторые - степени 4. Многие здания категории уязвимости (mh) имеют повреждения степени 2, некоторые - степени 3. Некоторые здания категории (m) имеют повреждения степени 2. Некоторые здания категории уязвимости (lm) имеют повреждения степени 1



Интенсивность $I_{ts}$		Типичные эффекты / последствия, наблюдаемые на побережье и прилегающей акватории
Качественная характеристика (термин) по силе, последствиям	Количественная характеристика, баллы	
Сильное / сильно повреждающее	IV	( $\alpha$ ) Высота заплеска 4-8 м. ( $\beta$ ) Крупные суда повреждены и (или) выброшены на сушу; сильный смыв почвы с полей. При отсутствии или несработке СПЦ отдельные жертвы. ( $\gamma$ ) Большинство зданий категорий уязвимости (f) и (vh) имеют повреждения степени 4 и 5. Многие здания категории уязвимости (h) и некоторые категории уязвимости (mh) имеют повреждения до степени 4. Некоторые здания категории уязвимости (m) могут быть частично разрушены
Очень сильное/разрушительное	V	( $\alpha$ ) Высота заплеска 8-16 м. ( $\beta$ ) Вся территория затопления покрыта обломками. Много людей гибнет, несмотря на СПЦ, иногда возникает паника. ( $\gamma$ ) Многие здания категории уязвимости (mh) имеют повреждения до степени 4
Катастрофическое/уничтожающее	VI	( $\alpha$ ) Высота заплеска более 16 м. ( $\beta$ ) Полное опустошение приморских территорий по фронту и в глубину. Большое число жертв, несмотря на СПЦ. Массовая паника. ( $\gamma$ ) Большинство зданий категорий уязвимости (h) и (mh) и некоторые категории уязвимости (lm) разрушены

Оценка опасности цунами среди ряда природных процессов в зависимости от их интенсивности приведена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Оценка опасности природных процессов

Явление	Шкала	Катастрофа	Ущерб
Землетрясение	12-балльная шкала MSK-64	9-12	6-8
Цунами	6-бальная амплитуда волны по шкале Амбрейсиса	5-6	3-4
Речное наводнение	4-уровневая шкала подъема воды и площади затопления	1	2-4
Извержение вулкана	3-уровневая степень механического, термического и химического воздействия	1-2	3
Сель	4-уровневый объем вынесенного твердого материала	4	1-3
Оползень	3-уровневая скорость смещения	3	

Сотрудники сахалинской метеослужбы, проанализировав столетние данные по наблюдению за цунами, на своем сайте приводят диаграмму максимальных за 100 лет подъемов уровня моря при цунами (рисунок 1.10). Из данной диаграммы видно, что за последние сто лет на территории данного региона были зафиксированы волны почти 18-ти метровой высоты, что по шкале интенсивности Пападопулоса-Имамуры набирает 11 баллов из 12. Также, исходя из зависимости высоты волн и магнитуды цунами, приведенной в таблице 1.1, становится видно, что на территории Курильских островов проходили цунами максимальной магнитудой равной 4.

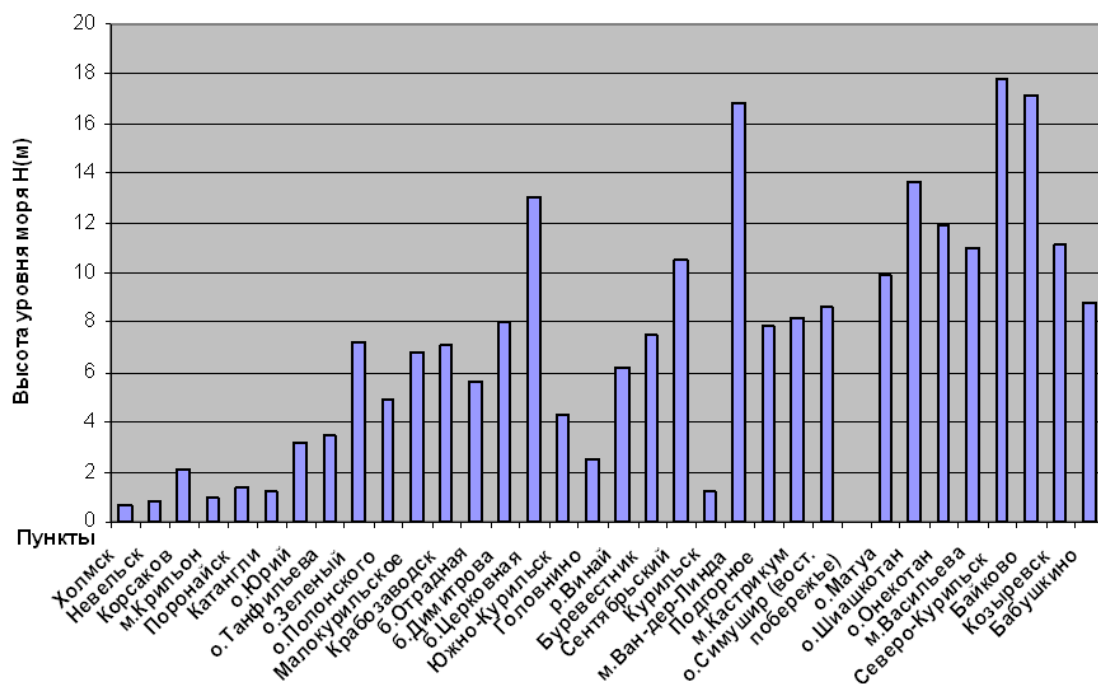


Рисунок 1.10 – Максимальный за сто лет подъем уровня моря при цунами на территории Сахалинской области

#### 1.4 Последствия цунами

Ученый Г.Л. Кофф [36], [37], [38] отмечает, что степень опасности цунами определяется в основном максимальной высотой волн на берегу. Волны менее 1 метра реальную опасность обычно не представляют.

К основным поражающим факторам цунами следует отнести:

- Затопление территории;
- Давление потока;
- Транспортирующее действие.

Однако, следует отметить, что существуют различные типы наката волн на берег. Так ученый Пелиновский в своей работе «Гидродинамика волн цунами» [60] выделяет несколько типов наката волн, которые представлены на рисунке 1.11.

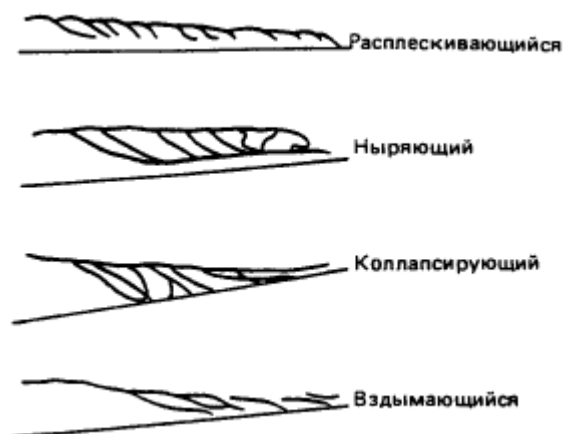


Рисунок 1.11 – Типы наката волн на берег

К основным типам автор относит:

- расплескивающийся бурун – происходит разрушение вершины волны, такой тип характерен при малых уклонах дна;
- ныряющий бурун – вершина волны обгоняет свое подножье и наклоняется вниз, такой тип характерен при больших уклонах дна;
- вздымающийся бурун – подразумевает подтопления берега волной без ее обрушения, характерен для крутых откосов.

При цунами, воздействие которого проявляется по типу прилива-отлива (вздымающийся бурун), происходит только затопление территории. При воздействии цунами по типу обрушения волны крутым фронтом (расплескивающийся и ныряющий бурун) проявляются все поражающие факторы [36], [37], [38].

Исследователи в своих трудах [11], [99] отмечают, что существует множество параметров, характеризующие волны цунами и их воздействие на побережье. Большинство этих поражающих факторов собраны в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Поражающие факторы цунами

Первичные	Вторичные
<p>высота, скорость и сила распространения волн при обрушении их на побережье; подтопление, затопление прилегающих к берегу земель; сильное течение при обратном уходе волн с берега в океан; сильная воздушная волна.</p>	<p>разрушение и затопление прибрежных сооружений, зданий; снос техники, построек, судов; пожары, взрывы на опасных объектах; смыв плодородного слоя почвы, уничтожение урожая; уничтожение или загрязнение источников питьевой воды.</p>

Большая часть разрушений, вызываемых цунами, происходят в результате удара волн. Далее из-за затопления территории происходит размыв фундаментов зданий, мостов и дорог. В результате транспортирующего действия цунами, в волне присутствуют обломки лодок, прибрежных сооружений, машин, которые с силой ударяют в здания, нанося дополнительный урон. Сильные течения, иногда наблюдаемые во время цунами, вызывают дополнительные разрушения из-за того, что обрывают бонны, срывают с якорей лодки и баржи. [11]

Последствия такого воздействия цунами хорошо проиллюстрированы на фотографиях, изображенных на рисунках 1.12 и 1.13.



Рисунок 1.12 – Разрушенные волной цунами деревянные дома



Рисунок 1.13 – Залитая волнами цунами часть острова Чкалова

В истории нашей планеты было много разрушительных землетрясений с последующими волнами цунами. Самое разрушительное зарегистрированное цунами в акватории Тихого океана произошло 11 марта 2011 года. Землетрясение магнитудой 9,0 произошло в 130 километрах от берега и на глубине 32 километра под уровнем моря и стало сильнейшим в известной истории Японии. Высота цунами, по данным портала «РИА новости» [66], в некоторых районах достигала 40,5 метров. Цунами накрыло территорию в 561 квадратный километр, сильно



повредило транспортную инфраструктуру Японии, а также было разрушено около 151 тысячи строений. Также землетрясение и цунами повредили системы основного и резервного энергоснабжения АЭС «Фукусима-1», что в результате привело к крупной радиационной аварии. Кроме того, в результате данных природных бедствий погибло около 25 тысяч человек. На рисунках 1.14-1.16 и 5 хорошо видны последствия землетрясения и цунами 2011 года в Японии. [22], [23], [66], [114]



Рисунок 1.14 – Префектура Мияги 10 марта 2011 года (слева) и 18 марта 2011 года (справа)



Рисунок 1.15 – Территория затопленная волной цунами



Рисунок 1.16 – Выход волны за берегозащитное сооружение

Для избежания материальных потерь и тем более человеческих жертв необходимо выполнять цунамизащитные мероприятия, приведенные ниже.

## 1.5 Защита от цунами

Как отмечают исследователи Воробьев Ю.Л., Акимов В.А. и Соколов Ю.И. в работе [11], для сохранения человеческих жизней и уменьшения разрушений от цунами важно тщательно оценить характер возникающей опасности, разработать и улучшать средства предупреждения о чрезвычайных ситуациях, а также подготовить для районов, подверженных такой опасности, надлежащие меры по защите от волн цунами. Таким образом, для уменьшения последствий цунами необходимо выполнить три этапа: оценка опасности, оповещение и обеспечение готовности.

### 1.5.1 Цунамирайонирование территории

Первым элементом эффективного уменьшения последствий бедствия является оценка его опасности. Данная оценка нужна для определения того, какое население и какие материальные ценности находятся в цунамиопасной зоне. Для такой оценки населенных пунктов необходимо много информации: возможные



источники цунами с вероятностью возникновения в них волн, характеристики образовавшихся волн, а также изменение этих характеристик на различных участках побережья [11].

Оценка возможной опасности от воздействия цунами на населенный пункт называется цунамирайонированием территории. По этим данным получают рекомендации по наиболее благоприятному освоению территории. Исследователи Воробьев Ю.Л. [11], Клячко М.А. [33], Кофф Г.Л. [36], [37], [38] и Шульчин В.Н. [86] подчеркивают, что для каждого участка устанавливается своя степень опасности воздействия возможного цунами. В зависимости от степени цунамиопасности меняются такие параметры волны, как ее высота и дальность затопления. Эти параметры напрямую влияют на объем разрушения от цунами на данном участке. На степень опасности при цунамирайонировании влияет большое число различных факторов: конфигурация берегов, их расположение по отношению к направлению возможной волны, рельефы подводной и надводной частей береговой линии, изрезанность прибрежного рельефа, наличие и формы различных полуостровов, бухт, заливов и выходящих к морю речных долин, а также другие факторы.

В тех же исследованиях [11], [33], [37], [78] ученые разделяют побережье на три типа в зависимости от поведения волн:

— Неблагоприятные побережья. К ним относят широкие низменности с равнинными берегами, большие песчаные косы и отмели, устья и долины рек. В этом случае даже при относительно небольших волнах происходит затопление больших территорий, в результате чего смываются постройки и наносные грунты фундаментов. Также к неблагоприятным районам относят вершины заливов и бухт широко распахнутых в сторону водного пространства и клинообразно сужающихся в сторону суши. В этом случае территория подобна воронке, в которую цунами нагоняет большую массу воды, которая в результате такой фокусировки выплескивается огромными волнами на берег. В таких районах не рекомендуется строительство.

— Побережья со средними условиями. К ним относятся береговые склоны средней крутизны и террасированные формы рельефа, позволяющие в случае опасности быстро эвакуироваться на безопасную высоту. Строительство в данных районах рекомендуется на высотах более 10-15 метров.

— Благоприятные побережья. К ним относят скалистые бухты с высокими берегами или бухты с узким входом. В первом случае высоты волны цунами не хватает, что бы достать до построек. Во втором случае волна сначала разбивается об узкий вход в бухту, теряя энергию и, следовательно, высоту, а потом теряет оставшуюся энергию, разливаясь по широкому пространству бухты.

В СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» [72] принято деление цунамиопасной территории в зависимости от ожидаемой на побережье силой (интенсивностью) цунами на следующие укрупненные диапазоны: слабое (1-2 м), умеренное (2-4 м), сильное (4-8 м), очень сильное (8-16 м) и катастрофическое (более 16 м) цунами.

Стоит отметить, что, согласно отчетам об аварии на АЭС «Фукусима-Дайити» в 2011 году, одной из основных причин названа неверное сейсмо- и цунамирайонирование территории, так как проектировалась АЭС на землетрясение магнитудой около 7 и максимальную высоту волны цунами около 3,1 метра, что соответствовало оценкам риска данного района 60-70х годов и не была выполнена переоценка этих рисков в последующие годы. [81], [89], [110]

### **1.5.2 Нормативно-правовое обеспечение**

После катастрофического цунами 4 ноября 1952 г., в результате которого на Камчатке и о. Парамушир погибло более 15 тыс. человек, а промышленности данного региона был нанесен колоссальный ущерб, на территории нашей страны возникла важная проблема цунамибезопасности. Но позже в России полностью запретили строительство на цунамиопасных территориях (постановление Совета Министров РСФСР № 19 от 8 января 1964 г.). Следствием этого стало отсутствие

на продолжительный период строительных норм для застройки морских побережий, подверженных опасности цунами. [10], [30], [32]

Однако, как говорилось выше, эти районы экономически привлекательны, в связи с чем, строительное освоение данных районов ведется: строятся портовые комплексы, города-курорты и даже нефтеперерабатывающие заводы (в тихоокеанской бухте Козьмино). [10]

Поэтому на государственном уровне многократно ставились задачи по обеспечению цунамибезопасности морских побережий России. Так с 1982 г. неоднократно инициировались Клячко М.А. в Госстрое СССР попытки разработать полноценные СНиПы для повышения безопасности плавучих прибрежных и береговых сооружений при воздействии цунами. Первым результатом стала программа №3 «Цунами», разработанная в конце 1991 г. по поручению из письма-поручения ГКЧС РСФСР в адрес Дальневосточной Ассоциации «Надежность и безопасность». Согласно данному поручению, было необходимо разработать комплекс программ по обеспечению безопасности населения РСФСР в условиях возникновения природных, стихийных бедствий и техногенных катастроф. Данная программа в 1993 г. стала частью программы «Защита приморских территорий от опасных морских воздействий», которая разрабатывалась по поручению МЧС России Дальневосточной Ассоциации «Надежность и безопасность». В 2000 г. было опубликовано поручение Правительства РФ о разработке Федеральной целевой программы «Цунами». В следующем, 2001 г., было опубликовано Распоряжение Правительства РФ о разработке проекта Федеральной целевой программы «Защита морских побережий от опасных природных явлений». ФЦП «Цунами» и «Защита морских побережий от опасных природных явлений» были посвящены защите населенных пунктов и производственных объектов от воздействия цунами. Итогом работы стала программа «Цунамизащита», которая была профинансирована только после катастрофического цунами 26.12.2004 г. в Индийском океане. В конце 2004 г. - начале 2005 г. были опубликованы Поручение Президента России В. В. Путина и Поручение Правительства РФ «Об обеспечении сейсмо- и цунамибезопасности территории Российской Федерации, но

профинансировано было только развитие приборного обеспечения системы предупреждения цунами, а вопросы смягчения последствий воздействия цунами инженерными методами по-прежнему серьёзно не рассматривались, хотя анализ цунамириска выполнялся. После этого только на 29-ом заседании Межправительственного совета по сотрудничеству в строительной деятельности стран СНГ 10—11 июня 2010 г. в г. Минске, комиссия по сейсмостойкому строительству и уменьшению природно-техногенных последствий вместе с НТЦСС приступила к разработке межправительственного стандарта ГОСТ «Здания, сооружения и территории. Требования безопасности при воздействии цунами». [30], [32]

Наконец, с 2018 г. вводится в действие утвержденный приказом Минстроя России от 23 июня 2017 года № 915/пр свод правил СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», разработанный рабочей группой АНО «Региональный альянс для анализа и уменьшения бедствий» во исполнение поручения Президента Российской Федерации В. В. Путина и соответствующих поручений Заместителя Председателя Правительства Российской Федерации Д. Н. Козака. Данный СП применим при проектировании новых и реконструкции эксплуатируемых прибрежных и береговых зданий и сооружений с целью обеспечения их нормируемой надежности и безопасности при воздействии цунами. Данный результат был достигнут путем конкретизации и реализации в отношении цунамиопасных территорий требований ФЗ № 384 «Технический регламент «Безопасность зданий и сооружений» и ФЗ № 68 (ред. от 23.06.2016 г.) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Главная задача данного нормативного документа – смягчение вероятных бедствий, и повышение уровня безопасности объектов с учетом риска возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС), обусловленных воздействием цунами путем разработки и внедрения градостроительной стратегии безопасного развития, превентивных архитектурно-планировочных и конструктивных решений при возведении и реконструкции строительных сооружений на цунамиопасных территориях (ЦОТ). Свод правил

«Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» состоит из Введения, 12 разделов, библиографии и 7 приложений. [30], [31], [72]

В раздел 3 «Термины и определения» данного СП введено несколько новых и уточненных терминов и определений. При этом используемая терминология увязана и унифицирована с используемой инженерами-строителями, океанологами и специалистами МЧС. В разделе 4 «Основные положения» описаны концептуальные подходы, условия и договоренности, используемые в данном нормативном документе, кроме этого в данном разделе представлена процедура решения целевой задачи и указаны требования, предъявляемые к исходным данным и изложены принципиально важные ограничения строительного освоения цунамиопасных территорий. Раздел 5 посвящен классификации цунамиопасных территорий и строительных сооружений. Разделы 6-9 посвящены воздействию различных волн цунами на прибрежные территории, гидротехнические сооружения и береговые объекты. В разделе 10 представлены градостроительные аспекты уменьшения цунами-риска и требования к планировке и застройке цунамиопасных урбанизированных территорий. В разделе 11 представлены положения по сценариям бедствий и анализу цунами-риска. Заключительный 12-ый раздел включает в себя рекомендации по мониторингу и контролю цунамибезопасности зданий, сооружений и территорий. [30], [31], [72]

Таким образом, использование СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» позволяет минимизировать риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью людей и значительно снизить материальный ущерб.

### **1.5.3 Прогнозирование и оповещение о возможных цунами**

Национальные системы предупреждения о цунами в тихоокеанских странах начали создаваться с середины XX в. после сильных цунами в этом регионе (алеутское 1946 г., камчатское 1952 г.). Так, в 1958 г., была создана Российская служба предупреждения о цунами (СПЦ). [34], [35]

После сильного цунами в Индийском океане 2004 года, во многих странах мира начали создаваться системы предупреждения о цунами и сегодня это международная программа, в которой участвует большое количество служб, занимающихся отслеживанием сейсмичности и приливных явлений, а также служб, занимающихся оперативным распространением этой информации между всеми цунамиопасными регионами нашей планеты [26], [107].

Системы прогнозирования и оповещения о цунами в настоящий момент далеки от совершенства и развиваются. Дело в том, что тревога о цунами должна объявляться только в пунктах, непосредственно находящихся в опасности, и сопровождаться информацией о времени прихода первой и последней волн и их амплитудах. На данный момент времени системы прогнозирования волн цунами имеют большое количество ложных тревог, также иногда случаются «пропуски». Кроме того, нет дифференциации по степени опасности для каждого конкретного участка побережья. Данные несовершенства появляются из-за непростого взаимодействия волн цунами с дном водоема. Дело в том, часть энергии цунами, отражаясь поочередно от берега и границы шельфа, может усиливаться, в результате чего появляются волны, значительно отстающие по времени от первой волны, однако имеющие большую высоту. [34] [35]

В связи с этим, в настоящий момент идет поиск способов улучшить системы мониторинга и обнаружения волн цунами, а также есть необходимость в увеличении их количества и проведения всемирных учебных мероприятий по смягчению последствий, связанных с цунами. [34], [35], [109]

#### **1.5.4 Моделирование волн цунами**

Согласно данным Costas E. Synolakis и Eddie N. Bernard [109], первые исследования посвященные накату одиночной длинной волны на наклонный пляж было выполнено исследователями Hall и Watts в 1953 году.

В нашей стране исследования посвященные взаимодействиям различных преград с волнами типа цунами проводятся с начала 70-х гг. Данные исследования

проводились с использованием натуральных и модельных экспериментов при активном участии И.С. Нуднера [32].

В настоящее время проводится большое количество исследований в этой области. Несмотря на то, что любая волна цунами индивидуальна, большинство исследований призваны уточнить существующие формулы, с помощью которых можно точнее определить параметры волны цунами, а также ее воздействие на сооружения различной формы.

Так, исследователи Kuswandi Kuswandi, Radianta Triatmadja и Istiarto Istiarto провели испытания [102], [103] для определения воздействия волн цунами на опоры круглые в плане. На рисунке 1.17 изображена схема испытательной установки.

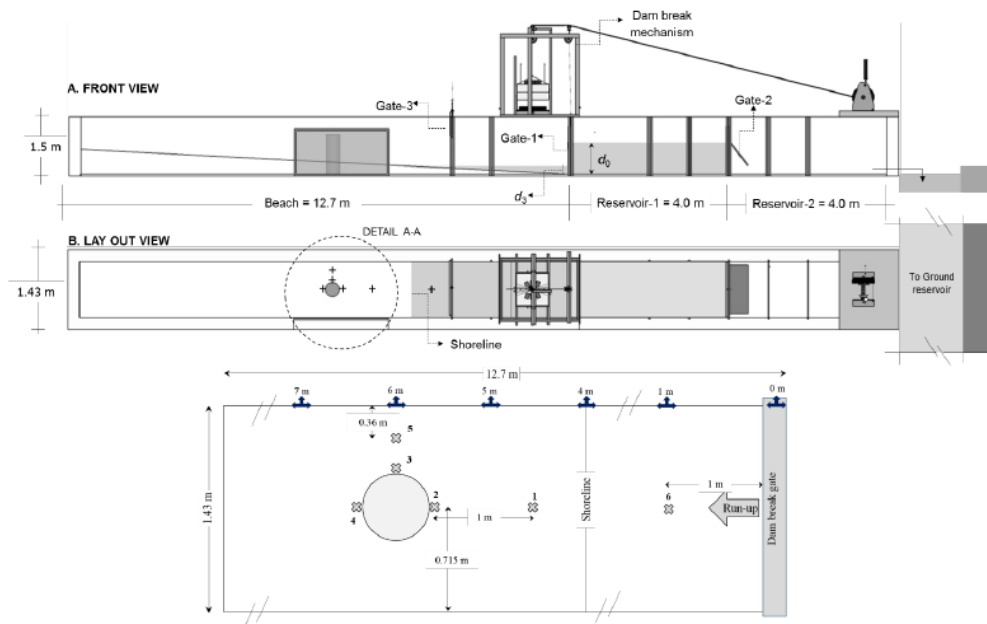


Рисунок 1.17 – Схема испытательной установки

Как видно из рисунка, испытательная установка представляет собой канал с установленной в ней испытуемым объектом. На рисунке 1.18 представлены фотографии наката искусственной волны на модель опоры.

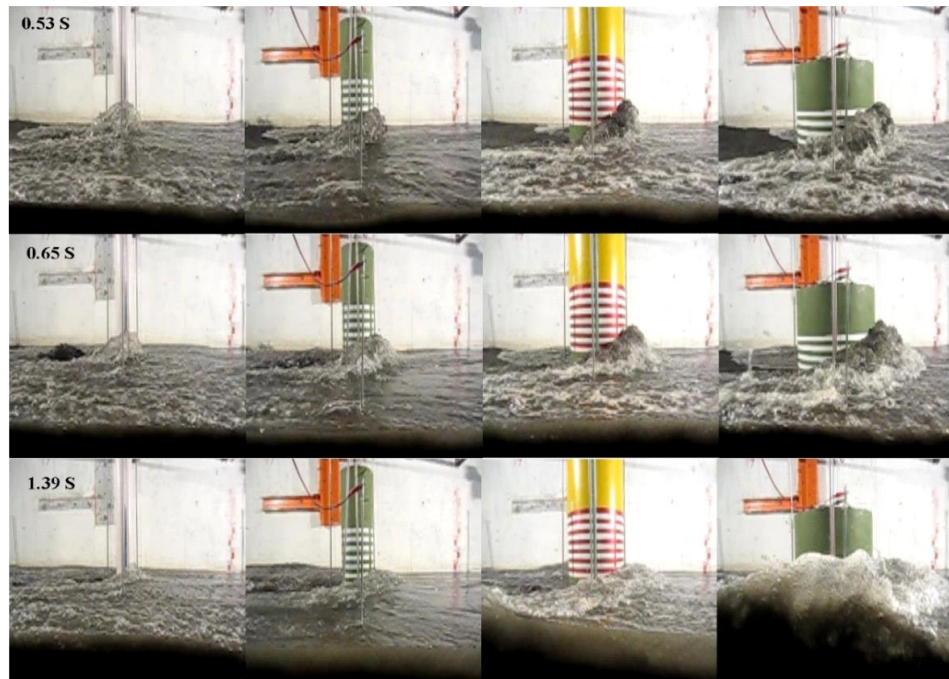


Рисунок 1.18 – Накат волны на модель опоры

Эти исследования необходимы для дальнейшего изучения влияния волн цунами на круглые в плане опоры. В исследовании [102] установлено, что при отношении диаметра цилиндра ( $b$ ) к ширине канала ( $B$ ) меньше 0,15 ( $(b / B) < 0,15$ ) не происходит эффекта бокового удара, а также что локальное изменение высоты волны около цилиндра может достигать примерно 0,60 высоты цунами. В выводе исследования [103] сказано, что уже достигнуто согласие между численным моделированием и экспериментом.

Испытания, описанные в статье [98] посвящены изучению влияния затопления и перенос мусора от волн цунами на прибрежную инфраструктуру. Эти эксперименты также направлены на получение дополнительных данных, которые могут использоваться для проверки различных моделей сооружений.

Сотрудники организации NEES (Network for Earthquake Engineering Simulation) в статье [106] опубликовали первые эксперименты в волновом бассейне, в ходе которых производили накат волны на модели отдельных зданий и модель населенного пункта. Авторы ожидают, что разработанный на основе экспериментальных данных инструмент численного моделирования TRF станет неотъемлемой частью технических инструментов для будущих экспериментов.



Сотрудники университета Чулалонгкорна (Бангкок (Таиланд)) описали [104] результаты испытаний, посвященных определению напряжений в испытуемых моделях. Конфигурация передней и задней стенок здания с расположением датчиков представлена на рисунке 1.19.

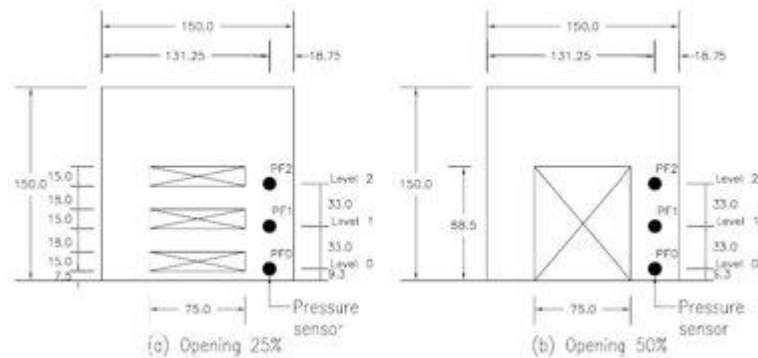


Рисунок 1.19 – Конфигурация передней и задней стенок здания с расположением датчиков

При воздействии волны на модель датчики определяли возникающие напряжения на передней и задней стенках модели. В эксперименте исследовалась зависимость напряжений от конфигурации стены (сплошная стена, с отверстиями площадью 25% от общей площади стены и с отверстиями площадью 50% от общей площади стены). В результате замеров был сделан вывод, что при открытой на 25% стене уменьшается сила волны, действующая на все здание порядка 15-25% по сравнению со сплошной стеной. При открытой на 50% стене сила волны уменьшается на 30% - 40%. Сокращение силы волны цунами наглядно демонстрирует преимущества открытой конфигурации стен. Стоит отметить, что в мировой практике цунамистойкого строительства широко используется открытый нежилой нижний этаж, позволяющий волне свободно проходить под зданием, не нанося большие повреждения. Данные эксперименты наглядно подтверждают целесообразность такого способа повышения цунамистойкости зданий.

Большинство из приведенных выше исследований показывает необходимость в проведении различного рода экспериментов с фиксацией различных параметров и показателей. В итоге все полученные в ходе этих экспериментов данные необходимы для создания точных математических

аппаратов описания волн цунами и, как следствие, создание компьютерных программ моделирования наката волн на побережье и на сооружения.

При этом, исследователи из Великобритании уже заявляют о достаточной точности их математической модели наката волн на прямоугольное здание, находящееся в канале. Эту математическую модель верифицировали также с помощью эксперимента [97].

В статье [116] было исследовано воздействие волны цунами на мостовые сооружения различной конфигурации. Исследование было проведено на моделях, построенных в программе GPUSPH. Достоверность результатов данной вычислительной программы подтверждена экспериментально. Визуализация наката волны цунами на мостовое сооружение представлена на рисунке 1.20.

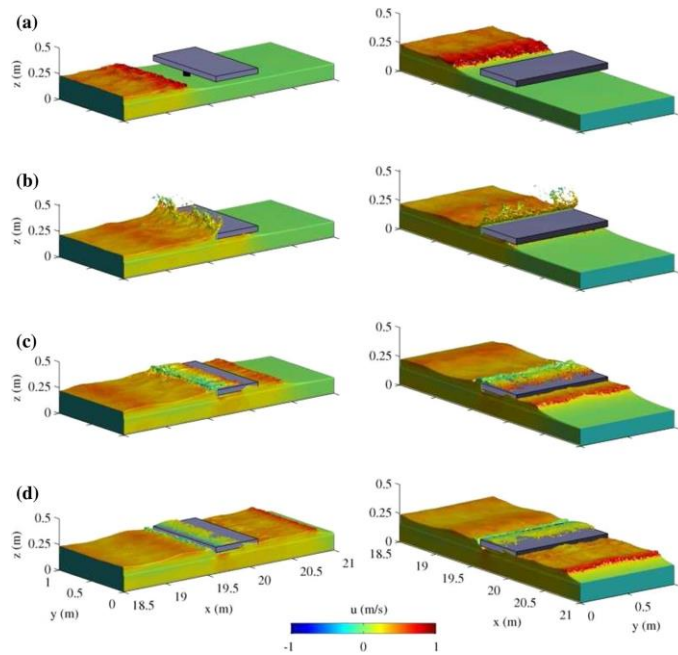


Рисунок 1.20 – Накат волны цунами, смоделированный в GPUSPH

Данная работа показывает, что в настоящее время хорошо изучен математический аппарат наката волн цунами на берег и взаимодействие их с сооружениями. Но, как отмечают авторы, данная программа пока не может учесть влияние дополнительной ударной силы от обломков, а также влияние других сооружений на исследуемый объект.

В заключении важно отметить, что и на территории Российской Федерации существуют волновые бассейны для моделирования волн цунами, среди крупных

можно назвать стенды, расположенные во ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 23 ГМПИ, МГСУ и др. Кроме того, в России развиваются и численные методы моделирования волн цунами и взаимодействия их с различными объектами [7], [8], [28], [29], [46], [47].

### **1.5.5 Эвакуационные мероприятия**

Ученые Воробьев Ю.Л. [11], Злобин Т.К. [24], Попов М.А. [62] в своих исследованиях отмечают, что для каждого населенного пункта разрабатывается свой план и порядок эвакуации, что связано с индивидуальными характеристиками местности и ресурсами, имеющимися для решения данной проблемы. Планы эвакуации должны включать в себя такие мероприятия: обучение населения действиям при цунами, создание системы оперативного оповещения, организация и поддержание в надлежащем порядке транспортных эвакуационных путей, обеспечение быстрого прекращения работы в портах с оперативным отводом судов от причалов в море и другие мероприятия.

При этом стоит отметить, что если из города всего 1-2 дороги ведут в глубь материка (или острова), то на дорогах могут возникнуть заторы, что и произошло 23 января 2018 года на Аляске в г. Кадьяк [65]. Это очень опасная ситуация, так как, волна цунами может настигнуть население в момент эвакуации.

Сотрудники «Камчатского УГМС» [26] на своем сайте опубликовали перечень местных признаков цунами, которые должен знать каждый житель цунамиопасного региона. К таким признакам они относят: сильное землетрясение, необычное изменение уровня моря, значительная и внезапная осушка дна (отход воды от берега) и ряд других признаков.

Кроме того, исследования [76], [105] показывают, что многие животные могут почувствовать сейсмические толчки, которые приводят к образованиям цунами. Поэтому жителям сейсмо- и цунамиопасных регионов следует также обращать внимание на необычное поведение животных.

В источниках [11], [24], [26], [62] при появлении вышеперечисленных признаков цунами жителям рекомендуется спасаться бегством. Для этого, не дожидаясь предупреждений (их может и не быть), необходимо собрать ценные вещи, документы, небольшой запас продовольствия и непромокаемых вещей, отключить газ и воду и покинуть опасную зону, предупредив по пути как можно больше людей о возможной опасности. Покидая опасную зону, следует забраться как можно выше, используя для перемещения сопки, холмы и водоразделы, рекомендуется избегать путей вдоль речных долин и низменностей. Безопасным считается место высотой 10-20 метров над уровнем моря, но желательно подняться на высоту в 30-40 метров. Если нет возвышенности, то рекомендуется уйти от моря минимум на 2 км. Остаться в безопасном месте необходимо в течении нескольких часов, так как цунами обычно представляет собой серию волн, при этом первая волна не обязательно самая мощная.

На рисунке 1.21 приведен план эвакуации, следуя которому становится понятно, что лучшим способом спастись от цунами является побег либо на возвышенность, либо вглубь берега. Другой возможностью спастись являются верхние этажи прочных зданий, способных выдержать удар цунами.

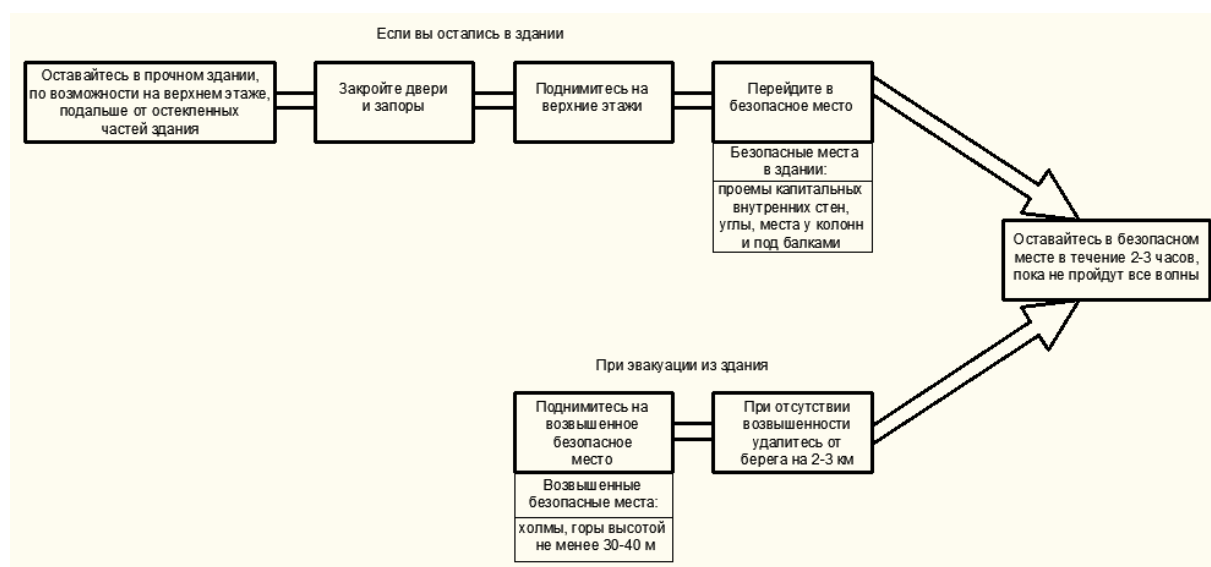


Рисунок 1.21 – Действия при внезапном подходе цунами

В настоящее время развитие урбанизированных территорий, подверженных действию волн цунами, должно осуществляться с использованием карт цунами-

риска, которые показывают индивидуальный риск на разных уровнях (территориальном, городском и объектном). [72]

### **1.5.6 Инженерные сооружения и природные системы защиты**

Многие исследователи [11], [26], [62], [86] подчеркивают, что для защиты от цунами необходимо предусмотреть берегозащитные мероприятия. К таким мероприятиям можно отнести посадку деревьев вдоль берега, строительство земляного вала и строительство специальных берегозащитных сооружений типа стен, волноломов, молов и дамб. Стоит отметить, что защитные сооружения должны воздвигаться в зависимости от цунамирайонирования побережья. Это связано с тем, что сильное цунами способно разрушить слабые цунамизащитные сооружения.

Воробьев Ю.Л. [11] и сотрудники «Камчатского УГМС» [26] отмечают, что при не очень сильных цунами можно использовать посадки леса на берегах, по возможности рекомендуется использовать сосны. Лесопосадки способны гасить энергию цунами, уменьшать ширину полосы затопления от этих волн и, кроме того, достаточно эффективно задерживают плавающие предметы, которые дополнительно увеличивают степень разрушения.

По мнению ученых Шульчина В.Н., Шеломенцева С.В. и Ларионова В.И. в работе [86], простейшим видом берегозащитных стен является земляной вал (рисунок 1.22). Земляной вал может располагаться на некотором удалении от береговой линии, либо непосредственно у уреза воды. Для защиты вала от размывания обычно со стороны моря устраивают каменное мощение не менее чем в два слоя, а со стороны берега лесонасаждение. Зачастую земляной вал одновременно является и дорожной насыпью, т.к. по нему прокладывают автодорогу или железнодорожные пути.

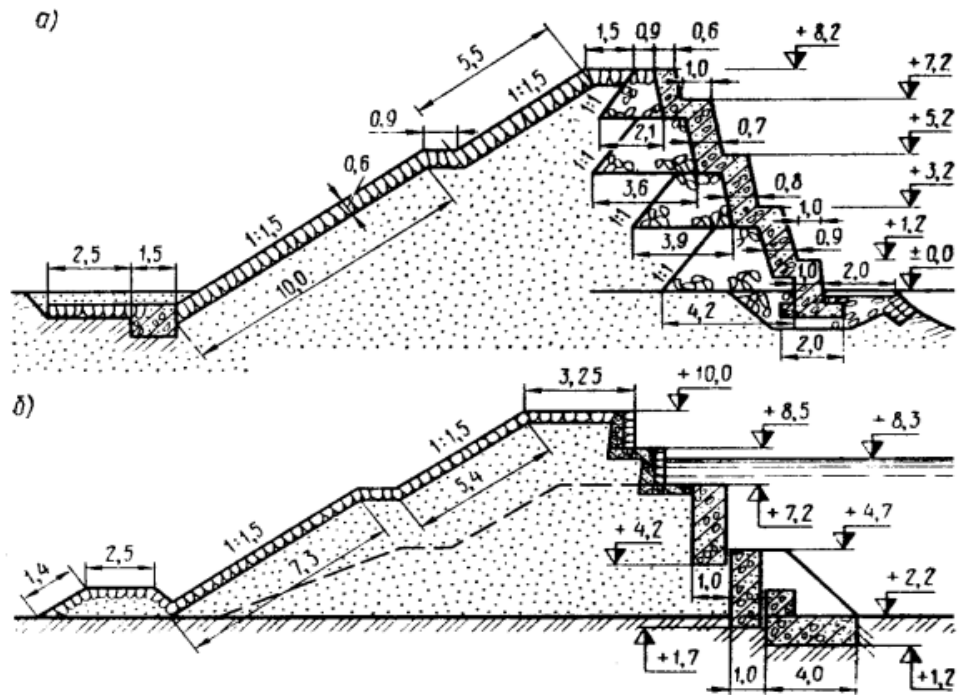


Рисунок 1.22 – Берегозащитные морские стены с бетонной или слабоармированной железобетонной облицовкой морских граней и каменным мощением на тыловых поверхностях

Более серьезной защитой, требующей больших затрат ресурсов, является строительство различного рода морских стен, дамб, волноломов, существенно возвышающихся над берегом [11], [86].

Одним из вариантов является строительство двух конструктивно не связанных между собой стен, схема которых показана на рисунке 1.23.

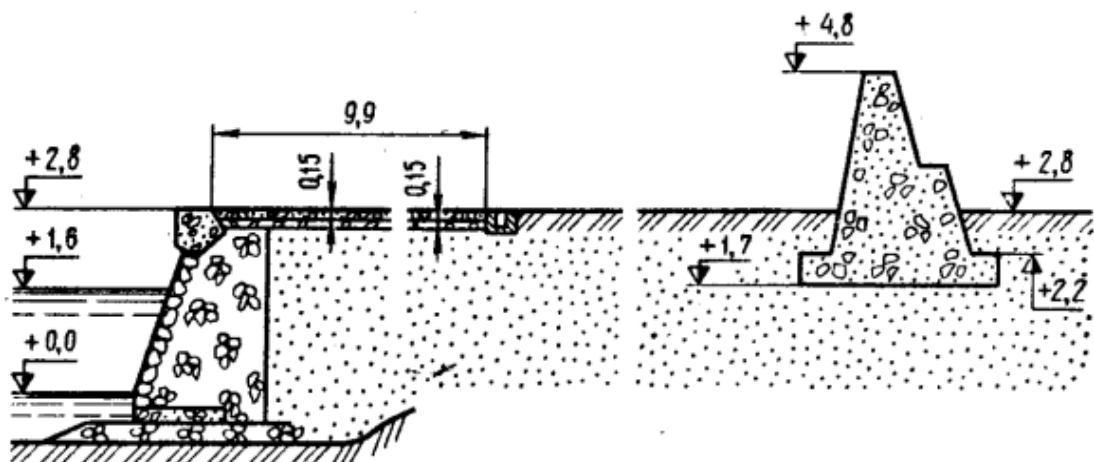


Рисунок 1.23 – Две отдельные берегозащитные морские стены

Нижняя стена из каменной кладки с бетонным верхом представляет собой подпорную конструкцию, поднимающуюся только до уровня берега. Через некоторое расстояние располагается вторая стена, возвышающаяся над поверхностью. Вторая стена выполнена из монолитного бетона и цель ее не только препятствовать движению водного потока на берег, но и задерживать обломки судов и разрушенных зданий [86].

Другим вариантом являются берегозащитные сооружения, на которых с морской стороны устраивают каменную призму с покрытием фасонными блоками (рисунок 1.24). Эти блоки достаточно эффективно гасят энергию цунами.

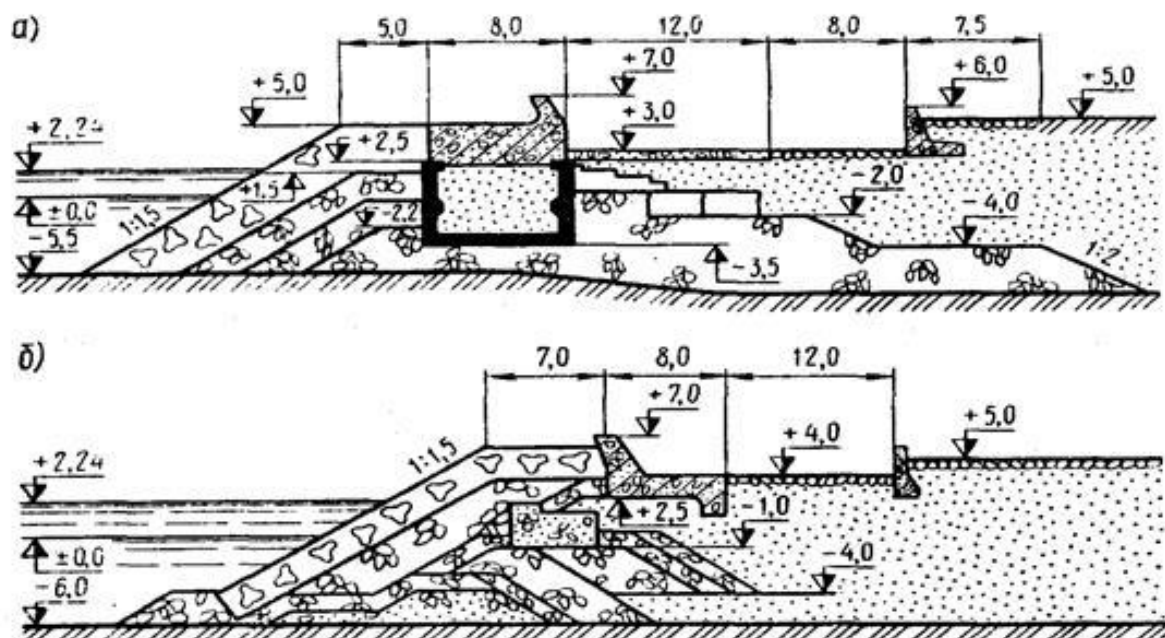
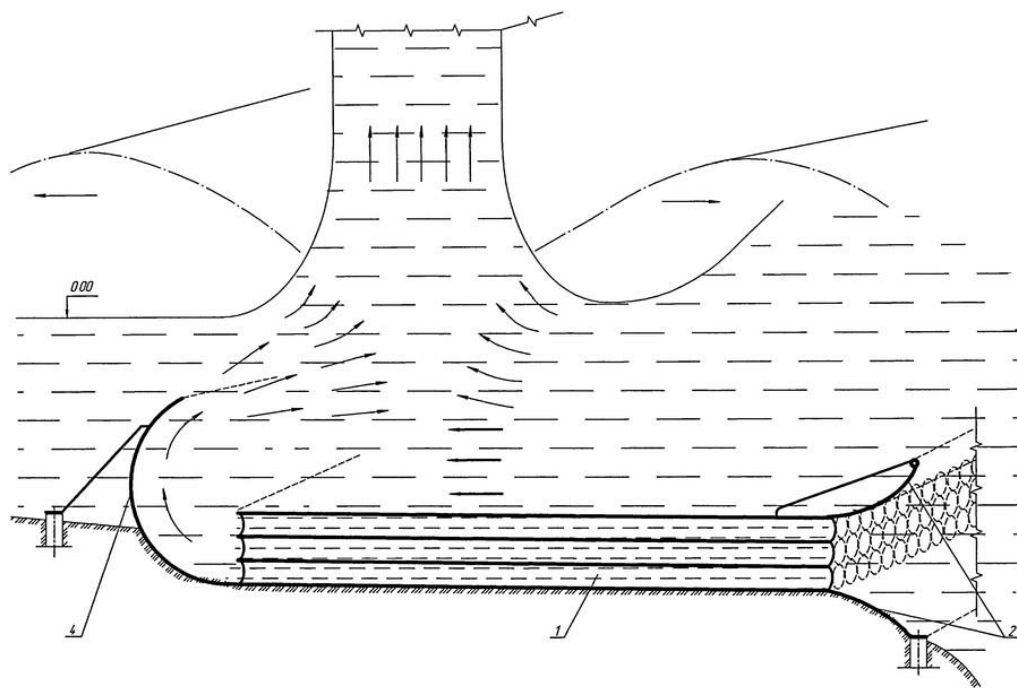


Рисунок 1.24 – Берегозащитные стены с использованием каменной призмы

Воробьев Ю.Л. [11] и Шульчина В.Н. [86] отмечают, что все цунамизащитные сооружения должны быть достаточно устойчивыми и прочными, хорошо сопротивляться статическому и динамическому действиям водного потока. Для этого рекомендуется обносить поверхности неразмываемыми покрытиями. Эффективность любого берегозащитного сооружения зависит напрямую от размеров его поперечного сечения, то есть от ширины основания, высоты и крутизны откосов.

В работах [11], [62], [26], [86] подчеркивается, что на сегодняшний день ни один тип берегозащитных мероприятий не предоставляет стопроцентную защиту побережья. Кроме того, некоторые барьеры могут только усугубить ситуацию, так, например, сильное цунами может вырвать деревья или разрушить каменные конструкции, в последствии эти деревья и обломки могут протаранить здания и нанести дополнительный ущерб.

Кроме вышеперечисленных традиционных наземных сооружений по защите побережья от цунами, существуют еще различные патенты по подводным цунами-гасителям. Один из них, разработанный Ясаковым Н.В. [57], приведен на рисунке 1.25. Согласно формуле изобретения, нижний поток волны цунами разгоняется с помощью диффлекторов (например, пакета труб), а затем поворачивается на встречу основному верхнему потоку. В результате этого столкновения происходит гашение энергии волны цунами, в следствии чего уменьшается ее скорость и амплитуда.



Фиг. 2

Рисунок 1.25 – Подводный цунами-гаситель

Также в качестве подводного средства гашения цунами могут быть использованы подземные каналы, которые будут отводить часть энергии волны цунами, в результате чего волна цунами на побережье либо не образуется, либо ее



высота существенно уменьшается. принципиальная схема данного решения представлена на рисунке 1.26.

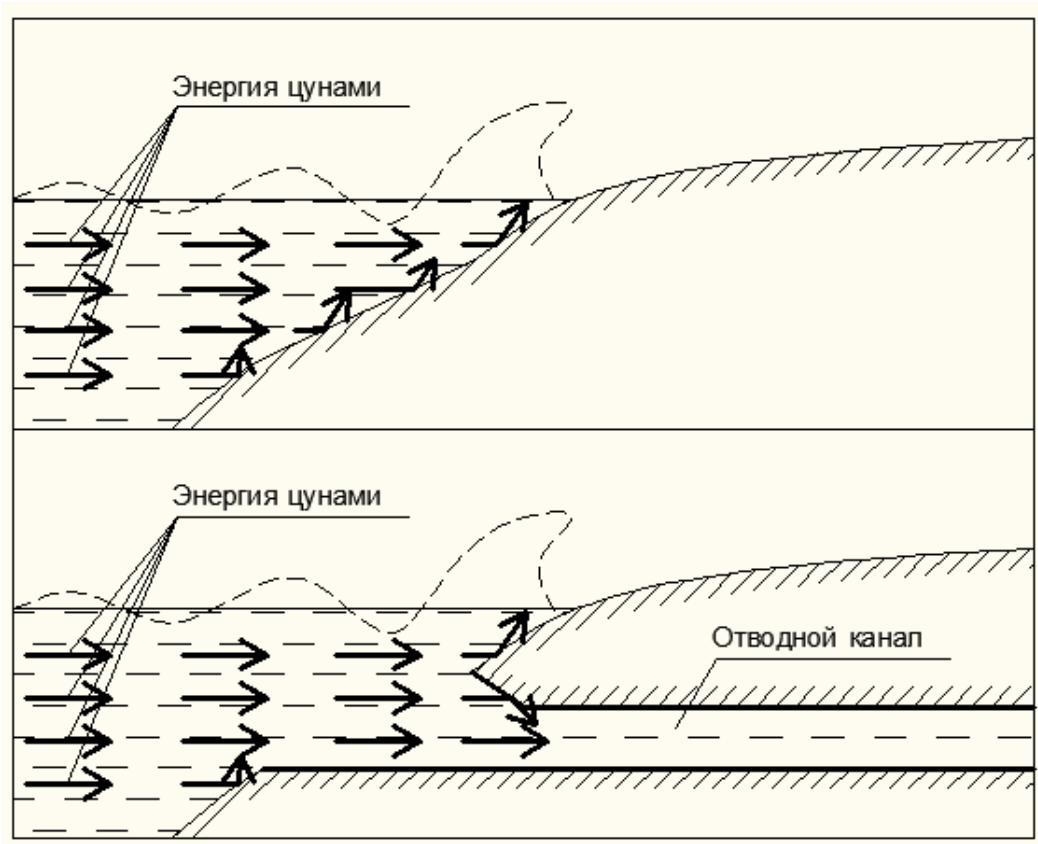


Рисунок 1.26 – Распределение энергии волны без отводного канала и с ним

Кроме защиты побережья от непосредственного действия волн цунами следует предусмотреть защиту от обломков. Так, берегоукрепительные сооружения, описанные выше, защищают побережье от обломков, принесенных с моря (прибрежные причалы, лодки, пирсы и т.д.). Но наряду с этим необходим перенос автомобильных стоянок из опасной прибрежной зоны в зону с малой глубиной потока и строительством защищенных подземных гаражей. [72]

Таким образом, существует много вариантов по инженерной защите побережья от цунами. Однако на сегодняшний день ни один из них не дает стопроцентной гарантии защиты. Вследствие этого становится актуальным проектирование цунамибезопасных зданий.

### 1.5.7 Цунамистойкое строительство

Исследователи Воробьев Ю.Л. [11], Злобин Т.К. [24] и Попов М.А. [62] считают, что в районах с постоянно существующей угрозой цунами необходимо заблаговременно принять меры для обеспечения защиты населения и материальных ценностей от ударов стихии. К таким методам ученые относят создание и усовершенствование системы наблюдения, прогнозирования и оповещения населения, переселение населения подальше от опасных зон, строительство защитных сооружений (волноломов, насыпей и других) и цунамистойкое строительство.

Как отмечает ученый Попов М.А. [62], некоторые методы зачастую не получается использовать, так, например, не получается переселять коренное население в глубь суши, это связано с их историей и основным промыслом (рыболовство). А системы прогнозирования цунами на данный момент только разрабатываются, так как это достаточно сложная задача.

Таким образом, необходимо использовать все возможные меры по защите населения от цунами. Одним из наиболее перспективных методов является цунамистойкое строительства. [11], [62]

Во многих работах, посвященных рекомендациям по цунамистойкому строительству ([11], [24], [19], [72], [99]) приводится ряд одинаковых требований. Во-первых, здание должно быть прочным, способным выдержать большую ударную нагрузку. Во-вторых, здание рекомендуется располагать длинной стороной вдоль движения волны цунами. При таком расположении удару будет подвержена меньшая часть здания и будет обеспечена наибольшая прочность. В-третьих, фундаменты следует строить таким образом, чтобы они были неподверженными влиянию эрозии почвы и подмыву в результате действия течений. В-четвертых, первый этаж следует делать как можно более «открытым». Это делается для того, чтобы волна спокойно проходила сквозь него и не наносила сильный удар по зданию. Желательно делать первый этаж нежилым. В-пятых,

ключевые элементы инфраструктуры здания (аварийные генераторы, лифтовые моторные отсеки и др.) следует располагать на не затапливаемых этажах.

Таким образом, наиболее устойчивым к воздействию волн цунами являются жесткие здания из железобетона или металлического каркаса с открытым и высоким первым этажом. Такое здание способно «пропустить» сквозь первый этаж большую массу воды, а также хорошо сопротивляется ударной нагрузке.

Другим вариантом проектирования цунамистойкого здания может быть схема защищенного от подтопления территории, которую предложили изобретатели Елисеев А.Д. в патенте № РФ 2376418 [50] и Соболев В.М. в патенте № РФ 2410511 [49]. У данных патентов одна идея: здание изначально находится близко к земле, но, в случае подтопления территории, оно приподнимается с помощью различных механизмов (рисунок 1.27). Как отмечалось выше, данные патенты предложены для борьбы с подтоплением территории, когда уровень воды постепенно набирает высоту, однако возможен вариант использования данной идеи в зданиях, находящихся на цунамиопасном побережье. В таком случае здания будут приподниматься если существует угроза цунами и опускаться в исходное положение, когда угроза минует.

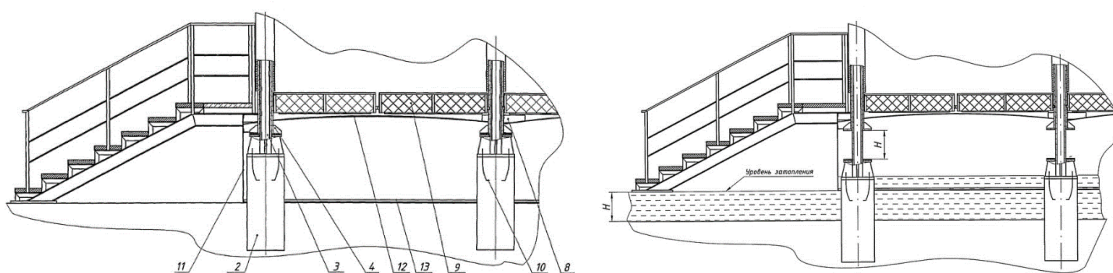


Рисунок 1.27 – Здание в исходном (слева) и в приподнятом на высоту  $H$  (справа) положениях

Также интересным вариантом жилого дома в цунамиопасных районах мог бы стать ленинградский экспериментальный пластмассовый дом (рисунок 1.28) авторами которого были архитектор Щербенок А.П. и инженер Левинский Л.Г.. Данный дом обладал относительно небольшой массой, что положительно

сказывается на сейсмостойкости, а также имел небольшой по площади технический (первый) этаж. [42]

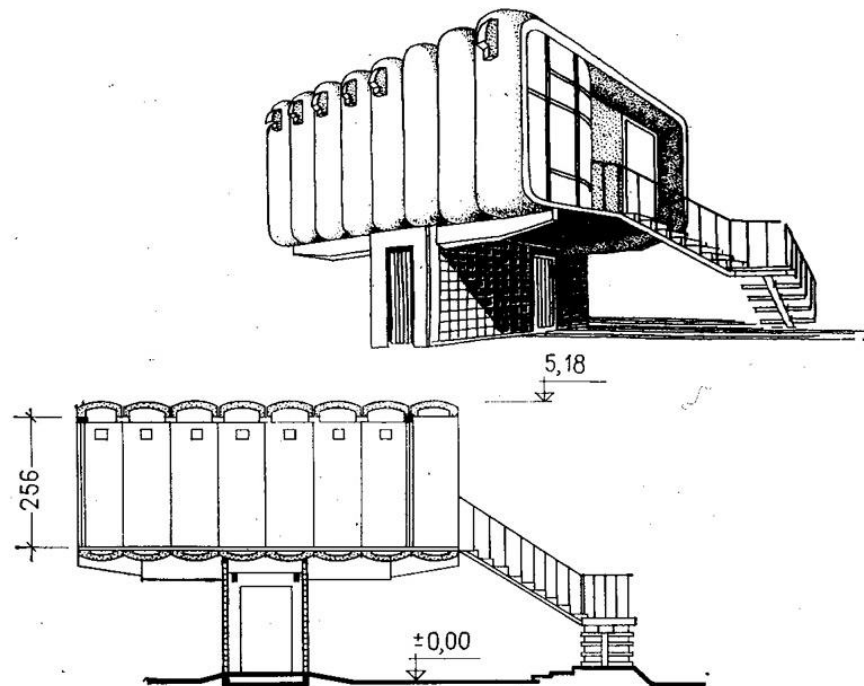


Рисунок 1.28 – Ленинградский экспериментальный пластмассовый дом

Пользуясь принципом свободного пространства под зданием, проектировщики из FDN Group (Нидерланды) разработали проект водостойкого дома [25], представленный на рисунке 1.29.



Рисунок 1.29 – Водостойкий дом

Стоит отметить, что в настоящее время уже существует множество проектов (некоторые уже реализованы), в которых используется идея свободного пространства под зданием. Чаще всего свободное пространство под зданием нужно в условиях плотной городской застройки для экономии места: небольшие дома «Street Tree Pods», спроектированные для Лондона [108] (рисунок 1.30 (а)), «2+U» в Сиэтле [111] (рисунок 1.30 (б)), здание «8 Chifley» в Сиднее [96] (рисунок 1.30 (в)).

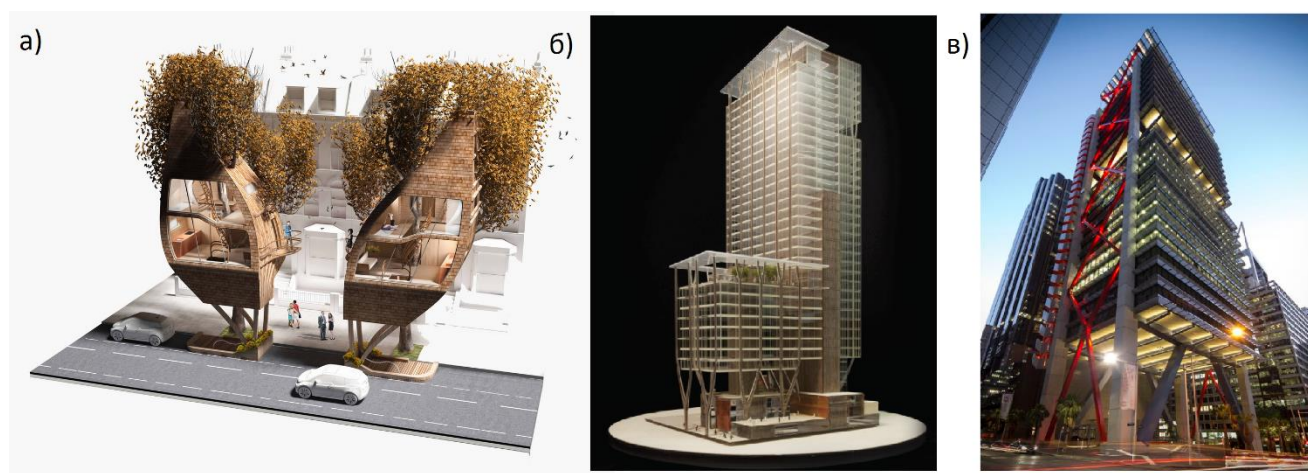


Рисунок 1.30 – Примеры проектов зданий в условиях плотной городской застройки со свободным пространством под ними: а – «Street Tree Pods»; б – «2+U»; в – «8 Chifley»

Существует большое количество проектов, в которых свободное пространство реализовано для сохранения природного ландшафта или существующих зданий: здание Министерства автомобильных дорог Тбилиси [21] (рисунок 1.31 (а)), конструкция поселения, предложенная С. И. Рубинштейном [59] (рисунок 1.31 (б)), комплекс «Бадаевский», проект которого представляет собой здания, расположенные над бывшим Бадаевским пивоваренным заводом в Москве [64] (рисунок 1.31 (в)).



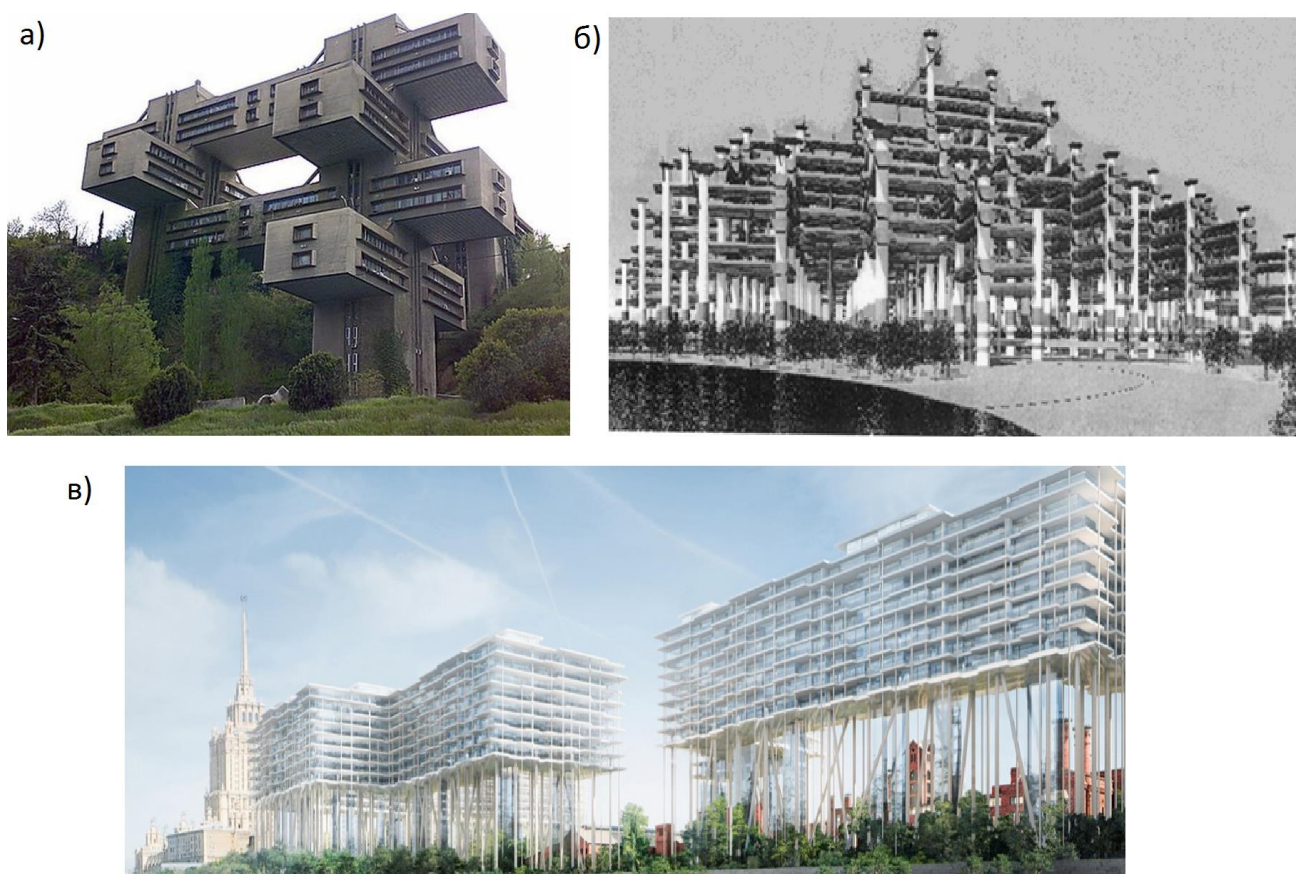


Рисунок 1.31 – Примеры проектов зданий со свободным пространством под ними для сохранения природного ландшафта или исторической застройки: а – здание Министерства автомобильных дорог Тбилиси; б – конструкция поселения; в – «Бадаевский»

Кроме того, с середины прошлого века было построено не мало многоквартирных жилых домов, приподнятых над уровнем земли с помощью опор: одним из первых и самых знаменитых стала «Жилая единица», построенная в Марселе и спроектированная знаменитым архитектором Ле Корбюзье [20] (рисунок 1.32 (а)). На территории нашей страны наиболее яркими представителями подобного архитектурного решения являются 4 дома на Новосмоленской набережной в Санкт-Петербурге [77] (рисунок 1.32 (б)) и «Дом авиаторов» в Москве [42] (рисунок 1.32 (в))



Рисунок 1.32 – Примеры проектов многоквартирных домов, приподнятых над уровнем земли: а – «Жилая единица» в Марселе; б – дома на Новосмоленской набережной в Санкт-Петербурге; «Дом авиаторов» в Москве

Все рассмотренные выше проекты (за исключением водостойкого дома, изображенного на рисунке 1.29) были спроектированы не для защиты населения от волн цунами, но используют популярную в цунамистойком строительстве идею открытого пространства под зданием. Но после цунами в Японии в 2011 году, японским архитектором Киитиро Сако предложен проект «Tohoku Sky Village» (рисунок 1.33), который представляет собой приподнятые на 10-20 метров участки суши, на которой расположены жилые дома со всей необходимой инфраструктурой. Стоит отметить, что данный проект до сих пор не реализован из-за большой стоимости. [3], [75]



Рисунок 1.33 – Tohoku Sky Village: а – изометрический вид нескольких поселений; б – изометрический вид одного поселения; в – вид сбоку одного поселения

Еще одно решение, способствующее сохранению панельного здания в работоспособном состоянии после сейсмического или ударного воздействия, описано в патенте № RU 2479702 С1 [51]. Авторы данного патента Блажко В.П. и Харитонов Г.В. предлагают ввести тросовые соединения между панелями. Тросовые соединения состоят из основного троса и механизма его натяжения. Данные соединения обеспечивают дополнительную связь всех строительных конструкций дома, что увеличивает сопротивление здания сейсмической и ударной нагрузке. Схема соединения панелей представлена на рисунке 1.34.

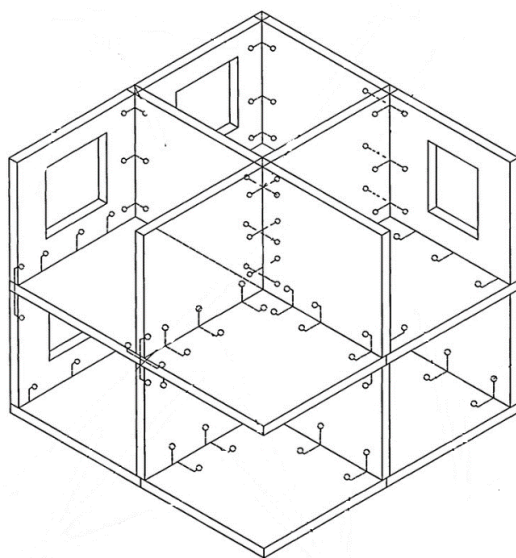


Рисунок 1.34 – Схема соединения панелей здания тросами

Подводя итог всему вышесказанному, важно отметить, что существуют и постоянно разрабатываются новые разнообразные способы защиты зданий и населения от волн цунами: защита побережья берегоукрепительными сооружениями, конструктивные приемы борьбы с ударной нагрузкой, архитектурно-планировочные способы уменьшения площади воздействия волн цунами. В настоящее время уменьшение площади воздействия волн цунами является наиболее перспективным направлением развития цунамистойкого строительства.



## 1.6 Выводы по главе. Цель и задачи исследования

1. Анализ природы происхождения волн цунами показывает, что большинство возникающих цунами связано с высокой сейсмоактивностью некоторых регионов нашей планеты. При этом землетрясения, происходящие под водой, вызывают наиболее разрушительные волны цунами. Стоит отметить, что на мировой карте (в том числе и на территории Российской Федерации) есть немало мест, где проявляются одновременно и сейсмическая активность и волны цунами. Воздействие этих двух стихийных бедствий приводит к большим человеческим жертвам и материальному ущербу. Одним из последних и наиболее ярких примеров являются землетрясение и цунами в Японии в 2011 году, которые за достаточно короткий временной промежуток, привели к гибели почти 25 тысяч человек и огромному материальному ущербу.

2. Оценка территории Российской Федерации свидетельствует о том, что в нашей стране опасности возникновения волн цунами подвержены районы, омываемые Тихим океаном (полуостров Камчатка, Курильские острова, побережья Охотского моря и Приморья и острова Сахалин), побережья Каспийского и Черного морей. При этом Тихоокеанский регион является одним из наиболее опасных с точки зрения воздействия сейсмической активности и цунами в мировом масштабе.

3. В мировой практике сформировались определенные подходы к проектированию населенных мест, находящихся в цунамиопасных районах. К таким подходам относятся градостроительные, конструктивные, архитектурно-планировочные решения, кроме того разрабатываются эвакуационные мероприятия и совершенствуются системы регистрации и прогнозирования волн цунами.

4. Среди подходов по увеличению безопасности зданий при воздействии волн цунами, одним из наиболее перспективных и рациональных методов является организация свободного пространства под зданием, позволяющее волне цунами

проходить здание «насквозь» не оказывая большого воздействия на конструкции здания. Но данный подход не всегда возможно реализовать на практике.

5. В настоящее время разрабатываются нормативные документы по проектированию зданий в районах подверженных воздействию волн цунами. Одним из первых таких документов в мире является российский СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», разработанный автономной некоммерческой организацией "Региональный альянс для анализа и уменьшения бедствий" (АНО "РАДАР"). Данный документ имеет огромную важность для проектирования в цунамиопасных регионах, но на данный момент этот документ не апробирован в практике.

На основании вышеизложенного целью диссертации является дальнейшее изучение вопросов безопасности зданий и сооружений в районах подверженных одновременному воздействию волн цунами и сейсмической активности с разработкой практических рекомендаций по снижению этих воздействий на жизнедеятельность человека.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ работ в области цунамибезопасности строительных конструкций, как в России, так и за рубежом, включая оценку различных средств цунамизащиты зданий и сооружений.

2. Изучить особенности влияния волн цунами на различные строительные объекты.

3. На основе анализа предложить вариант цунамизащиты зданий, обладающий высокой сейсмо- и цунамибезопасностью. Результатом использования такого средства будет сохранение жизней людей и их имущества в условиях сейсмической активности и наката волн цунами.

4. Дать расчетное обоснование предлагаемого решения с учетом современных нормативных подходов проектирования сейсмостойких зданий и сооружений, выполнить подбор рациональных параметров предлагаемого конструктивного решения.

5. Изучить особенности влияния волн цунами на предлагаемое решение с учетом существующих норм определения нагрузки от волн цунами.
6. Разработать рекомендации по усовершенствованию существующей методики определения нагрузки от волн цунами на предлагаемую конструкцию цунамизащиты и на аналогичные сооружения.

## **2 ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СРЕДСТВА ЦУНАМИЗАЩИТЫ**

### **2.1 Общие положения**

В предыдущей главе были описаны основные причины образования волн цунами, среди которых наибольшую опасность представляет сейсмическая активность. Это приводит к тому, что цунамиопасные районы являются также и сейсмоопасными. Таким образом, проектирование зданий и сооружений в данных районах является сложной инженерной задачей, так как необходимо одновременно обеспечивать и сейсмо- и цунамибезопасность.

Нужно понимать, что в вопросах сейсмобезопасности у человечества намного больше опыта, чем в вопросах цунамибезопасности. Это связано с тем, что площадь сейсмоопасных районов на нашей планете намного превышает площадь цунамиопасных. В результате чего, в настоящее время уже в достаточной мере сформированы основные представления о воздействии землетрясений на различные сооружения и установлены основные принципы обеспечения сейсмостойкости строительных конструкций. В то же время вопросы образования волн цунами, их распространение и взаимодействие с различными преградами, в том числе и со строительными конструкциями, далеки до полного изучения.

В подтверждение можно вспомнить трагедию 5 ноября 1952 года произошедшую на Курильских островах. В ночь с 4 на 5 ноября жители города Северо-Курильск проснулись от 7-8 балльного землетрясения, при этом большого ущерба само землетрясение не нанесло, но вызвало цунами, которое дошло до населенного пункта примерно через 40 минут. Первая волна была небольшая и залила только часть домов, вторая волна была катастрофической, и за ней была небольшая третья волна. очевидцы описывали это цунами как большой высоты вал воды, который сопровождался шумом бурлящей воды и ломающихся зданий. Таким образом, здания, пережившие землетрясение, не пережили волны цунами,

которые были вызваны этим землетрясением. В этой связи появляется необходимость в анализе воздействия волн цунами на различные строительные конструкции. [61]

В данной главе, с помощью компьютерного моделирования, проведено исследование влияния основных параметров волны (высота, скорость, длина) на величину воздействия волн типа цунами на различные строительные конструкции. Кроме того, рассмотрен вариант конструктивного решения защиты населения и зданий от волн цунами, учитывающее мировой опыт проектирования задний и сооружений в цунамиопасных районах, а также учитывающее взаимодействие волн цунами с рассмотренными строительными конструкциями.

Дано предварительное расчетно-теоретическое обоснование возможности практического использования предлагаемого решения, которое выполнено с учетом сейсмической нагрузки по СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» [69] и нагрузки от волны цунами, которая определялась по простой методике, представленной в РД 31.33.07-86 «Руководство по расчету воздействия волн цунами на портовые сооружения, акватории и территории. Рекомендации для проектирования» [63].

## **2.2 Изучение динамического влияния волн цунами на строительные конструкции различных объектов**

Как было сказано выше, в районах подверженных цунами, как правило, подвержены и сильным землетрясениям. Но на данном этапе исследования были рассмотрены волны цунами изолированно от других воздействий.

Волны цунами оказывают на здания или сооружения силовое воздействие. Нагрузки от цунами относятся к особым и учитываются в особом сочетании нагрузок [69]. Данные исследования были выполнены в модуле «Fluid Flow (Fluent)» программного комплекса ANSYS 2021. Был рассмотрен накат волн на три различных сооружения: сплошное (без проемов и открытых пространств) здание, здание с открытым первым этажом и фрагмент мостового сооружения. В данном

исследовании было определено как параметры волны влияют на величину давления от этой волны на рассмотренные сооружения, при этом не учитывались различные варианты конструктивных схем, систем и используемых строительных материалов рассмотренных сооружений.

Первоначально было смоделировано сплошное здание размерами 32x18x20 м., а также расчетная область вокруг него размерами 42x31x21 м. Расчетная модель представлена на рисунке 2.1.

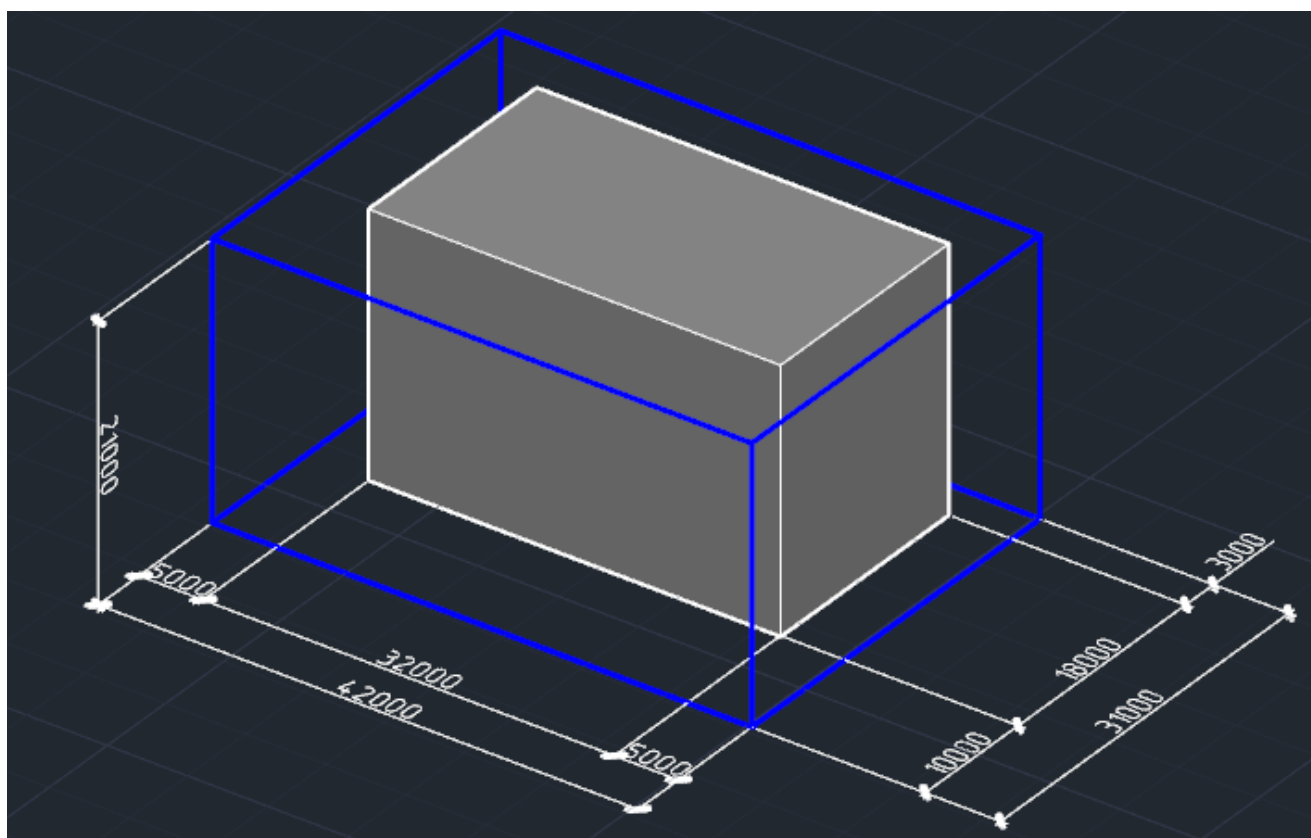


Рисунок 2.1 – Расчетная модель сплошного здания

Далее данная расчетная модель была разбита на конечные элементы размерами 0,1-1 метров с учащением сетки у граней (рисунок 2.2). Такое решение позволяет повысить точность решения и в то же время не превысить максимальное количество элементов.

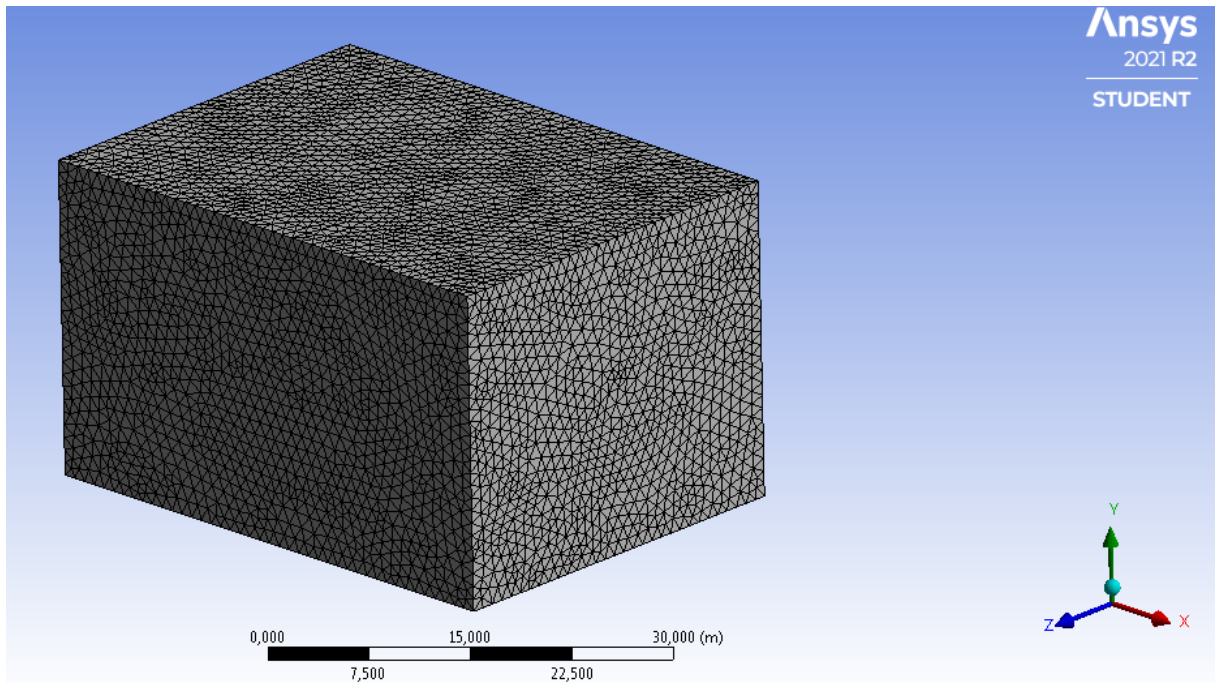


Рисунок 2.2 – Генерация сетки конечных элементов

На данное сооружение был смоделирован накат волн с различными характеристиками. Первоначально варьировалась высота волн: 3, 5, 7 и 10 метров при постоянной скорости волны 15 м/с. Далее было исследовано влияние скорости волны (она задавалась 5, 10, 15 и 20 м/с) при постоянной высоте волны 10 метров. Модель распространения волн принята «Short Gravity Waves» по теории кноидальной / уединенной волны. Данный выбор обоснован тем, что все остальные механизмы генерации волн, которые представлены в модуле «Fluid Flow (Fluent)», предназначены для средних и больших глубин, а в данном исследовании рассматривается накат волн на береговые сооружения. Для выбранной модели распространения волн волновой профиль определяется по формуле (2.1) [91]:

$$\xi(X, t) = -h + h_{cr} \left[ 1 + \frac{H}{h_{cr}} \operatorname{cn}^2(\alpha, m) + \text{Higher} \cdot \text{order} \cdot \text{terms} \right], \quad (2.1)$$

где  $h$  - высота жидкости;

$H$  – высота волны;

$h_{cr}$  – высота от желоба, которая определяется соотношением (2.2):

$$\frac{h}{h_{cr}} = 1 - \frac{H E(m)}{h K(m)} + \text{Higher} \cdot \text{order} \cdot \text{terms} \quad (2.2)$$

$c$  – скорость волны, определяемая по формуле (2.3):

$$c = \sqrt{gh_{cr}} \left( 1 + \frac{H}{h} \left[ \frac{1}{2} - \frac{E(m)}{K(m)} \right] + \text{Higher} \cdot \text{order} \cdot \text{terms} \right) \quad (2.3)$$

$m$  – параметр эллиптической функции, который вычисляется путем решения уравнения (2.4):

$$\frac{\lambda}{h} = 4K(m) \sqrt{\frac{3H}{h}} [1 + \text{Higher} \cdot \text{order} \cdot \text{terms}] \quad (2.4)$$

$\alpha$  – переменная, которая определяется по формуле (2.5):

$$\alpha = k_x(x - x_0) + k_y - \omega_e t \quad (2.5)$$

$n$  – индекс волновой теории;

$x_0$  – расстояние от начала координат.

Описанные выше параметры являются изначальными установками входной грани – грани расчетной области от которой начинается генерация волн (синяя грань на рисунке 2.3). Кроме этой грани, в расчетной области были определены и другие объекты, которым также необходимо было задать граничные условия и начальные параметры.

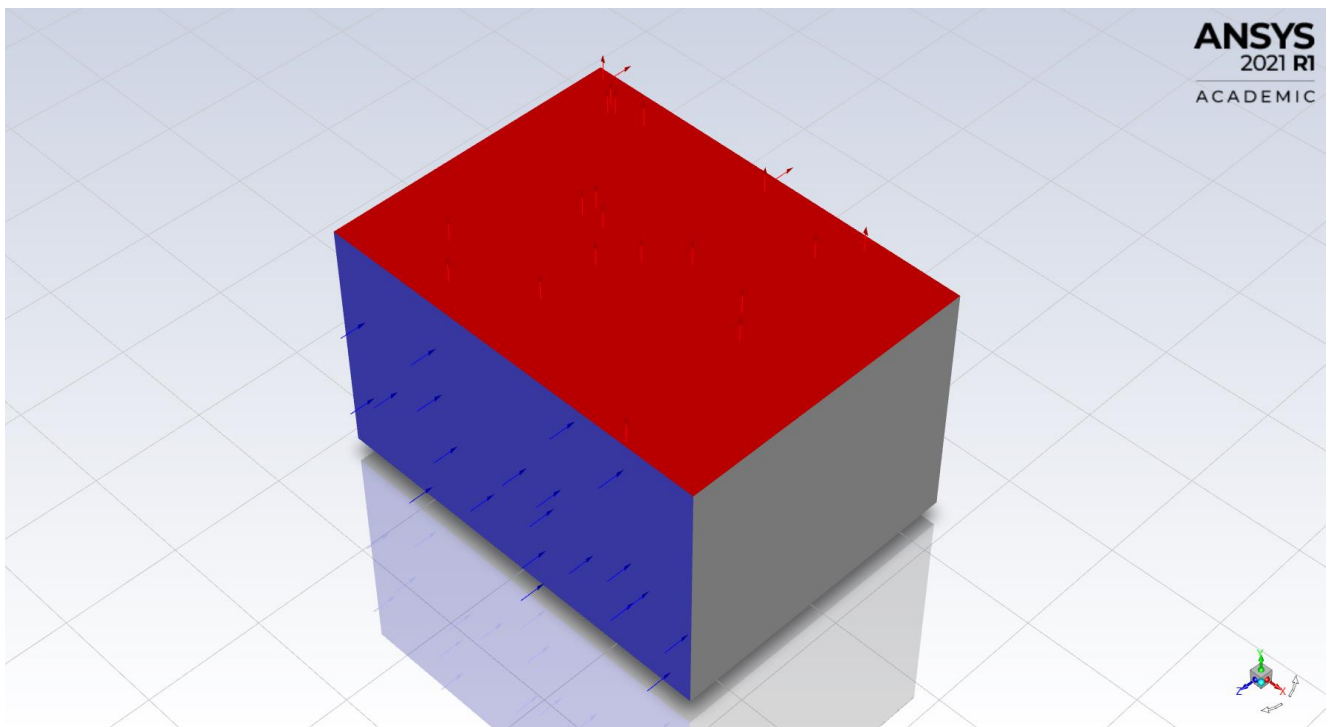


Рисунок 2.3 – Граничные параметры расчетной области

Как видно из рисунка 2.3, у расчетной области есть одна входная грань (синяя) и две выходные (красные), которые были заданы как открытые без



дополнительного давления. Это сделано, чтобы сгенерированные на входной грани волны могли свободно выходить через грани выхода. Боковые грани и нижняя (на рисунке 2.3 они серые) заданы как стационарные стенки со значением «No Slip», чтобы исключить потерю энергии волны при взаимодействии с ними, такие же параметры заданы и зданию.

Кроме рассмотренных выше граничных условий также были заданы и параметры самого объема расчетной области. Основными из этих параметров являются наличие гравитации ( $9,81 \text{ м/с}^2$ ) и многофазность модели. Многофазность подразумевает то, что в расчетной области встречаются несколько различных веществ (в данном случае воздух и жидкость). Для каждого вещества установлены стандартные параметры плотности и вязкости, взятые из библиотеки программы Ansys по умолчанию.

Получившаяся картина наката волны высотой 10 метров на здание представлено на рисунке 2.4.

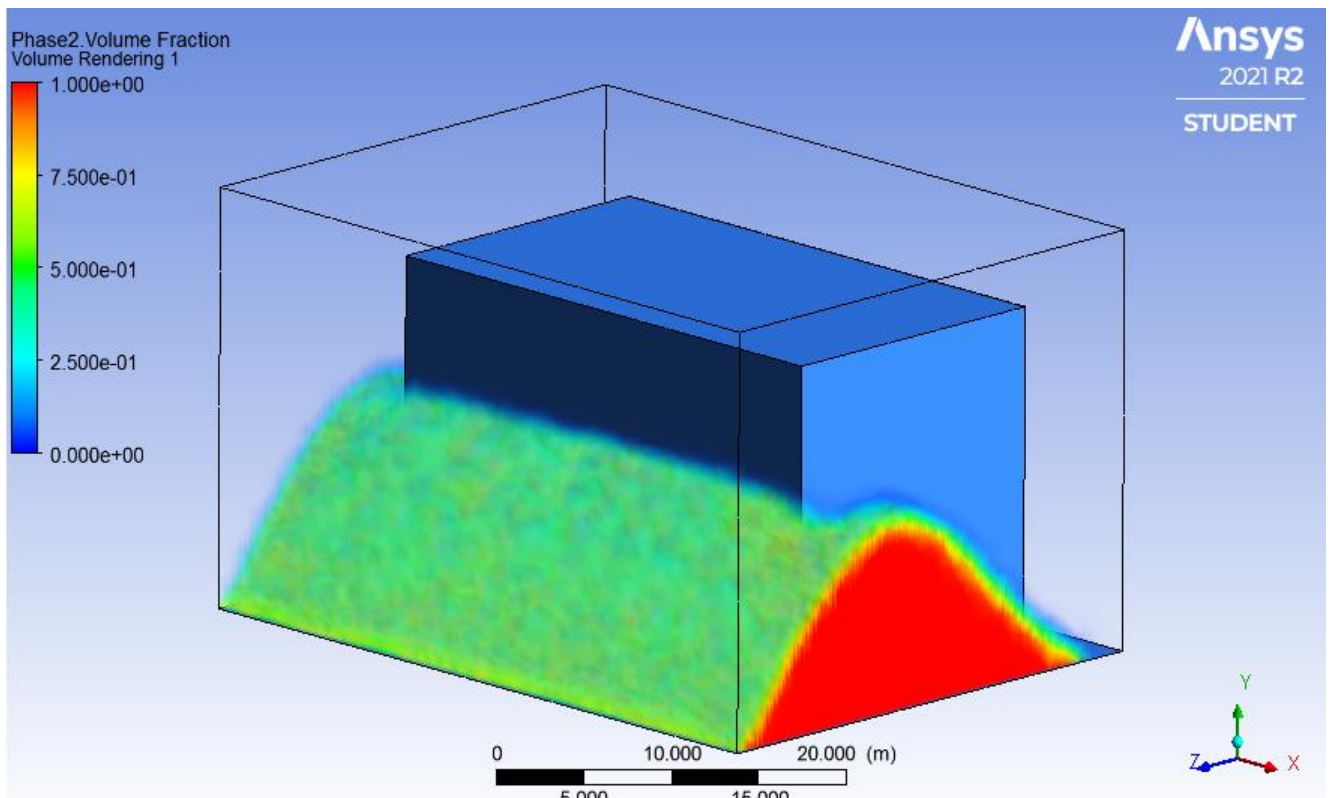


Рисунок 2.4 – Накат волны 10 метров на сплошное здание

На рисунке 2.5 представлено распределение давления от волны на здание.

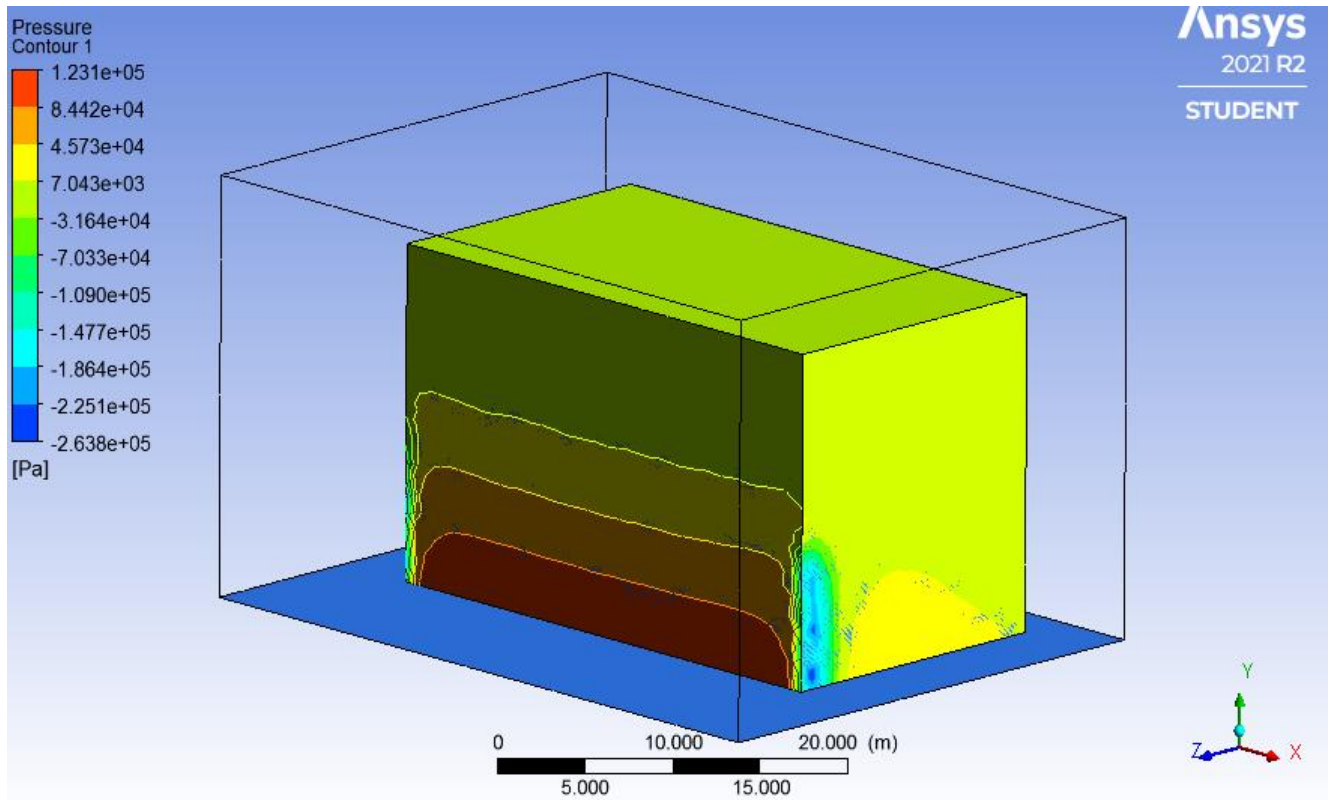


Рисунок 2.5 – Давление волны 10 метров на сплошное здание

Результаты расчетов с различными характеристиками волны сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Давление от волны на сплошное здание

Фиксированный параметр	Изменяемый параметр	Максимальное давление, МПа
Скорость волны 15 м/с.	Высота волны 3 м.	0,021
	Высота волны 5 м.	0,053
	Высота волны 7 м.	0,098
	Высота волны 10 м.	0,123
Высота волны 10 м.	Скорость волны 5 м/с	0,068
	Скорость волны 10 м/с	0,101
	Скорость волны 15 м/с	0,123
	Скорость волны 20 м/с	0,156

На рисунке 2.6 изображен график влияния параметров волны на величину оказываемого ею давления.

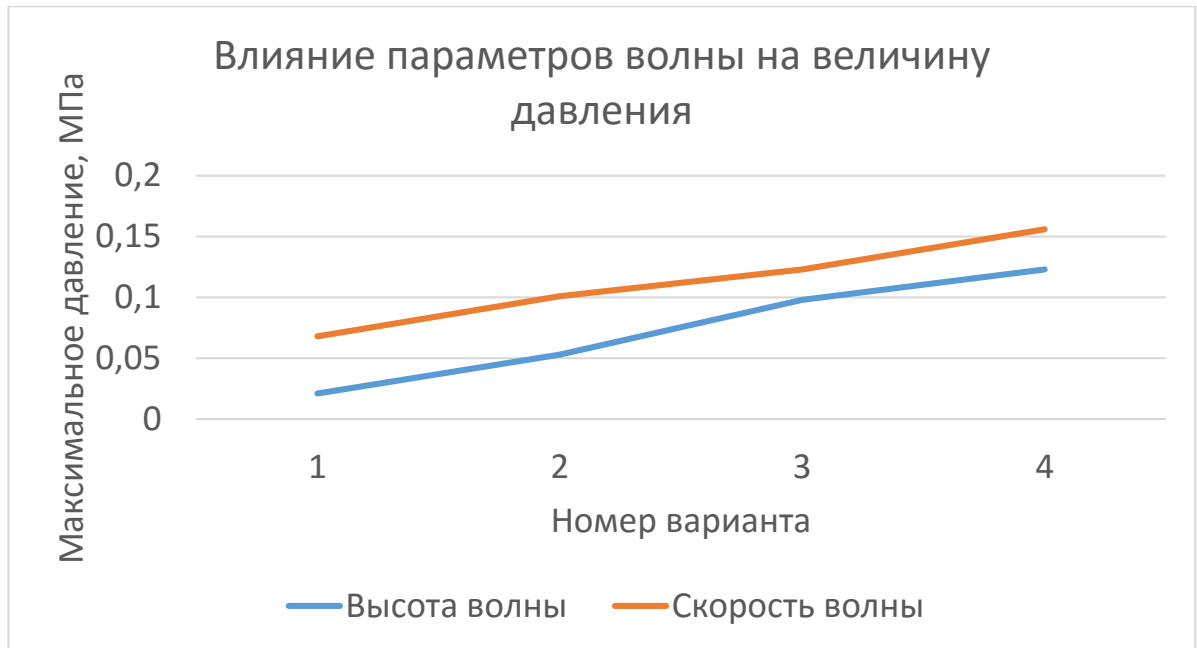


Рисунок 2.6 – Влияние параметров волны на величину давления

Как видно из таблицы 2.1 и рисунка 2.6, все исследуемые параметры волны влияют на величину гидродинамического давления от волны на сплошное здание. При этом, максимальное влияние (в процентном соотношении) на величину давления, оказывает высота волны. Этот параметр, по сути, определяет общую массу воды в волне, так как чем шире волна (больше ее длина) и больше ее высота, тем больший объем и, как следствие, большая масса воды давит на здание или сооружение. Более того, наблюдается практически прямая зависимость между этими величинами: увеличение высоты волны либо длины волны в два раза приводит к увеличению давления от волны в 2 раза.

Кроме численного сравнения величины максимального давления, интересен и характер его распределения. Как видно из рисунка 2.5, на вертикальной сплошной стене, расположенной перпендикулярно движению волны, давление распределяется примерно по треугольной эпюре: от нулевого значения в уровне гребня волны до максимального значения в уровне подошвы волны, где масса воды больше. Таким образом, максимальное давление испытывают стены первого этажа. При заданных параметрах волны (высота 10 м., скорость 15 м/с) это давление достигает  $12,5 \text{ т/м}^2$ . Такие серьезные нагрузки для сплошных стен могут привести

к обрушению этих стен и, в случае, если эти стены являются несущими, могут привести к обрушению всего здания.

Как было сказано в предыдущей главе, в настоящее время уменьшение площади воздействия волн цунами является наиболее перспективным направлением развития цунамистойкого строительства. Часто применяют здания с открытым нижним этажом. Идея заключается в строительстве здания, имеющего высокий нежилой первый этаж. На первом этаже такого здания часто располагается автомобильная парковка с лестнично-лифтовым узлом. При таком исполнении, волна цунами пройдет через первый этаж «насквозь», не задевая вышележащие жилые этажи. В таком случае волна цунами оказывает давление не на все здание, а только на колонны первого этажа.

Для подтверждения данных выводов, вторым этапом расчетного исследования по моделированию наката волн цунами на различные сооружения в программном комплексе ANSYS 2021 стало здание с открытым нижним этажом. Само здание имеет те же габариты (32x18x20 м.), но теперь установлено на колонны высотой 5 м. Расчетная область имеет размеры 42x31x26 м. Расчетная схема здания с открытым нижним этажом представлена на рисунке 2.7.

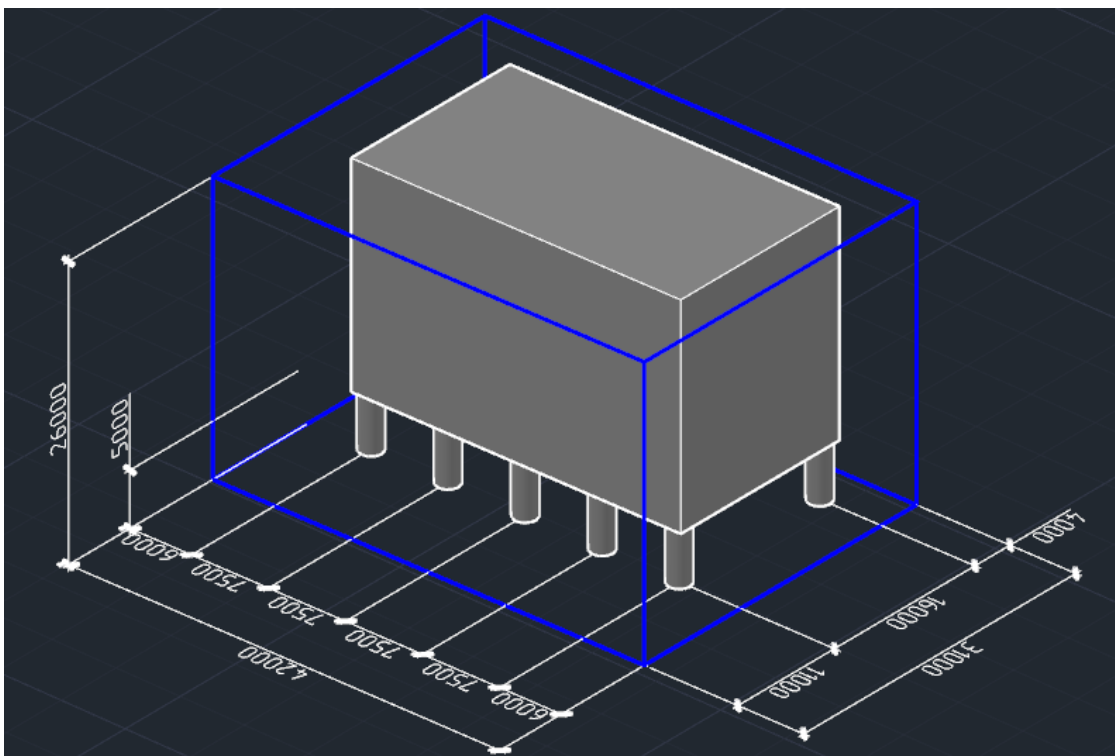


Рисунок 2.7 – Расчетная схема здания с открытым нижним этажом

Далее на данной расчетной схеме были проведены такие же операции по разбиению расчетной модели на конечные элементы и заданию исходных данных, как и с предыдущей. На рисунке 2.8 представлена картина наката волны высотой 10 м. на здание с открытым нижним этажом.

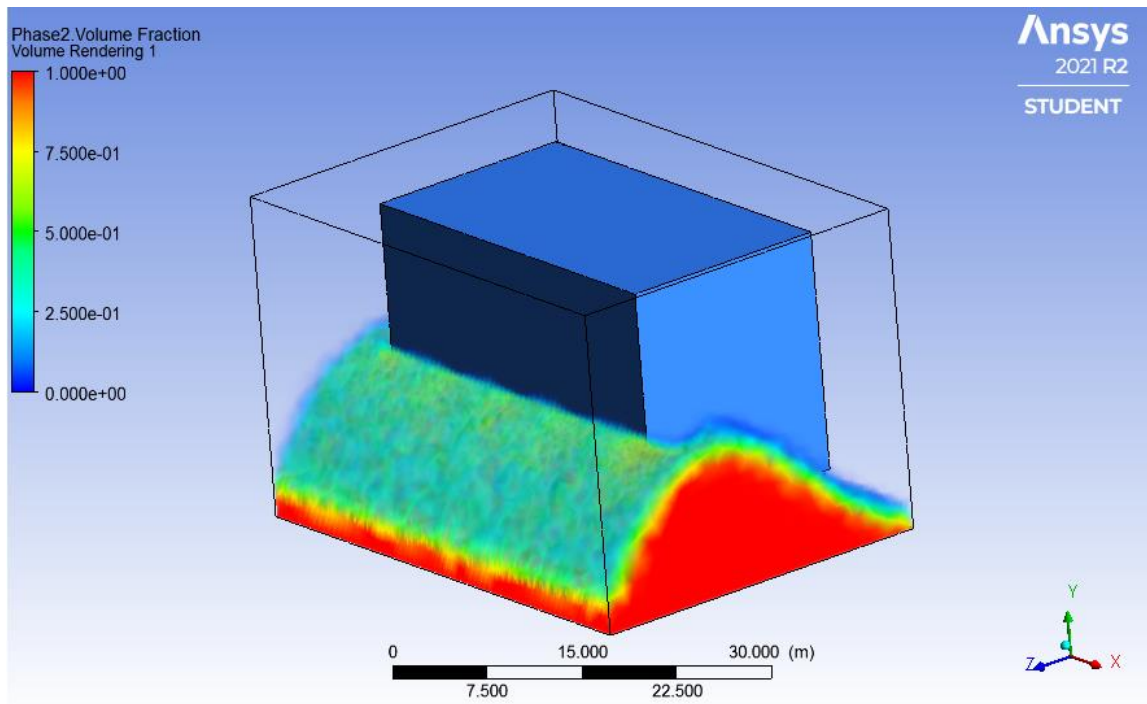


Рисунок 2.8 – Накат волны 10 метров на здание с открытым нижним этажом

На рисунке 2.9 представлено распределение давления от волны на здание.

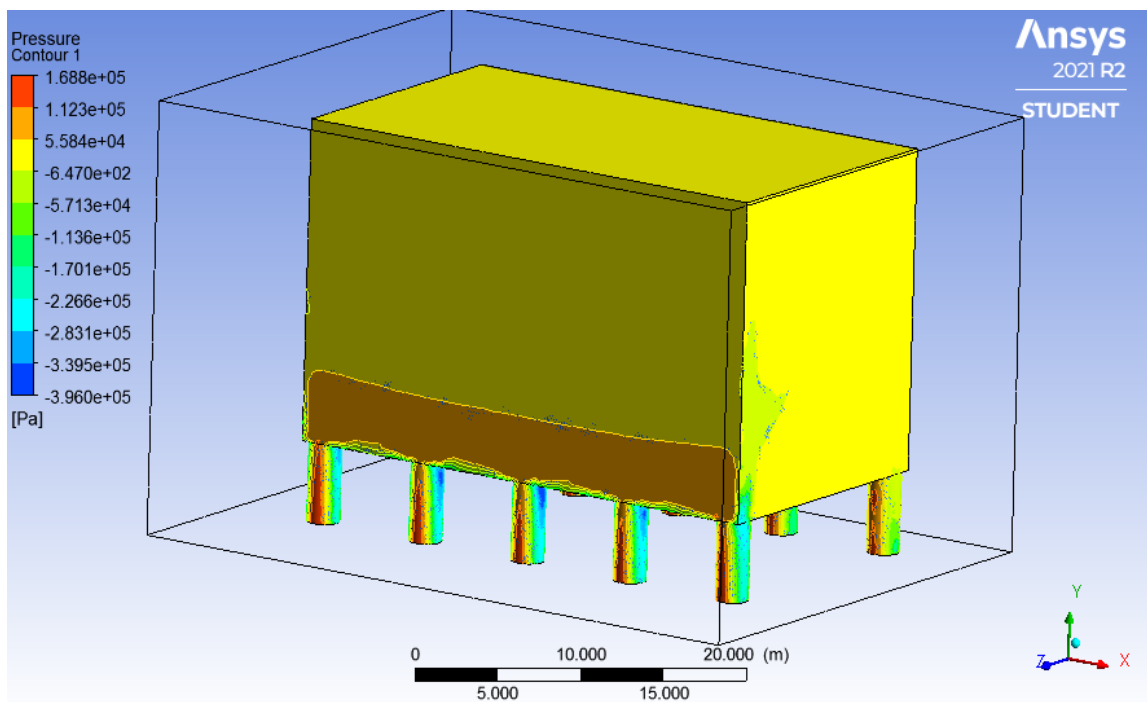


Рисунок 2.9 – Давление волны 10 метров на здание с открытым нижним этажом

Результаты расчетов с различными характеристиками волны сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Давление от волны на здание с открытым нижним этажом

Фиксированный параметр	Изменяемый параметр	Максимальное давление, МПа
Скорость волны 15 м/с.	Высота волны 3 м.	0,089
	Высота волны 5 м.	0,121
	Высота волны 7 м.	0,144
	Высота волны 10 м.	0,169
Высота волны 10 м.	Скорость волны 5 м/с	0,108
	Скорость волны 10 м/с	0,135
	Скорость волны 15 м/с	0,169
	Скорость волны 20 м/с	0,201

На рисунке 2.10 изображен график влияния параметров волны на величину оказываемого ею давления.

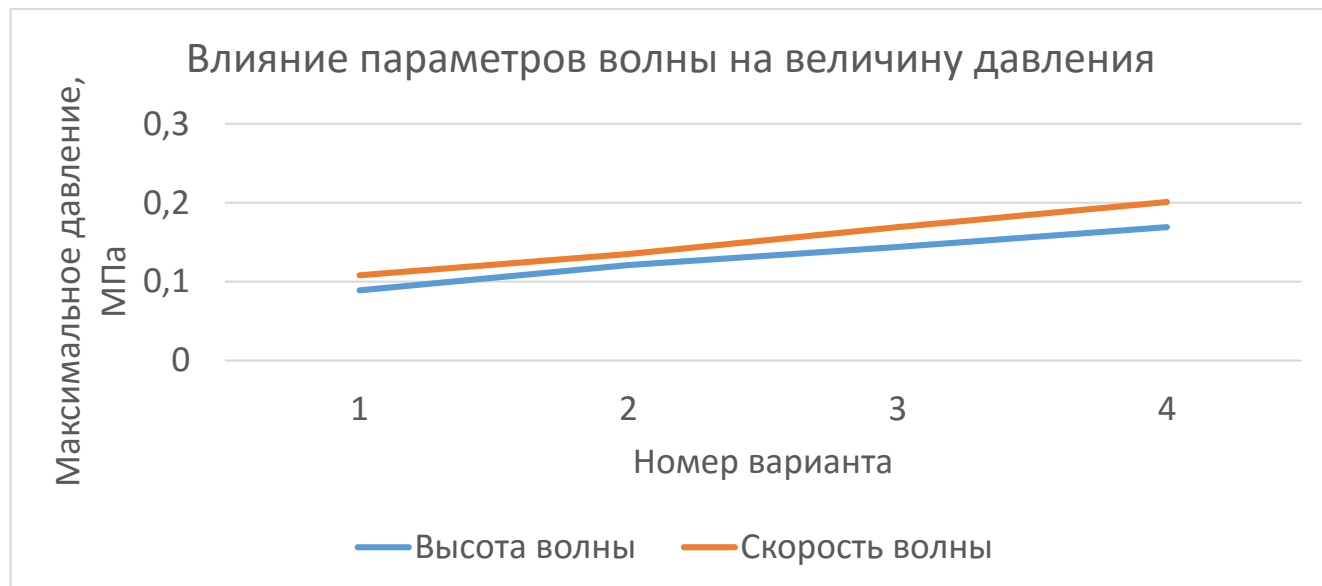


Рисунок 2.10 – Влияние параметров волны на величину давления

Из таблицы 2.2 и рисунка 2.10 можно сделать аналогичные выводы, как и при накате волн на сплошное здание: все исследуемые параметры волны влияют на величину максимального давления от волны на здание; максимальное влияние (в процентном соотношении) на величину давления, оказывает высота волны.



Как видно из рисунков 2.8 и 2.9, в случае, если высота волны превысит высоту открытого нижнего этажа, стены здания также будут подвержены воздействию волн цунами. Но даже в таком случае, данное решение будет более предпочтительным в сравнении со сплошным зданием, так как максимальная нагрузка от волн цунами распределена внизу здания и приходится на колонны.

Заключительным этапом расчетного исследования по моделированию наката волн цунами на различные сооружения в программном комплексе ANSYS 2021 стал фрагмент мостового сооружения. Расчетная область имеет размеры 42x31x10 м. Расчетная схема представлена на рисунке 2.11.

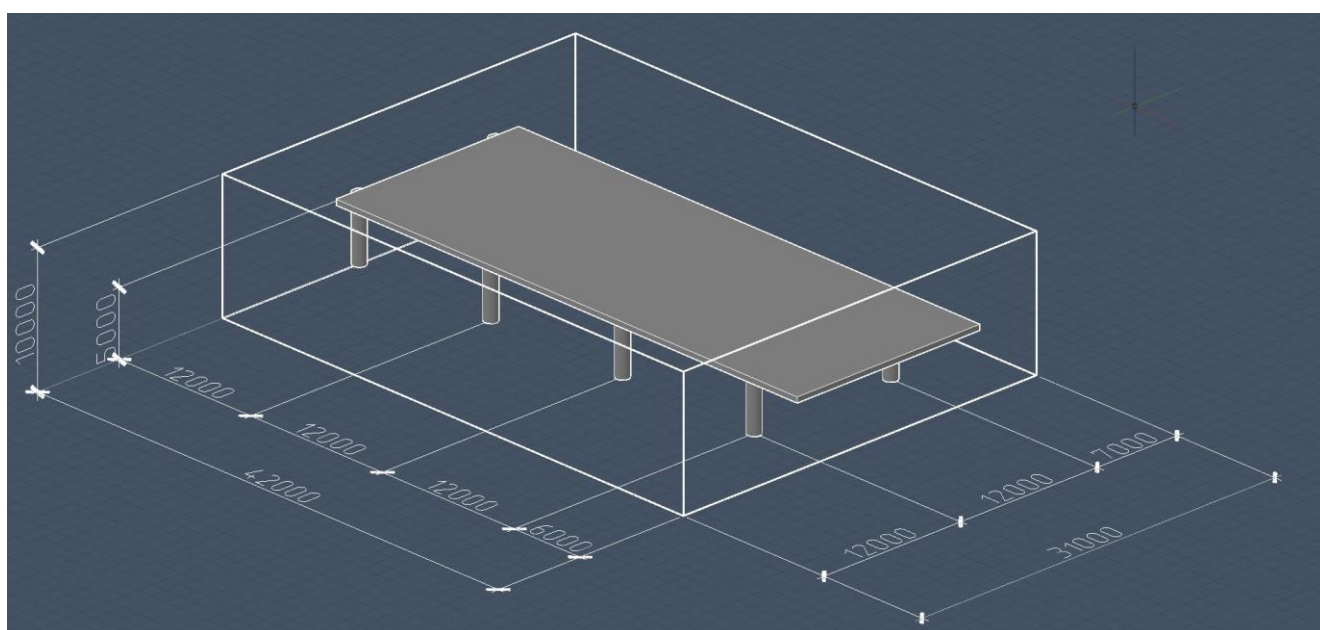


Рисунок 2.11 – Расчетная схема фрагмента моста

Далее на данной расчетной схеме были проведены такие же операции по разбиению расчетной модели на конечные элементы и заданию исходных данных, как и с предыдущими. На рисунке 2.12 представлена картина наката волны высотой 10 м. на фрагмент мостового сооружения.

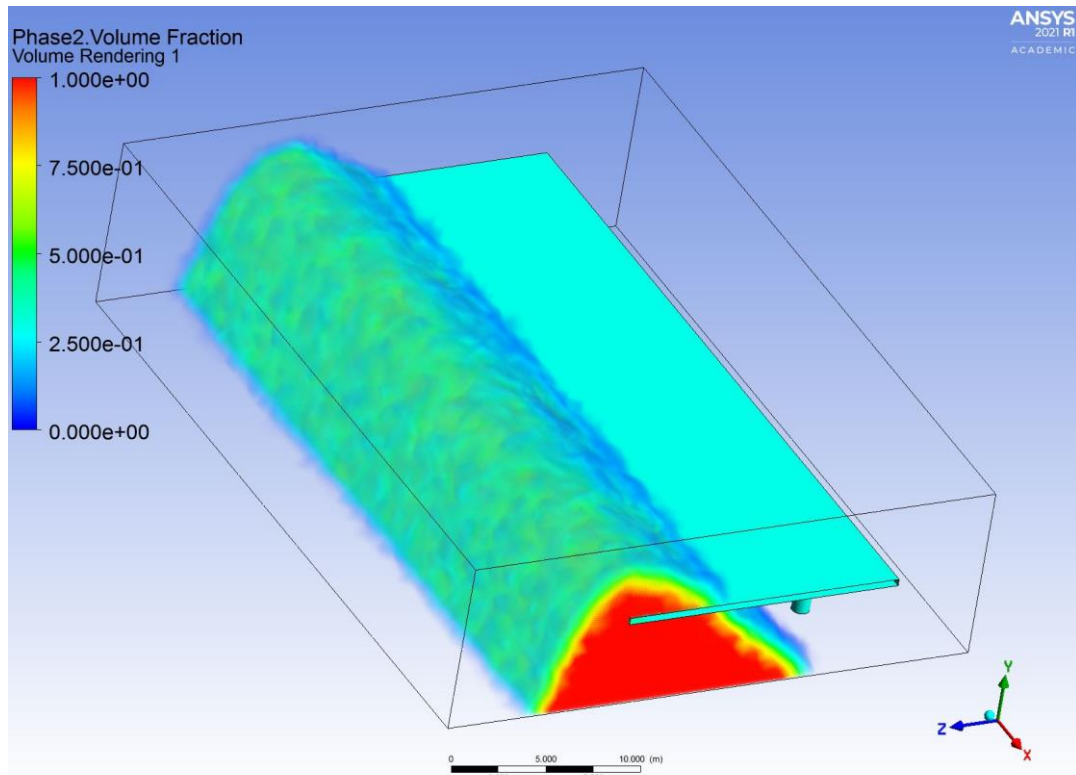


Рисунок 2.12 – Накат волны 10 метров на фрагмента моста

На рисунке 2.13 представлено распределение давления от волны на фрагмент мостового сооружения.

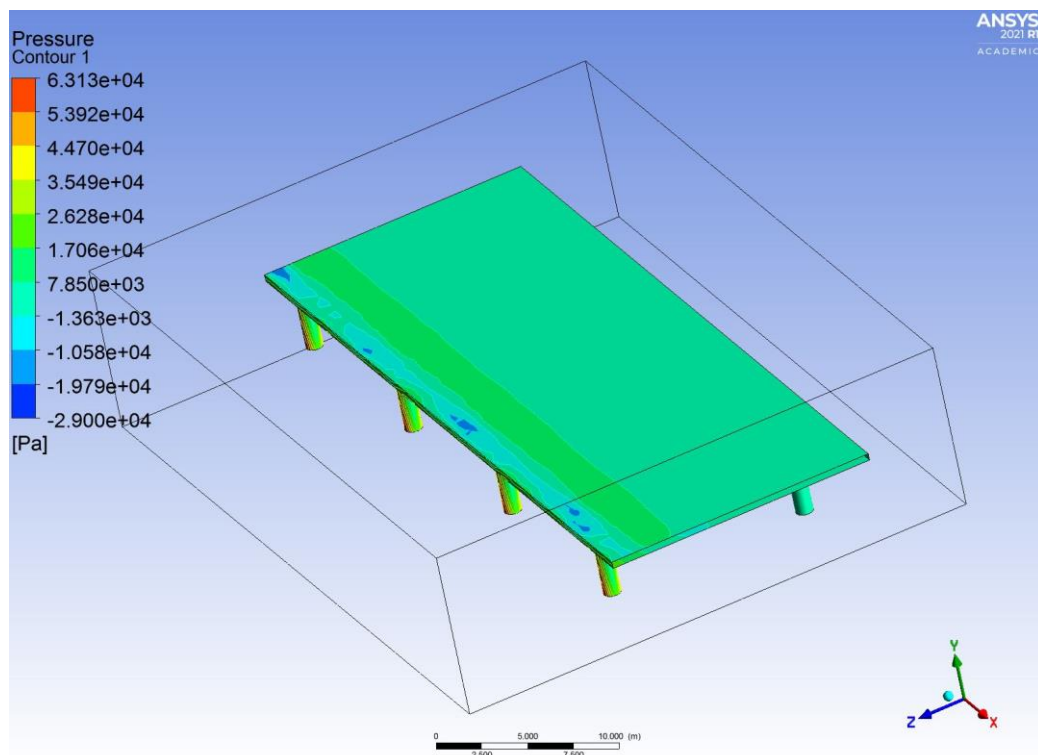


Рисунок 2.13 – Давление волны 10 метров на фрагмент моста



Результаты расчетов с различными характеристиками волны сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Давление от волны на здание с открытым нижним этажом

Фиксированный параметр	Изменяемый параметр	Максимальное давление, МПа
Скорость волны 15 м/с.	Высота волны 3 м.	0,008
	Высота волны 5 м.	0,02
	Высота волны 7 м.	0,042
	Высота волны 10 м.	0,063
Высота волны 10 м.	Скорость волны 5 м/с	0,031
	Скорость волны 10 м/с	0,049
	Скорость волны 15 м/с	0,063
	Скорость волны 20 м/с	0,085

На рисунке 2.14 изображен график влияния параметров волны на величину оказываемого ею давления.

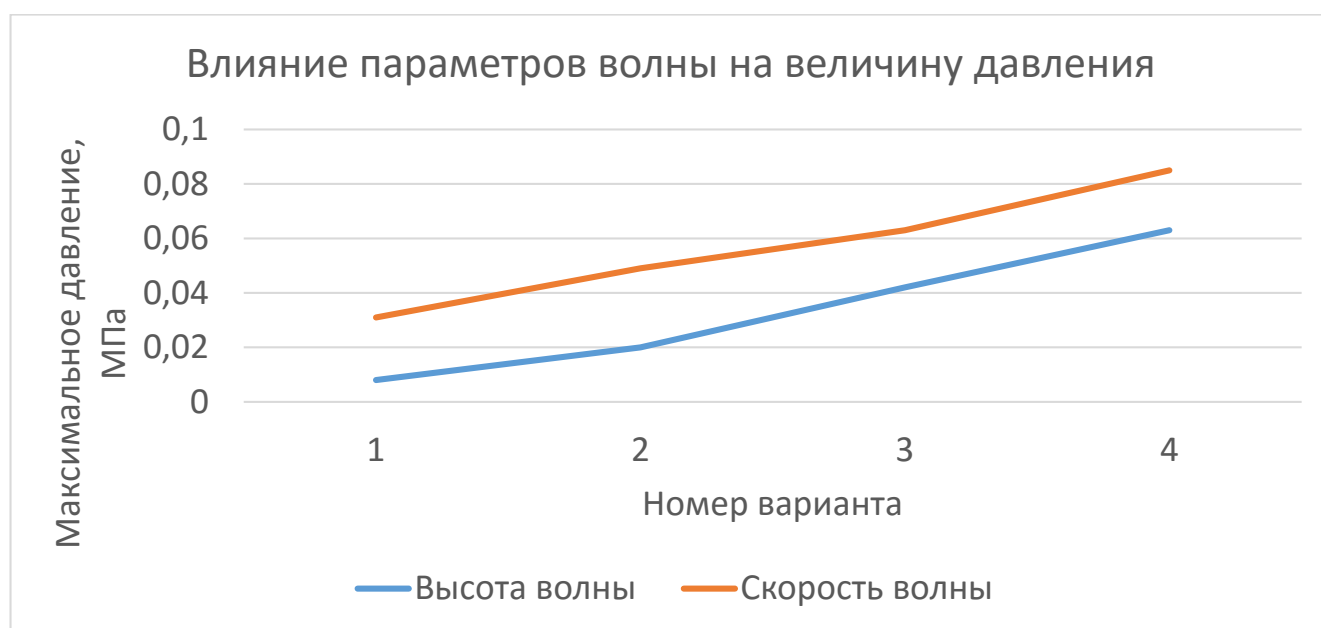


Рисунок 2.14 – Влияние параметров волны на величину давления

Из таблицы 2.3 и рисунка 2.14 можно сделать аналогичные выводы, как и при накате волн на сплошное здание и здание с открытым нижним этажом: все исследуемые параметры волны влияют на величину максимального давления от

волны на сооружение; максимальное влияние (в процентном соотношении) на величину давления, оказывает высота волны.

Как видно из рисунков 2.12 и 2.13, мостовое сооружение имеет наибольшую проницаемость из всех рассмотренных. Это приводит к уменьшению общей площади воздействия волн цунами и, как следствие, к большей цунамибезопасности.

Показанные исследования говорят о том, что характер взаимодействия волны с различными сооружениями сложный. При этом в данном исследовании, как было сказано выше, не учтены различные детали, такие как конструктивные схемы и материалы зданий и сооружений. Но исследования показывают, что если объект находится в сейсмическом и цунамиопасном районе, то возможные воздействия на данный объект могут быть катастрофическими. Это приводит к необходимости поиска вариантов, учитывающих оптимальное поведение конструкции не только в условиях землетрясения, но и в условиях наката волн цунами.

### **2.3 Обоснование предлагаемого конструктивного решения цунамизащиты зданий**

Представленные исследования показали, что наименьшее давление следует ожидать при высокой пропускной способности конструкции, которую можно добиться высоким открытым этажом. Был выполнен поиск вариантов улучшения цунамистойкости зданий. Предложено ряд небольших зданий различного назначения разместить на конструкции автомобильной эстакады. Такая конструкция может быть расположена вдоль побережья в том числе и при сложном рельефе этого побережья.

Стоит отметить, что эстакада в данном случае будет выполнять не только свою основную функцию – размещение автомобильной дороги над уровнем земли. Дополнительно данная автомобильная эстакада увеличивает высоту свободного (открытого) пространства под зданием, повышая их цунамистойкость. Кроме того, как отмечалось выше, нельзя эвакуироваться из города по обычным

автомобильным дорогам, проходящим вдоль побережья, но в случае с эстакадой эта рекомендация не действительна, так как движущиеся по эстакаде автомобили будут находиться над возможными волнами цунами и, соответственно, в безопасности.

Еще одним положительным доводом в пользу такого решения являются приведенная ранее рекомендация по эвакуации пешего населения – максимально быстро подняться на высоту 10-20 метров ([11], [24], [26], [62]). В случае с большим количеством населенных пунктов, находящихся в цунамиопасных районах, данный вопрос имеет большое значение, так как возвышенности находятся на достаточно большом расстоянии от побережья. При наличии такой проблемы рекомендуется ([90]) устраивать места для вертикальной эвакуации населения («tsunami vertical evacuation sites»). Роль такого сооружения как раз может выполнять автомобильная эстакада, так как население, находящееся в момент эвакуации на побережье, может быстро подняться на эстакаду, чтобы быть в безопасности.

Что касается самой идеи расположить здания на пролетном строении – она не нова. Так как города в Средние века были небольшими и обычно строились на реках, мосты, изначально выполняющие только транспортную функцию, стали использоваться и как дополнительное место под строительство. Обычно на мостах из-за большой проходимости людей, располагались лавки торговцев и ремесленников. Одними из самых знаменитых мостов со зданиями, сохранившихся до наших дней являются: Мост Понте Веккьо – старейший мост во Флоренции (Италия) (рисунок 2.15 (а)), Мост Кремербрюке в городе Эрфурт (Германия) (рисунок 2.15 (б)), Крытый мост в городе Ловеч (Болгария) (рисунок 2.15 (в)). [82]



Рисунок 2.15 – Примеры мостов со зданиями: а – Мост Понте Веккьо; б – Мост Кремербрюке; в – Крытый мост

Важно отметить, что в настоящее время также предлагается большое количество интересных проектов в которых совмещаются функции моста и здания. Одними из самых ярких являются проекты жилых мостов от бюро BRT Architekten. Так, проект Living Bridge в Гамбурге (Германия) (рисунок 2.16 (а)) представляет собой сооружение длиной 700 метров, нижний уровень которого отведен под автомагистраль, а второй – под 16 жилых корпусов. Проект Living Bridge в Дуйсбурге (Германия) (рисунок 2.16 (б)) представляет собой 230 метровое сооружение, по нижнему уровню которого смогут перемещаться как пешеходы с велосипедистами, так и автомобилисты, на вышележащих уровнях запланированы жилые апартаменты, офисы и общедоступные рекреационные зоны. Еще один современный и интересный проект представило архитектурное и инженерное бюро ARCVS – мост-гостиница Elbow Shadow Bridge в Сербии (рисунок 2.16 (в)). Нижний ярус данного сооружения также предназначен для сквозного проезда для велотранспорта и пешеходов. [44], [82]

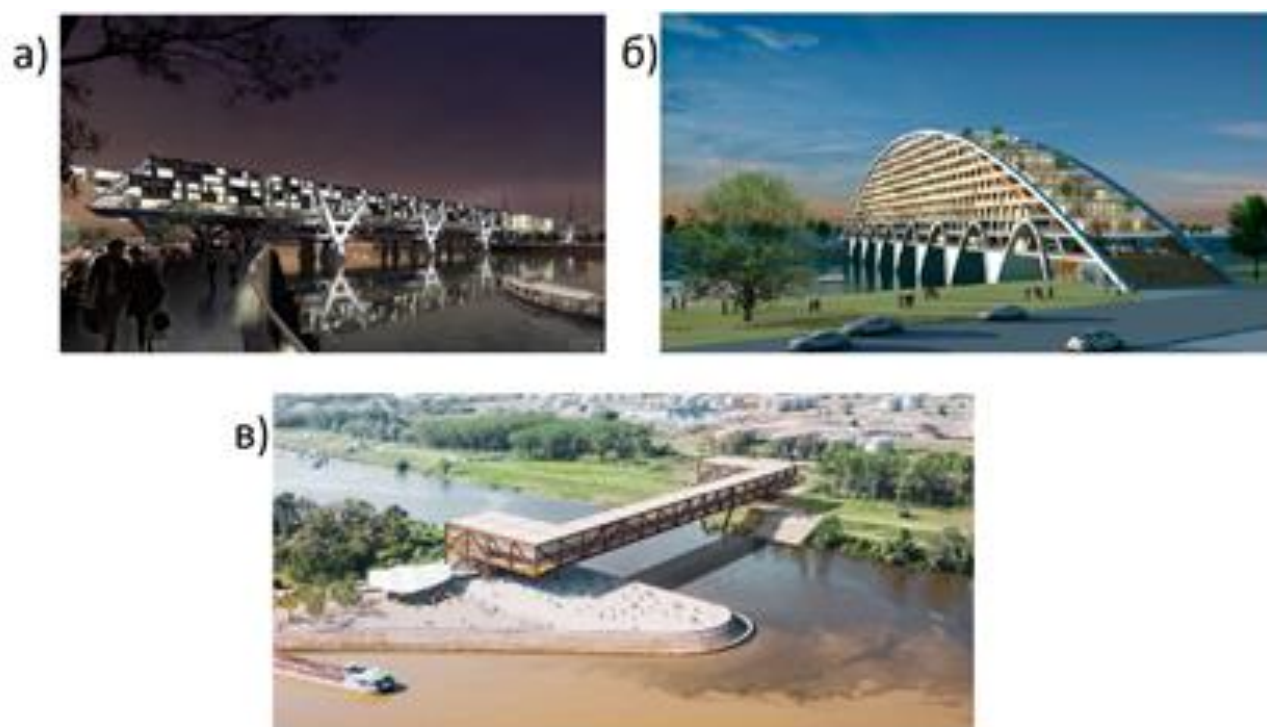


Рисунок 2.16 – Примеры современных проектов мостов со зданиями: а – Living Bridge в Гамбурге; б – Living Bridge в Дуйсбурге; в – Elbow Shadow Bridge

В заключении обзора на существующие примеры сооружений, объединяющих в себе функции путепровода и здания стоит отметить два здания, сквозь которые проходят транспортные сооружения: метро, проходящее сквозь 19-этажный жилой дом в китайском городе Чунцин (рисунок 2.17 (а)) и скоростное надземное автомобильное шоссе, проходящее сквозь 16-этажное офисное здание (Gate Tower Building) в городе Осака (Япония) (рисунок 2.17 (б))

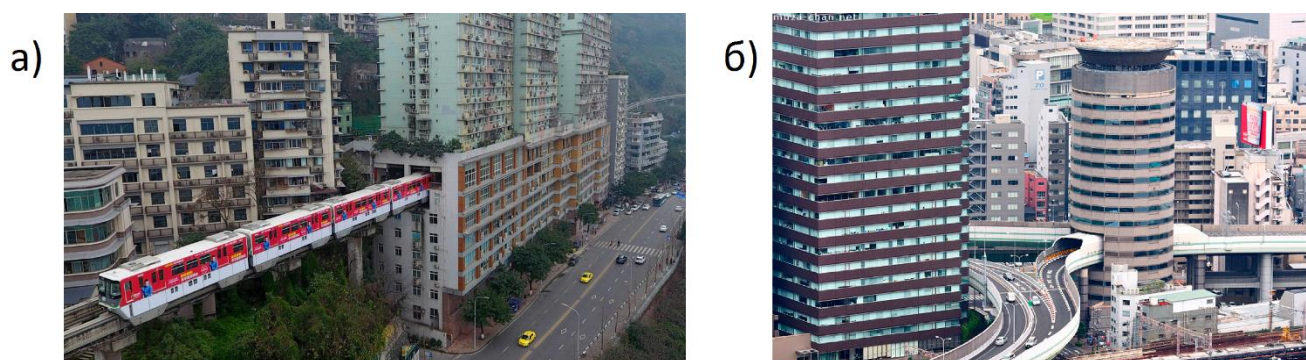


Рисунок 2.17 – Здания, сквозь которые проходят транспортные сооружения: а – метро, проходящее сквозь жилой дом; б - скоростное шоссе, проходящее сквозь офисное здание

Коллектив из МГСУ во главе с Забалуевой Т.Р. и Захаровым А.В. запатентовал целый ряд проектов зданий-мостов [52-56], которые объединены одной идеей – совместить проезжую часть и помещения внутри одной пролетной несущей конструкции коробчатого сечения (рисунок 2.18).



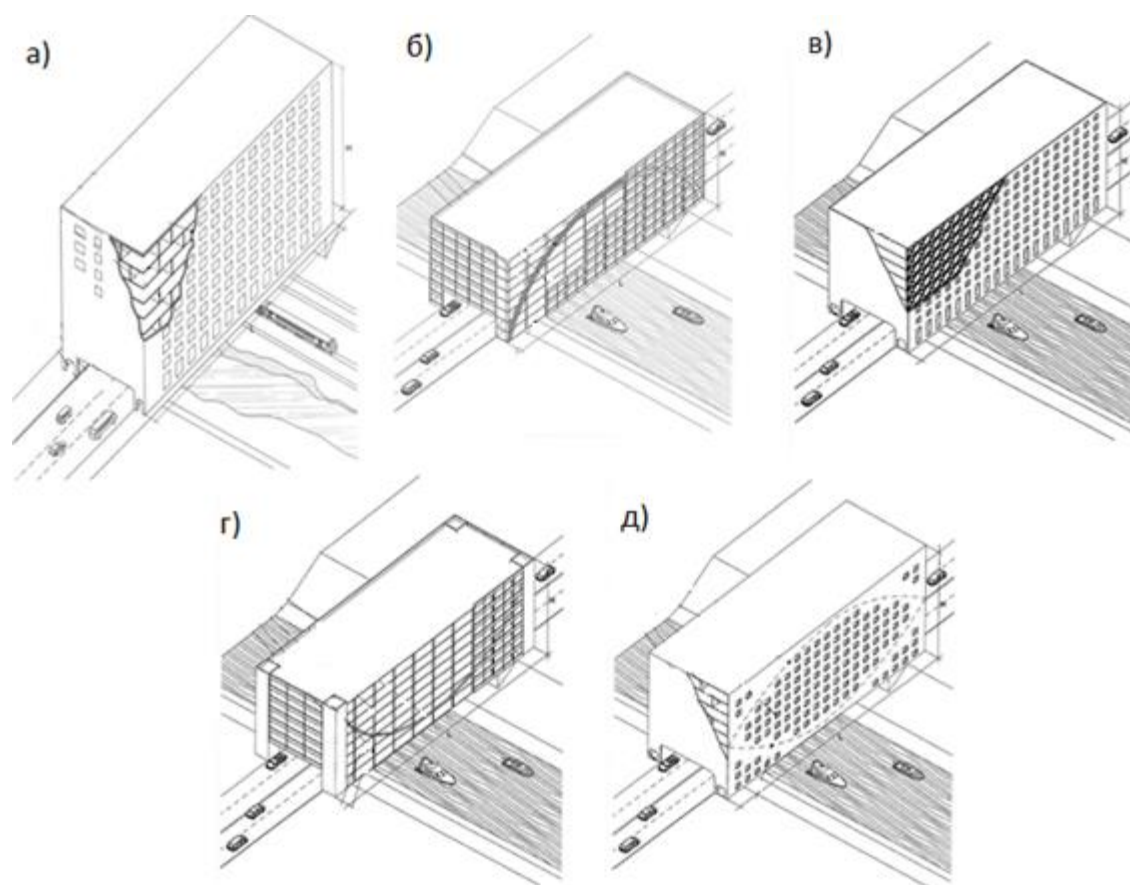


Рисунок 2.18 – Патенты здания-моста коллектива из МГСУ

Несмотря на то, что идея у патентов на рисунке 2.18 одна, конструкция у них разная. Отличаются они в первую очередь основными несущими конструкциями в качестве которых используются: коробчатая конструкция (рисунок 2.18 (а)), арочная конструкция (рисунок 2.18 (б)), многорешетчатые фермы (рисунок 2.18 (в)), пилон с вантами (рисунок 2.18 (г)) и монолитный железобетон (рисунок 2.18 (д)). Главная задача этих изобретений снизить площадь застройки и снизить расход строительных материалов за счет создания единой конструкции. Но данная конструкция не обеспечивает безопасность населения в цунамиопасном районе при возникновении сильных землетрясений из-за особенностей объемно-планировочного решения.

Конструкция, предложенная С. И. Рубинштейном [59] и изображенная на рисунке 2.19, представляет собой поселение, расположенное на полых железобетонных сваях, внутри которых размещены элементы транспортной инфраструктуры вертикального перемещения и коммуникационные системы. Эти

сваи одной частью встроены в земную поверхность или в несущий слой дна водной поверхности и другой частью возвышаются над уровнем земной или водной поверхности, в результате чего образовывается пространство между такими поверхностями и нижним уровнем зданий. Технический результат данного решения заключается в увеличении плотности застройки при сохранении природного ландшафта под этой застройкой. Свободное пространство под зданиями способствует благоприятно влияет на цунамибезопасность всей конструкции, но использование данной конструкции в районах с высокой сейсмоактивностью не предусмотрено.

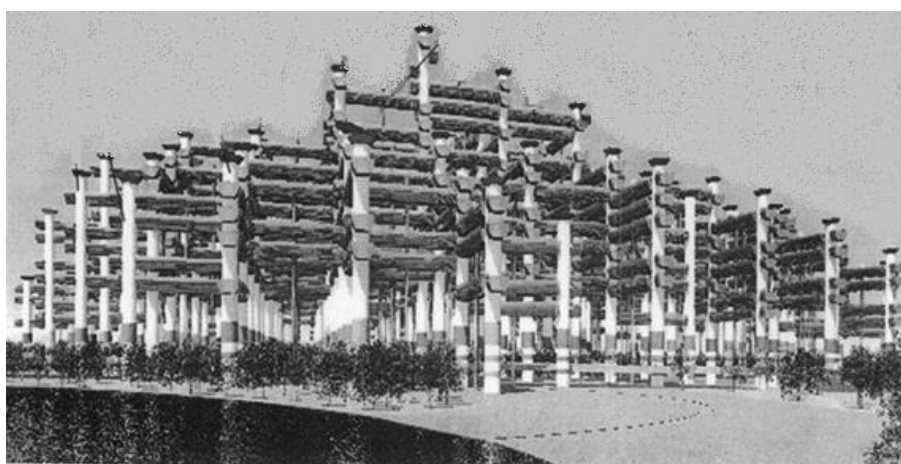


Рисунок 2.19 – Конструкция поселения, предложенная С. И. Рубинштейном

Таким образом, объединив рекомендации по проектированию зданий в цунамиопасных и сейсмоопасных регионах, а также все вышеизложенные идеи, было предложено расположить ряд небольших зданий, предназначенных для временного пребывания людей, расположить на конструкции автомобильной эстакады. Принципиальная схема предлагаемой конструкции поселения изображена на рисунке 2.20.

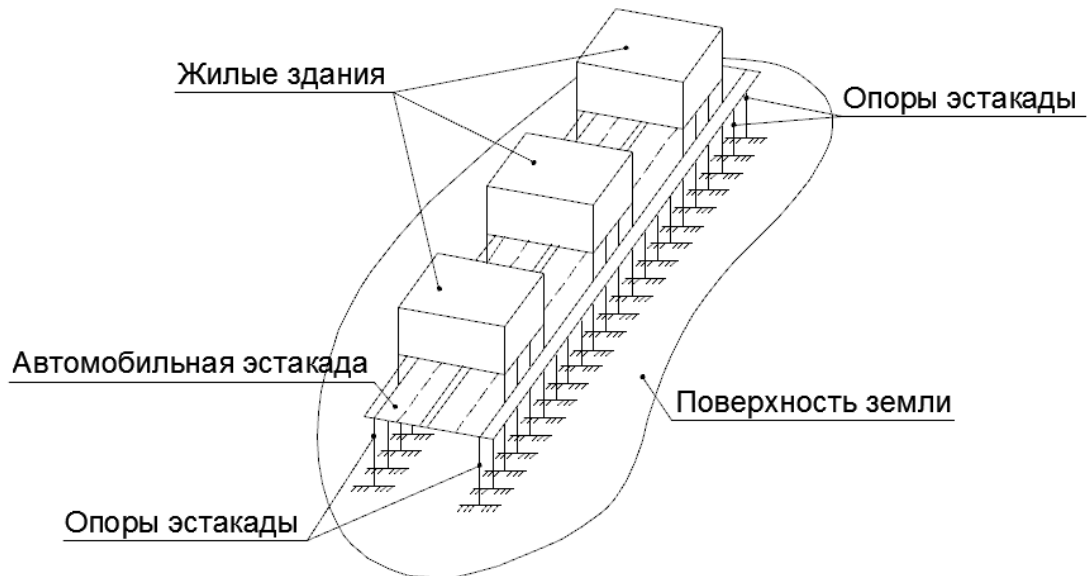


Рисунок 2.20 – Принципиальная схема запатентованной конструкции поселения

Как видно из рисунка 2.20, под зданиями образуется достаточно высокое свободное пространство, позволяющее волнам цунами проходить под ними не оказывая на них большого давления.

Материалом может служить железобетон или металл. Но предпочтительным является металл, потому что, как было сказано выше, в районах с высокой цунамиопасностью часто наблюдается и высокая сейсмическая активность, а при высокой сейсмоактивности положительными факторами являются снижение веса конструкции и способность ее до разрушения претерпевать значительные пластические деформации.

В качестве жилого здания для предварительного обоснования рассматривалось каркасное здание со стойками из квадратных труб 400x10 [15], монолитными железобетонными перекрытиями толщиной 200 мм. [5], [27], [84], выполненные по двутавровым металлическим балкам 30Б2 [30]. Жилое здание установлено на конструкцию автомобильной эстакады и имеет с ней общие опоры – металлические трубы 630x20 [18]. Дорожное полотно выполнено в качестве железобетонной плиты толщиной 400 мм. и опирается на двутавровые балки 100Б2 [14]. Поперечный разрез предлагаемой конструкции с основными несущими элементами представлен на рисунке 2.21.



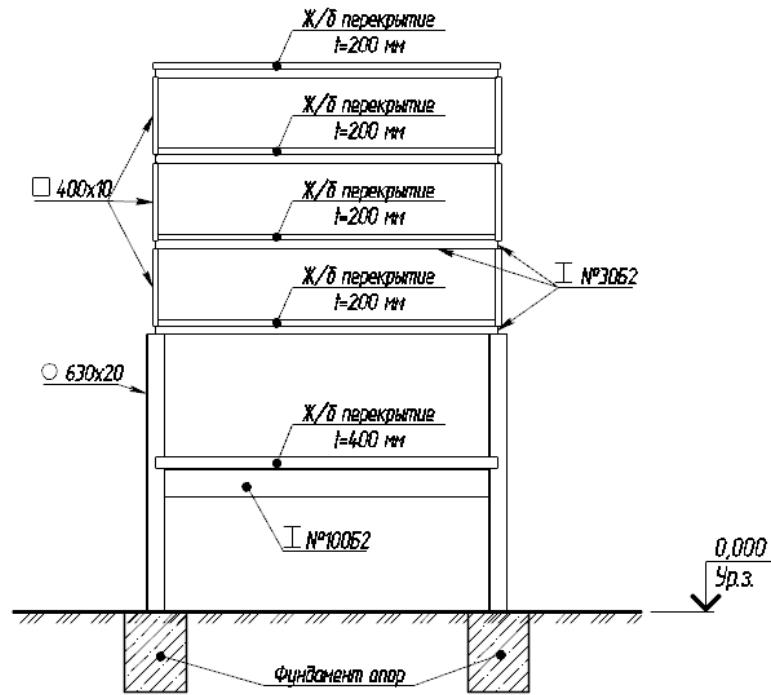


Рисунок 2.21 – Поперечный разрез предлагаемой конструкции с основными несущими элементами

Таким образом, благодаря гибкой и облегченной конструктивной системе, при воздействии сильных землетрясений, в элементах конструкции не возникает усилий приводящих к обрушению конструкций. Кроме того, благодаря свободному пространству под зданиями, допускается свободный проход волн цунами без повреждений всей конструкции поселения [58]. Также стоит отметить, что данная конструкция является экономичной за счет объединения зданий и эстакады в одну конструкцию и простой в реализации, так как выполнена из стандартных профилей. На данную конструкцию получен патент на изобретение (рисунок 2.22).



Рисунок 2.22 – Патент на изобретение конструкции поселения







также одинаковые загрузки (по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [70]).

Для определения усилий в конструкции, перемещений, периодов и частоты колебания в результате действия сейсмических сил использовалась спектральная методика [35]. Расчетная сейсмическая нагрузка, приложенная к узловой точке расчетно-динамической модели и соответствующая  $i$ -й форме собственных колебаний зданий или сооружений, определяется по формуле (2.6):

$$S_{0ik}^j = m_k^j A \beta_j K_\psi \eta_{ik}^j, \quad (2.6)$$

где  $m_k^j$  - масса здания или момент инерции соответствующей массы здания, отнесенные к точке  $k$  по обобщенной координате  $j$ ;

$A$  - значение ускорения в уровне основания;

$\beta_j$  - коэффициент динамичности, соответствующий  $j$ -й форме собственных колебаний зданий или сооружений;

$K_\psi$  - коэффициент, учитывающий демпфирование в системе;

$\eta_{ik}^j$  - коэффициент, зависящий от формы деформации здания или сооружения при его собственных колебаниях по  $i$ -й форме, от узловой точки приложения рассчитываемой нагрузки и направления сейсмического воздействия.

На данном этапе был выполнен расчет только на проектное землетрясение для этого были заданы основные его характеристики: тип грунта – I, ускорение грунта –  $4\text{ м/с}^2$  (для 9-ти балльного землетрясения) и направление воздействия (перпендикулярно продольной оси сооружения, так как в этом направлении у сооружения минимальная жесткость и, соответственно, это наиболее опасное направление горизонтального воздействия).

Результаты расчета первого варианта конструкции на основное и особое (с учетом сейсмического воздействия) сочетание нагрузок представлено на рисунке 2.27.

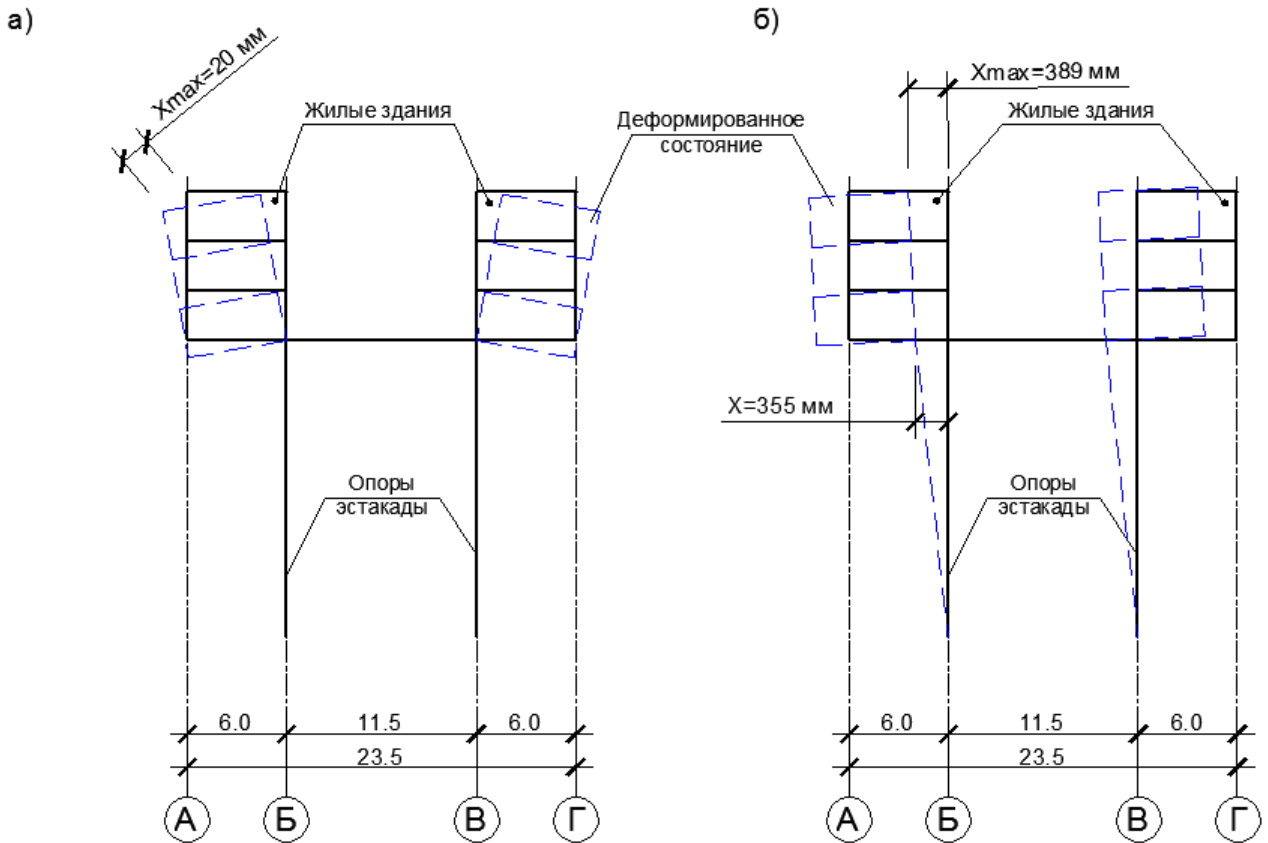


Рисунок 2.27 – Фрагмент деформированного состояния от основного (а) и особого (б) сочетания нагрузок первого варианта конструкции

Оценка деформированного состояния первого варианта конструкции показывает, что перемещения здания от основного сочетания нагрузок равны 20 мм. В то время как от сейсмической нагрузки они имеют значения равные 389 мм и достигаются в верхней части здания. Перемещения эстакады в уровне дорожного полотна составили 355 мм. Период колебания составляет 3,2 секунды.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что в данном варианте конструкции возникают трудности с обеспечением несущей способности и деформативности опорных стоек эстакады и несущих конструкций зданий. Для улучшения поведения конструкции при статическом нагружении был предложен второй вариант конструкции. Результаты расчета второго варианта конструкции на основное и особое (с учетом сейсмического воздействия) сочетание нагрузок представлено на рисунке 2.28.

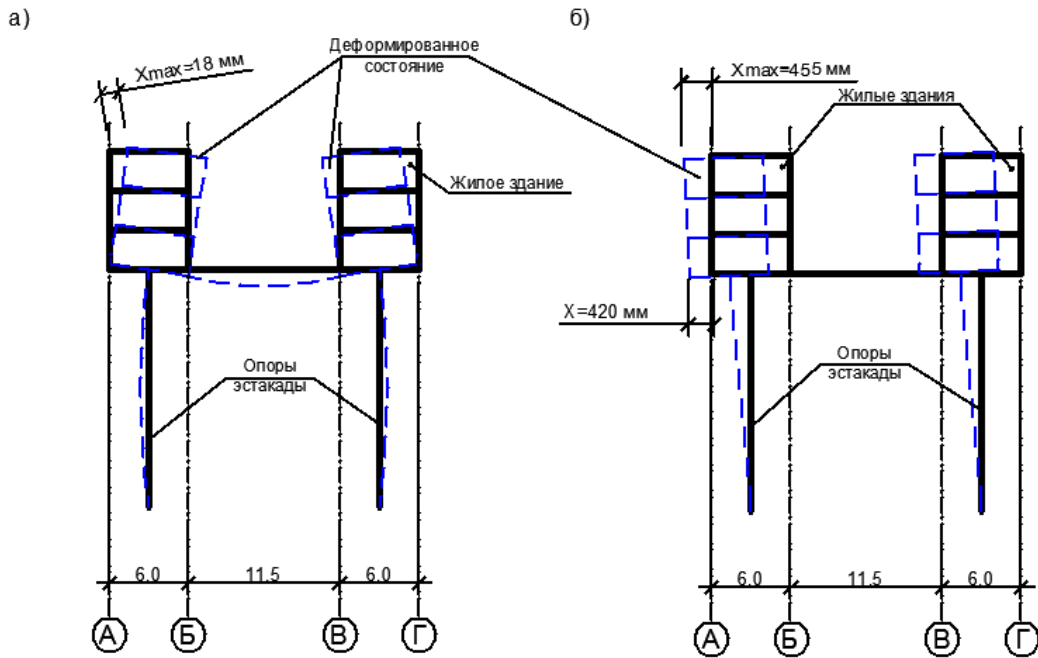


Рисунок 2.28 – Фрагмент деформированного состояния от основного (а) и особого (б) сочетания нагрузок второго варианта конструкции

Оценка деформированного состояния второго варианта показывает, что перемещения здания от основного сочетания нагрузок равны 18 мм. В то время как от сейсмической нагрузки они имеют значения равные 455 мм и достигаются в верхней части здания. Перемещения эстакады в уровне дорожного полотна составили 420 мм. Период колебания составляет 3,6 секунды.

Анализ полученных результатов показал, что второй вариант при статическом нагружении работает лучше первого, однако при динамической нагрузке от землетрясения в данной схеме возникают большие перемещения и усилия.

Результаты расчета третьего варианта конструкции на основное и особое (с учетом сейсмического воздействия) сочетание нагрузок представлено на рисунке 2.29.



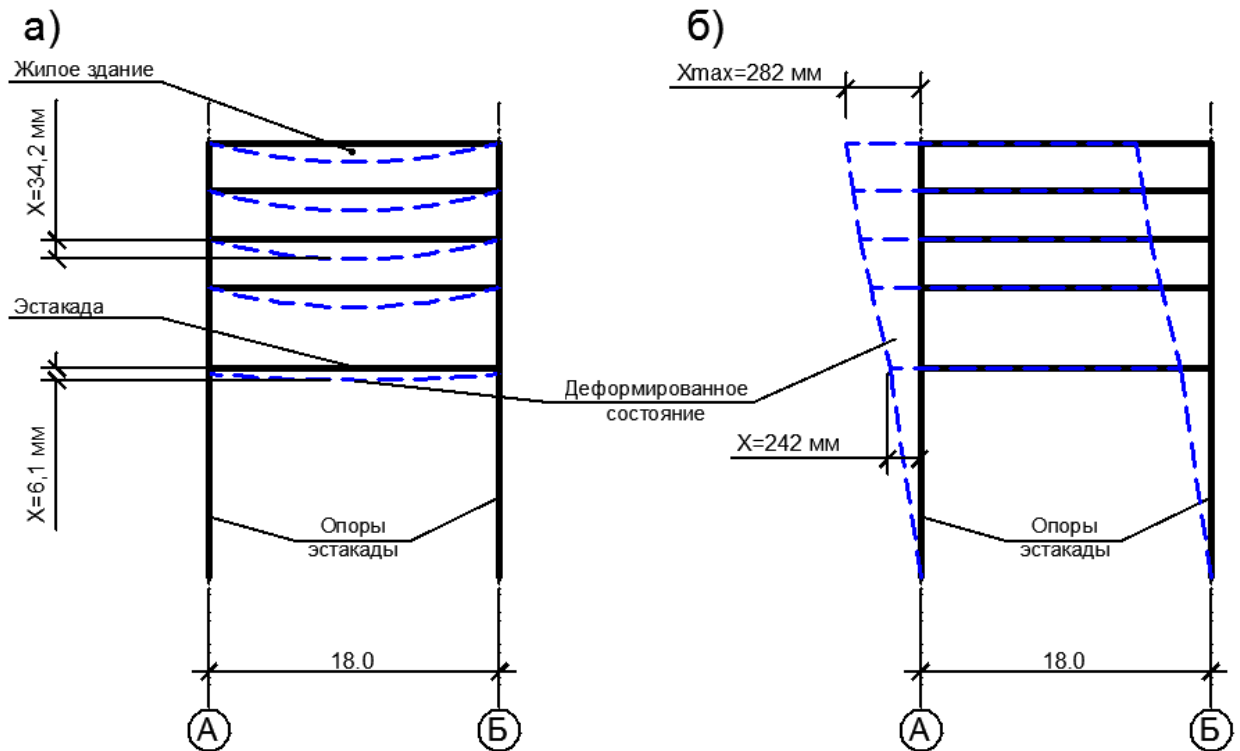


Рисунок 2.29 – Фрагмент деформированного состояния от основного (а) и особого (б) сочетания нагрузок третьего варианта конструкции

Анализ модели показал, что данная конструкция имеет перемещения от основного сочетания нагрузок равные 34,2 мм. Перемещения от сейсмической нагрузки составляют 282 мм в верхней части здания и 242 мм в уровне дорожного полотна, а период колебания 2,5 секунды.

Результаты расчета четвертого варианта конструкции на основное и особое (с учетом сейсмического воздействия) сочетание нагрузок представлено на рисунке 2.30.

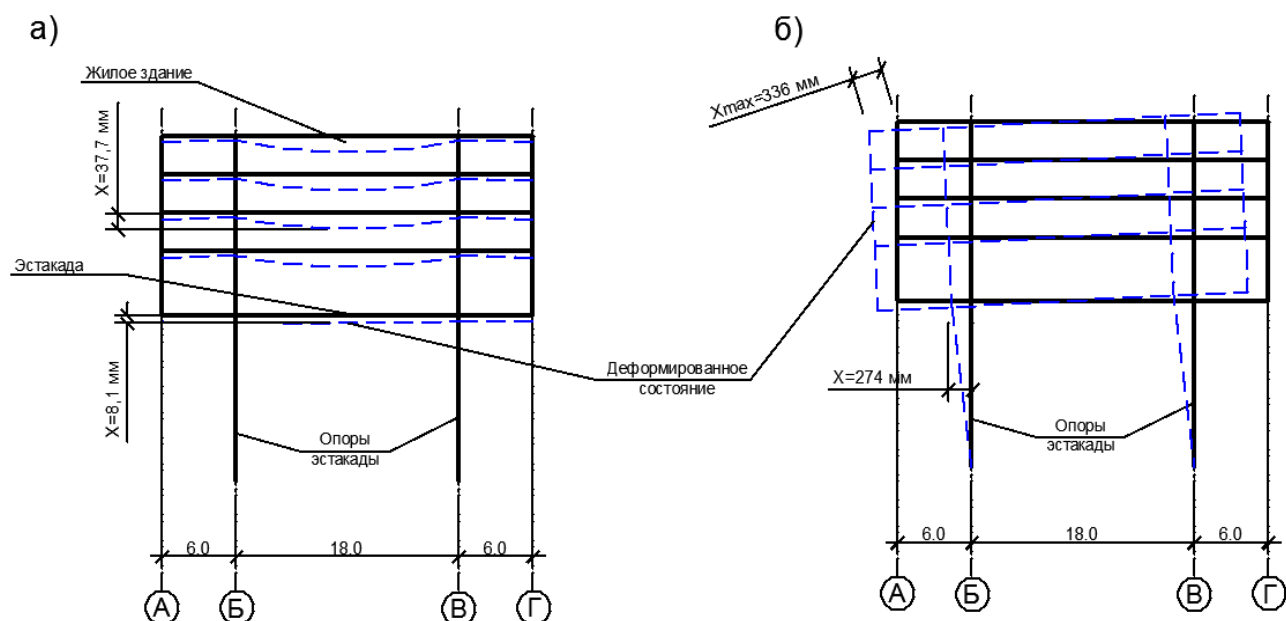


Рисунок 2.30 – Фрагмент деформированного состояния от основного (а) и особого (б) сочетания нагрузок четвертого варианта конструкции

Оценка деформированного состояния от собственного веса и от сейсмической нагрузки показывает, что перемещения здания от основного сочетания нагрузок равны 37,7 мм. В то время как от сейсмической нагрузки они имеют значения равные 336 мм и достигаются в верхней части здания. Перемещения эстакады в уровне дорожного полотна составили 274 мм. Период колебания составляет 2,8 секунды.

Данные по перемещениям от основного и особого сочетания нагрузок, периодам колебаний для всех четырех вариантов зданий приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Характеристики рассмотренных схем

№ схемы	Перемещения верхней точки здания от основного сочетания нагрузок, мм	Перемещения верхней точки здания от особого сочетания нагрузок, мм	Перемещения верха здания относительно дорожного полотна, мм	Период колебаний, с
1	20	389	34,3	3,2
2	18	455	34,8	3,6
3	34,2	282	39,8	2,5
4	37,7	336	61,9	2,8

Таким образом, в ходе исследования установлено, что третий вариант здания, представленный на рисунке 2.25 наиболее предпочтителен с точки зрения устойчивости и сейсмостойкости. Но высоту стоек необходимо было уменьшить до 6 метров, так как в принятых изначально стойках высотой 18 метров возникали большие усилия.

Схема разреза (а), расчетная модель (б) и деформированное состояние от особого сочетания нагрузок (в) конечного варианта представлены на рисунке 2.31.

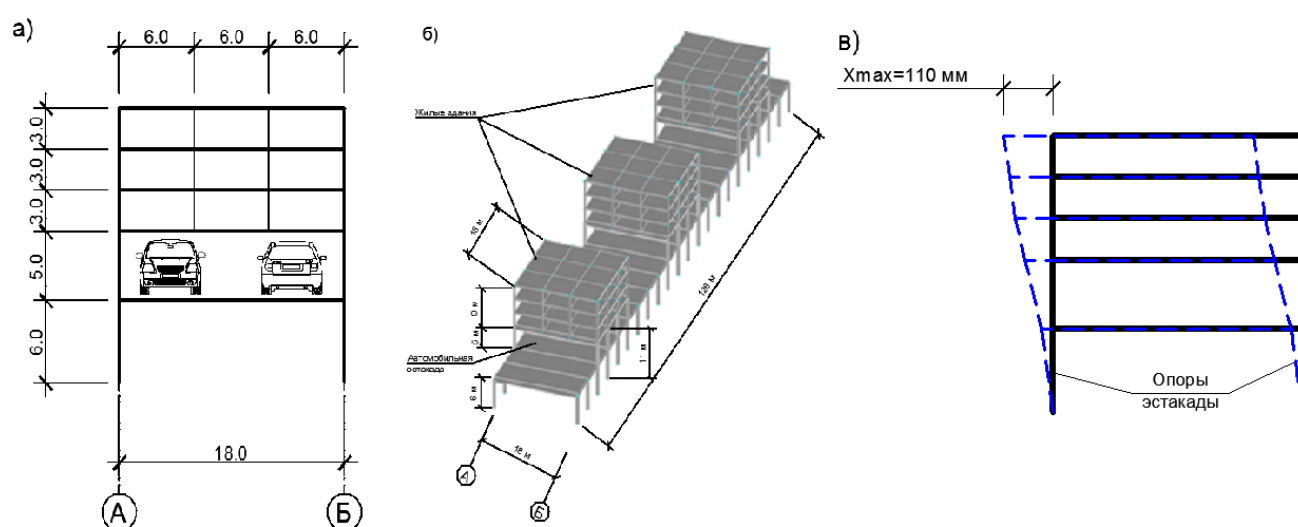


Рисунок 2.31 – Схема разреза (а), расчетная модель (б) и деформированное состояние (в) конечного варианта

На следующем этапе исследования был выполнен расчет принятого варианта на нагрузку от волны цунами.

Определение воздействия цунами на здание производилось так же в программном комплексе. Величина нагрузки от волн цунами на данном этапе определялась по РД 31.33.07-86 «Руководство по расчету воздействия волн цунами на портовые сооружения, акватории и территории. Рекомендации для проектирования» [63]. Согласно данному документу, расчет нагрузки от волны цунами определяется с учетом максимального за 100 лет подъема уровня воды при накате цунами в рассматриваемом населенном пункте. Но, так как нет привязки к

населенному пункту, на данном этапе высота волны принята как расстояние от уровня земли до нижнего перекрытия жилых зданий, что равно 11 метрам. [85]

Эпюры давления волнового потока на вертикальное береговое сооружение, расположенные выше уреза воды, представлены на рисунке 2.32.

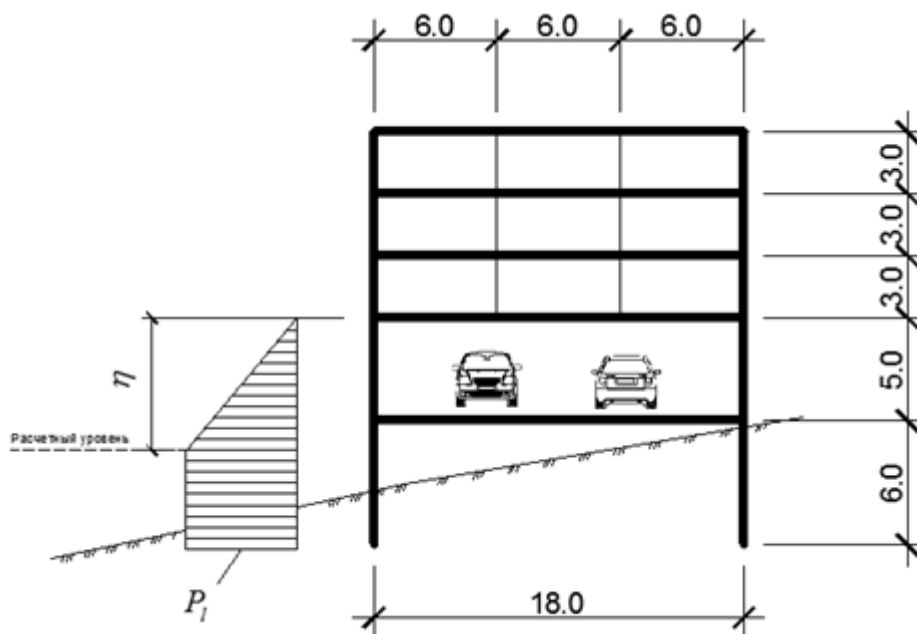


Рисунок 2.32 – Эпюра давления волнового потока на вертикальное берегозащитные сооружение

Нагрузка  $P_i$  от волн цунами определяется по формуле (2.7):

$$P_i = 1.5 \cdot \rho \cdot g \cdot \eta, \quad (2.7)$$

где  $\rho$  – плотность воды, равная  $10^3$  кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$\eta$  – возвышение поверхности воды на спокойном уровне, в случае, если сооружение расположено выше уреза воды, определяется по формуле (2.8).

$$\eta = \left(1 - \frac{i}{h_{\text{run},100}} \cdot x\right) \cdot h_x, \quad (2.8)$$

где  $i$  – уклон берегового откоса, принимаем  $i=0,01$ ;

$h_{\text{run},100}$  – средняя величина максимального подъема уровня воды при накате цунами;

$x$  – расстояние от уреза воды до здания,  $x=250$ м;

$h_x$  – максимальная волна воды на урезе,  $h_x=11$ м.

Выполненное исследование (при условии всех принятых допущений) показало, что данное здание способно сопротивляться воздействию как землетрясению в 9 баллов, так и волне цунами высотой до 11 метров. [1], [4]

Итоговый вариант предлагаемого решения представлен на рисунке 2.33.



Рисунок 2.33 – Итоговый вариант предлагаемой конструкции

## 2.5 Выводы по главе

1. Выполненные исследования показали, что в случае, если конструкция находится в сейсмической и цунамиопасной зоне, она может быть подвержена дополнительным нагрузкам от цунами, воздействие которых может быть существенным.

2. Подтверждено, что параметры волны (высота и скорость) могут существенно повлиять величину гидродинамического давления на строительные конструкции и привести к обрушению. С помощью моделирования наката волн показано, что наибольшее влияние на величину давления оказывает высота волны: увеличение этого параметра приводит к увеличению давления от волны примерно во столько же раз (прямая зависимость). Этот параметр влияет на объем воды в волне и, как следствие, на ее массу.

3. Показано, что организация свободного пространства под зданиями, может позволить уменьшить воздействие от волны цунами, что подтверждает эффективность этого решения.

4. Предложен вариант расположения зданий различного назначения на конструкции эстакады в районах одновременного воздействия землетрясений и волн цунами.

5. Было рассмотрено четыре варианта расположения жилых зданий на конструкции автомобильной эстакады. Для каждого варианта был выполнен расчет на действие основного и особого (с учетом 9-балльного сейсмического воздействия) сочетания нагрузок с целью определить какой из вариантов является наиболее предпочтительным с точки зрения статической работы и сейсмостойкости.

6. Установлено, что наиболее эффективным вариантом защиты от цунами, с точки зрения возникающих усилий и деформаций в строительных конструкциях зданий и опор эстакады, является третий вариант (когда здания располагаются над автомобильной эстакадой).

7. Выполненные предварительные расчетные исследования на действия сейсмической 9-балльной нагрузки и нагрузки от волны цунами высотой 11 метров показали возможность использования данного решения цунамизащиты.

Для обоснования предлагаемого конструктивного решения, на следующих этапах было выполнено подробное расчетно-теоретическое исследование в два этапа. На первом этапе было выполнено обоснование предлагаемого решения с точки зрения сейсмостойкости, на втором - исследована цунамистойкость предлагаемой конструкции.

### 3 РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

#### 3.1 Общие положения

В предыдущей главе представлено решение по цунамизащите зданий. Данное решение соответствует требованиям, предъявляемым к цунамистойким зданиям и имеет ряд преимуществ: использование автомобильной эстакады в качестве несущей конструкции для зданий позволяет значительно увеличить свободное пространство под зданиями, в следствии чего волны большей высоты способны проходить под ними не оказывая большого давления; автомобильная эстакада – более безопасный путь эвакуации для жителей города по сравнению с обычной дорогой; автомобильная эстакада может служить средством вертикальной эвакуации пешего населения.

Конструкция автомобильной эстакады, проектируемых для строительства в сейсмических районах и районах возможного возникновения цунами должны удовлетворять расчетам:

- на основное и дополнительное сочетание нагрузок в соответствии с требованием СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия»;

- на особые сочетания при учете сейсмических нагрузок и нагрузок от цунами. Расчет конструкции автомобильной эстакады на особое сочетание нагрузок производится на совместное действие постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок, сейсмических нагрузок и нагрузок от цунами. Классификация нагрузок и их значения, а также значения коэффициентов перегрузки и сочетания принимаются в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» и СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» соответственно.

В предыдущей главе было дано предварительное расчетное обоснование предлагаемого решения с выбором наиболее предпочтительного с точки зрения

статической работы и сейсмостойкости варианта расположения жилых зданий на конструкции автомобильной эстакады. В ходе данного предварительного расчетного обоснования установлено, что конструкция со зданиями над автомобильной эстакадой способна сопротивляться сильному сейсмическому воздействию и ударам волн цунами.

В данном разделе разработана расчетная методика выбора основных геометрических, жесткостных и конструктивных параметров предлагаемого средства цунамизащиты и проверена его работоспособность с учетом сейсмического воздействия.

### **3.2 Разработка методологии проведения расчетного исследования**

При расчете конструкции автомобильной эстакады не учитываются динамические нагрузки от движения транспорта, климатические нагрузки и ветровые нагрузки, а также нагрузки, возникающие во время возведения и монтажа конструкции эстакады.

При проектировании конструкций автомобильной эстакады следует учитывать, что сейсмические нагрузки могут иметь любое направление в пространстве. Сейсмическая нагрузка может приниматься действующей горизонтально в направлении продольной и поперечной оси эстакады и учитывается отдельно. В представленных ниже расчетах было принято, что горизонтальная нагрузка действует в наиболее опасном направлении – в направлении поперечной оси эстакады. Расчетные величины сейсмических нагрузок, действующие на конструкции автомобильной эстакады, определялись по спектральной методике в соответствии с СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». При выполнении расчета принята сейсмичность в 9 баллов.

На первоначальном этапе настоящего расчетного исследования взаимодействие опорных элементов автомобильной эстакады принималось по гипотезе «жесткой платформы», то есть взаимодействие с основанием не



учитывалось, что является обоснованным на этапе выполнения предпроектных работ. На заключительном этапе данного расчетного исследования было оценено влияние податливости основания на сейсмостойкость конструкции.

Автомобильная эстакада представляет собой протяженное сооружение, разделенное на отдельные участки деформационными швами. Схема фрагмента автомобильной эстакады с направлением сейсмического воздействия представлена на рисунке 3.1.

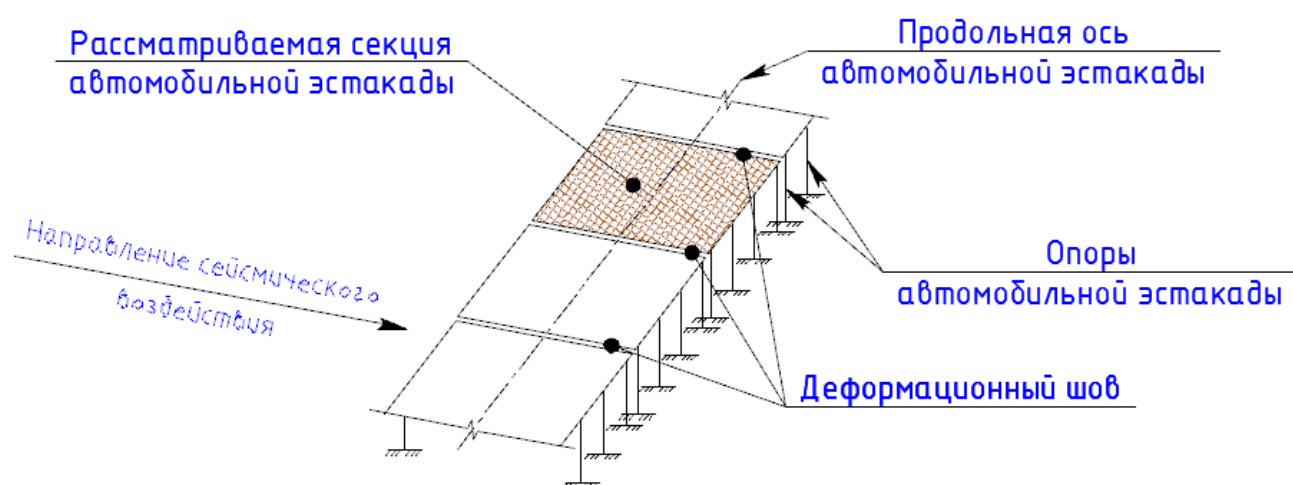


Рисунок 3.1 – Фрагмент автомобильной эстакады

Для сокращения объемов расчетов, был взят один участок автомобильной эстакады между деформационными швами. Расчетная схема была принята в виде пространственной схемы, показанной на рисунке 3.2.

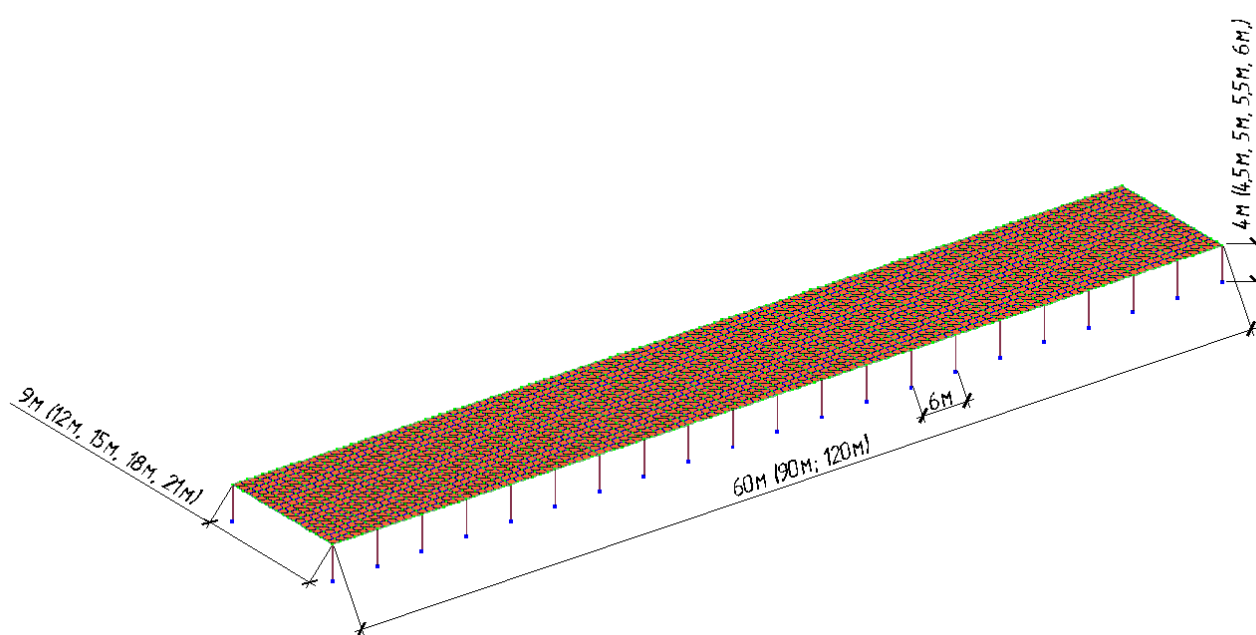


Рисунок 3.2 – Расчетная модель для первого этапа исследования

Расчетные модели состоят из трех типов элементов: узлы, стержни и плоские конечные элементы. Жесткости всех используемых элементов принималась в программном комплексе автоматически в соответствии с выбранными сечениями. В нижней части расположены стержни, моделирующие собой опоры автострады (их жесткости варьируются в данном исследовании). Верхние точки опор соединены между собой стержнями (стержни, лежащие в продольном направлении, моделируют двутавр 60Б1, а лежащие в поперечном направлении – двутавр 100Б2) и пластинами, моделирующими дорожное полотно толщиной 400 мм. Жилые здания, устанавливаются на опоры эстакады, колонны в зданиях заданы стержневыми элементами и выполнены из профиля квадратного сечения 400x10 мм, балки заданы стержневыми элементами и выполнены из двутавра 30Б2, в перекрытия моделируются пластинами толщиной 200 мм. Все используемые на данном этапе жесткости заданы условно и в дальнейшем были уточнены по результатам подбора.

Расчет выполнялся в программном комплексе ЛИРА-САПР 2016, позволяющем получить все необходимые параметры системы, такие как нагрузки

в элементах, перемещения, периоды колебаний, а также визуализировать формы колебаний.

На первом этапе расчётного исследования необходимо определить, как влияют параметры автомобильной эстакады на её сейсмостойкость. Данный этап проводится без учета зданий и предусматривает варьирование геометрических параметров эстакады, жесткостей опор (изменение их материала и сечения) и вариантов самих опор.

Основными геометрическими характеристиками путепровода являются длина участка (между деформационными швами), его ширина и высота. Для изучения изменения одного параметра, необходимо его менять, а два оставшихся зафиксировать. Так, для изучения влияния длины участка, она принималась равной 60м, 90м и 120м при фиксированной ширине 18м и высоте 4,5м. Для изучения влияния ширины участка, она принималась равной 9м, 12м, 15м, 18м, 21м при фиксированной длине участка 90м и высоте 4,5м. Для изучения влияния высоты стоек они принимались равными 4м, 4,5м, 5м, 5,5м и 6м при фиксированной длине участка 90м и ширине 15м. Расчетная модель для первого этапа исследования с различными вариантами геометрических характеристик представлена на рисунке 3.2. Полученные результаты представлены в таблице 3.2.

Для оценки влияния жесткостных характеристик опор на сейсмостойкость автомобильной эстакады было рассмотрено различное исполнение опор: металлические трубы 630х20 мм, трубобетон, включающий в себя металлическую трубу 630х20 мм с заполнением бетоном, и железобетонные круглые колонны диаметром 630 мм. При варьировании жесткостями опор длина и ширина участка, а также высота опор не изменялись и составляли соответственно 90 м, 18 м и 4,5 м. Полученные данные представлены в таблице 3.3.

В продолжении исследования влияния изменения жесткости опор на сейсмостойкость конструкции изменялось поперечное сечение металлических труб по ГОСТ 10704-91 [13]: 630х20 мм, 720х20 мм, 820х20 мм, 920х20 мм, 1020х20 мм, 1120х20 мм. При варьировании жесткостями опор длина и ширина участка, а также

высота опор не изменялись и составляли соответственно 90 м, 18 м и 4,5 м. Полученные данные представлены в таблице 3.4.

В исследовании выполнена оценка влияния на сейсмостойкость и цунамистойкость автомобильной эстакады различной компоновки опор. Рассмотренные варианты опор представлены на рисунке 3.3. При различных вариантах опор длина и ширина участка, а также высота опор не изменялись и составляли соответственно 90 м, 18 м и 4,5 м. Опоры были приняты в виде металлических труб 630х20 мм. Полученные данные представлены в таблице 3.5.

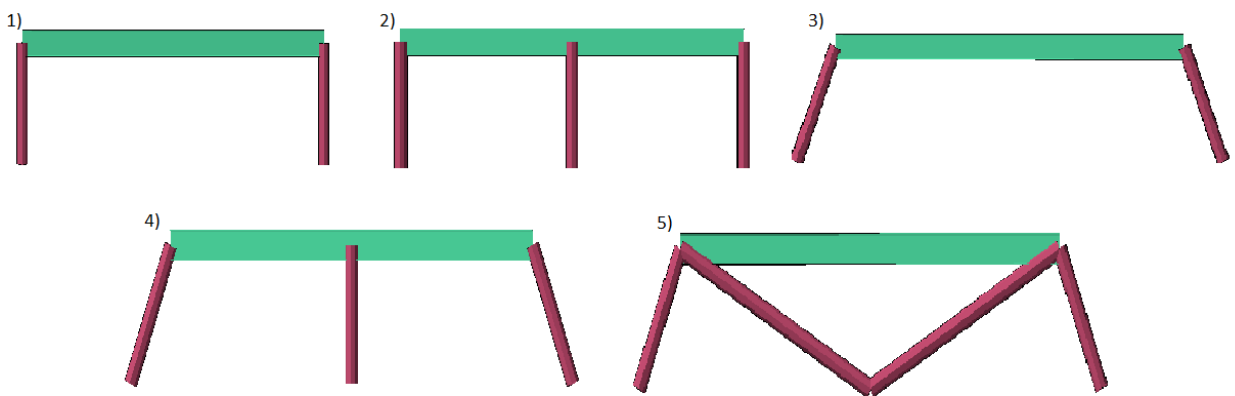


Рисунок 3.3 – Варианты компоновки опор

На втором этапе расчётного исследования определялось влияние параметров эстакады на сейсмостойкость конструкции, но с учетом зданий, расположенных на ее опорах. Для этого были повторены расчёты первого этапа с учетом зданий. При этом использовались одинаковые здания для всех исследуемых вариантов конструкции путепровода. Здания квадратные в плане, трехэтажные, со стальным каркасом и железобетонными плитами перекрытий. Здания располагаются над автомобильной эстакадой так как ранее проведенные исследования [4] показали, что такое их расположение наиболее подходящее с точки зрения сейсмостойкости.

Как сказано выше, второй этап расчетного исследования повторяет первый этап, но со зданиями. Расчетная схема для второго этапа представлена на рисунке 3.4.

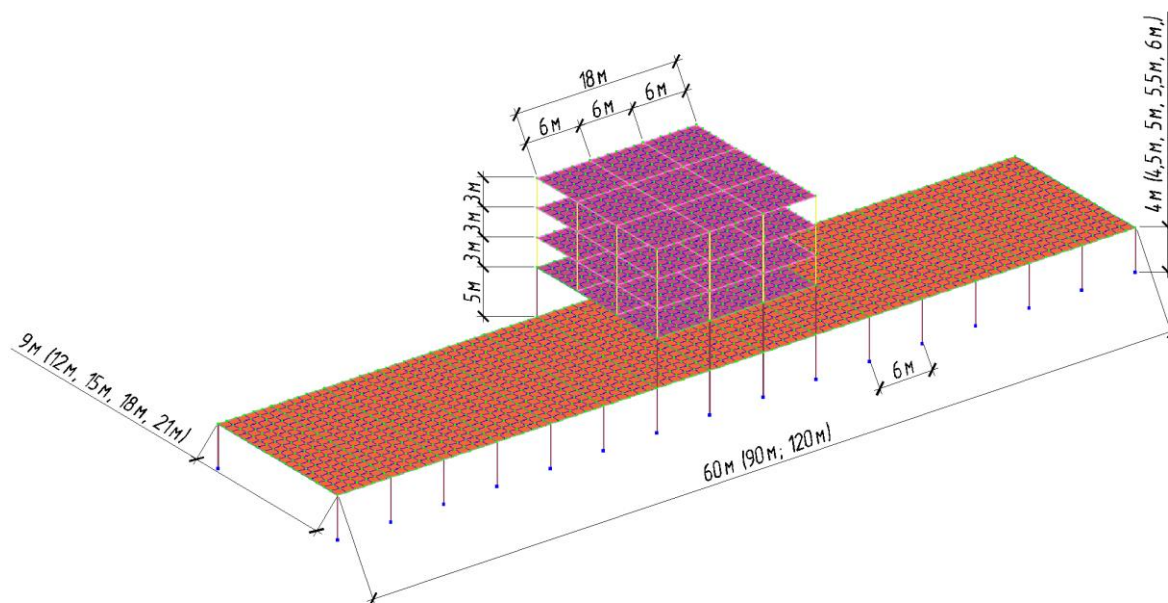


Рисунок 3.4 – Расчетная схема для второго этапа

В результате расчетов получены данные, приведенные в таблицах 3.2-3.5.

На третьем этапе расчётного исследования наиболее подходящий, с точки зрения сейсмостойкости и экономии материала, вариант конструкции обследован на действие сейсмической нагрузки по заданным акселерограммам с различной частотой колебаний:

1. Высокочастотное землетрясение ( $T=0,1-0,3c$ );
2. Среднечастотное землетрясение ( $T=0,4-0,7c$ );
3. Низкочастотное землетрясение ( $T=1,0-1,7c$ ).

Для оценки сейсмостойкости конструкции проводилось сравнение следующих параметров: максимальные перемещения по направлению вдоль действия сейсмической нагрузки, продольная сила  $N$ , поперечная сила  $Q_y$  моменты сил  $M_y$  и  $M_z$  в опорах, а также частота и период колебаний. По возникающим в элементах усилиям был выполнен подбор сечений стальных элементов.

Для расчета на проектное землетрясение в программном комплексе ЛИРА-САПР 2016 были заданы основные характеристики землетрясения: тип сооружения – мостовое или жилое (соответственно для варианта эстакады без жилых зданий и с ними), тип грунта – I, ускорение грунта –  $4m/c^2$  (для 9-ти балльного землетрясения) и направление воздействия (перпендикулярно продольной оси

сооружения, так как в этом направлении у сооружения минимальная жесткость и, соответственно, это наиболее опасное направление горизонтального воздействия).

Программный комплекс ЛИРА-САПР 2016 переводит статические нагрузки в динамические (в том числе в сейсмические). Для этого необходимо задать все статические нагрузки и коэффициенты перевода статических нагрузок в динамические используя таблицу 5.1 СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» [69]: 0,9 для постоянных нагрузок; 0,8 – временные длительные; 0,5 – кратковременные. В таблице 3.1 представлен сбор нагрузок на расчетную схему, который производился согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [70].

Таблица 3.1 – Нагрузки на 1 м<sup>2</sup> принятые при расчете конструкций

№ п.п.	Наименование	Норм. нагрузка кг/м <sup>2</sup>	$\gamma_c$	Расчетная нагрузка кг/м <sup>2</sup>	Прим.
<b>Временные нагрузки</b>					
1	Значение веса снегового покрова на 1м <sup>2</sup> горизонтальной поверхности земли	320	1,4	448	
2	Значение ветрового давления	Не учитывается согласно п.5.1 СП 14.13330.2018 [69]			
3	Равномерно распределенная эксплуатационная нагрузка на покрытие	50	1,3	65	
5	Временная нагрузка на перекрытия в квартирах жилых зданий	150	1,3	195	
6	Временная нагрузка на перекрытия в общих коридорах	300	1,2	360	
7	Временная нагрузка на дорожное полотно от транспорта	700	1,2	840	
<b>Постоянные нагрузки</b>					
1	Нагрузки от собственного веса несущих конструкций	Вычисляется в программе ЛИРА-САПР автоматически			
2	Нагрузка от полов первого этажа (с учетом утеплителя)	140	1,3	182	Нагрузки приняты условно
3	Нагрузка от полов на плиты межэтажных перекрытий	125	1,3	162,5	
4	Нагрузка от конструкций кровли	30	1,3	39	
5	Наружные стены из сэндвич-панелей	26,5	1,2	31,8	Условная масса 1м <sup>2</sup> сэндвич-панели



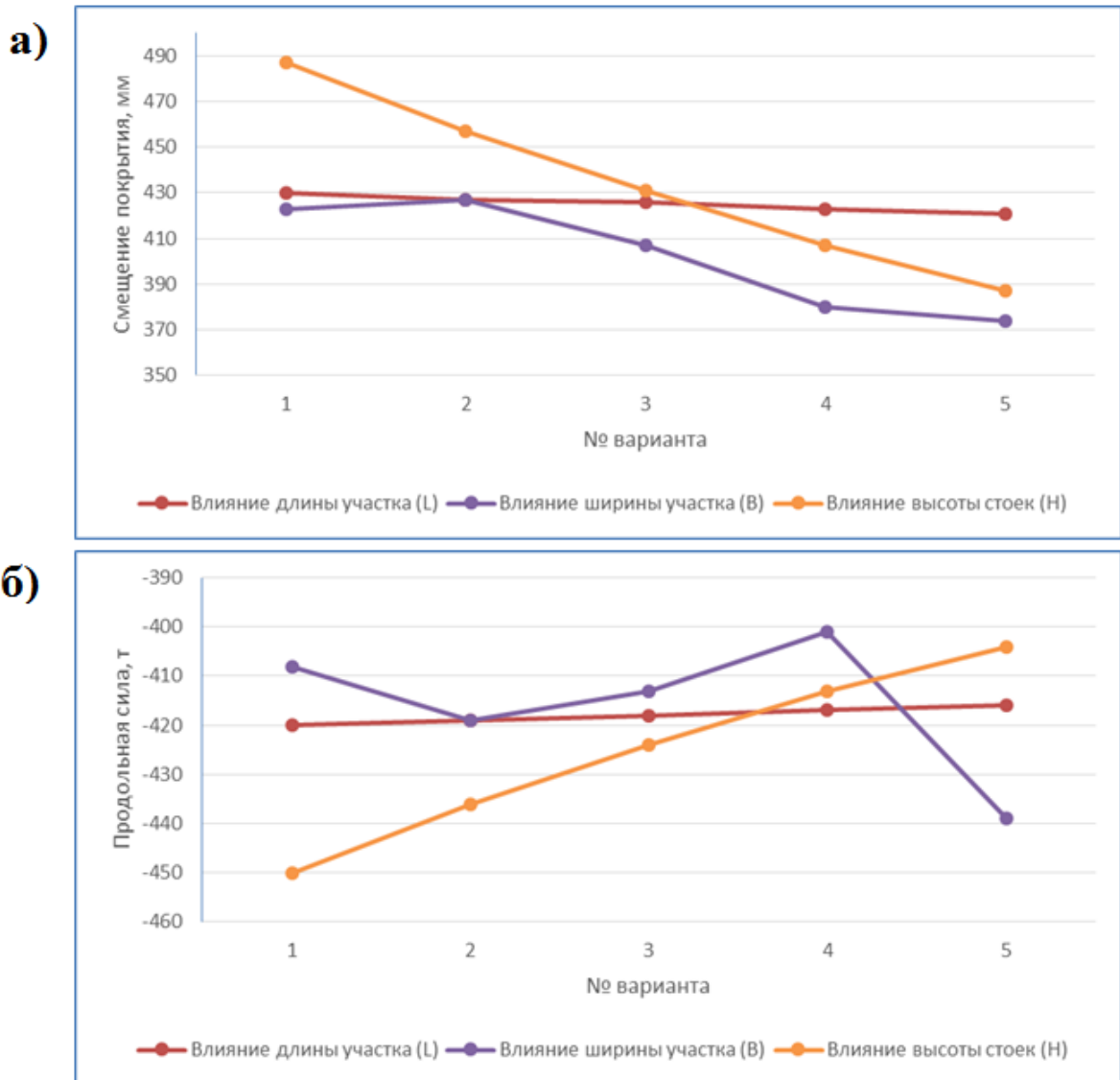


Рисунок 3.5 – Графики влияния геометрических параметров на горизонтальное смещения плиты покрытия здания (а) и возникающую в опорах продольную силу (б)

Как видно из таблицы 3.2 и рисунка 3.5, геометрические параметры в различной степени влияют на сейсмостойкость. Так, длина участка (расстояние между деформационными швами) в наименьшей степени влияет на сейсмостойкость конструкции (разница между значениями продольных усилий в опорах 0,07% при изменении длины на 1 м.). Ширина участка оказывает большее влияние на сейсмостойкость конструкции (разница между значениями продольных усилий в опорах 7,7% при изменении ширины на 1 м.) Наибольшее влияние на



сейсмостойкость оказывает высота эстакады (разница между значениями продольных усилий в опорах 14% при изменении высоты на 1 м.). Исходя из полученных данных, для повышения сейсмостойкости в первую очередь необходимо понижать высоту стоек эстакады. Однако, автомобильная эстакада, как было сказано выше, необходима для организации свободного пространства под зданием и чем оно (свободное пространство) выше, тем меньше вероятность повреждения зданий волнами цунами. Таким образом, с точки зрения сейсмостойкости высоту стоек эстакады необходимо уменьшать, а с точки зрения цунамистойкости – увеличивать. Компромиссом в данной ситуации может служить величина  $h_6^*$ , определяемая по выведенной формуле (3.1)

$$h_6^* = \left(1 - \frac{i \cdot x}{h_{100}}\right) \cdot h_{100} + h_3 \quad (3.1)$$

где  $i$  – уклон берега;

$x$  – расстояние от линии уреза воды до объекта;

$h_{100}$  – максимальное за 100 лет значение вертикальных заплесков цунами, которое определяется по приложению А в СП 292.1325800.2017 [62];

$h_3$  – высота дополнительного зазора, величина которого должна учитывать наличие в потоке глыб льда и плавающие вредоносные предметы,  $h_3 \geq 0,5$  м.

Использование величины  $h_6^*$  в качестве высоты стоек автомобильной эстакады может гарантировать безопасность населения в момент удара волны цунами, так как при такой высоте стоек конструкции дорожного полотна и здания не подвержены удару волны [2].

Как было сказано выше, далее было исследовано влияние жесткостных характеристик опор на сейсмостойкость конструкции. В таблице 3.3 представлены результаты расчетов (по модулю) эстакады без здания (1-й этап) и со зданием (2-й этап) при изменении материала опор: железобетон, металл и трубобетон. На рисунке 3.6 представлен график влияния материала опор на горизонтальные смещения дорожного полотна.

Таблица 3.3 – Результаты расчетов при изменении материала опор

Этап	Материал опор	Макс. перемещение, мм	Продольная сила N, т	Макс. поперечная сила Qy, т	Макс. момент My, т*м	Макс. момент Mz, т*м	Частота колебаний, Гц	Период колебаний, сек
1	Железобетон	80,5	107	227	41,1	527	2,373	0,421
	Металл	57,6	101	234	30,1	561	2,574	0,389
	Трубобетон	44	93,6	237	38,5	591	2,766	0,362
2	Железобетон	460	436	194	57,8	451	0,989	1,012
	Металл	427	419	199	79,4	473	1,002	0,998
	Трубобетон	405	408	198	83,5	486	1,014	0,986

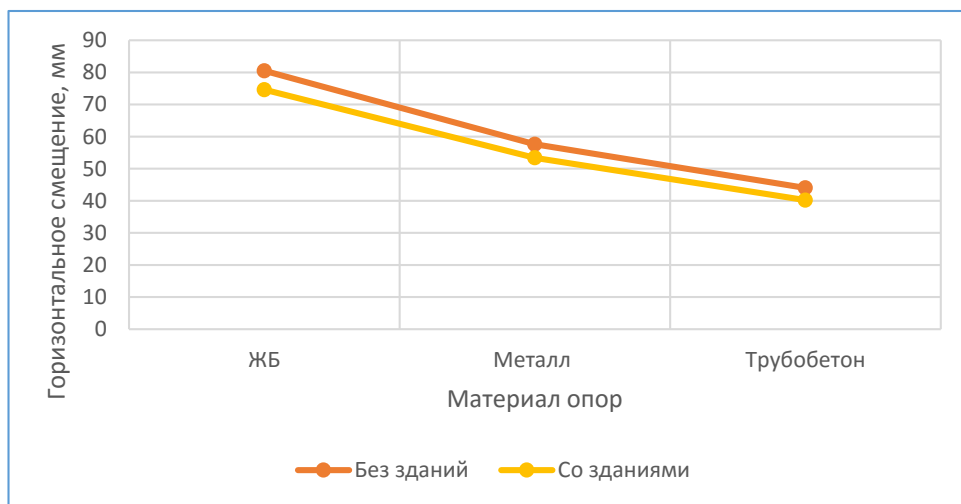


Рисунок 3.6 – График влияния материала опор на горизонтальные смещения дорожного полотна

Как видно из таблицы 3.3 и рисунка 3.6, материал опор оказывает существенное влияние на сейсмостойкость. Поэтому выбор материала опор в основном будет зависеть от возникающих расчетных усилий.

В таблице 3.4 представлены результаты расчетов (по модулю) эстакады без здания (1-й этап) и со зданием (2-й этап) при изменении поперечного сечения опор: металлические трубы по ГОСТ 10704-91 [13] сечением 630x20 мм, 720x20 мм, 820x20 мм, 920x20 мм, 1020x20 мм, 1120x20 мм. На рисунке 3.7 представлен график влияния сечения опор на горизонтальные смещения дорожного полотна.

Таблица 3.4 – Результаты расчетов при изменении поперечного сечения опор

Этап	Вариант опор	Макс. перемещение, мм	Продольная сила N, т	Макс. поперечная сила Qy, т	Макс. момент My, т*м	Макс. момент Mz, т*м	Частота колебаний, Гц	Период колебаний, сек
1	630x20	57,6	-101	234	30,1	561	2,574	0,389
	720x20	43,3	-93,3	237	36,8	593	2,77	0,361
	820x20	33,1	-96,8	239	45,2	628	2,96	0,338
	920x20	26,2	-95,8	239	57,1	660	3,116	0,321
	1020x20	21,1	-95,7	238	65,9	687	3,24	0,309
	1120x20	17,2	-98,5	235	74,1	708	3,338	0,3
2	630x20	427	-419	199	79,4	473	1,002	0,998
	720x20	394	-409	202	87,9	501	1,042	0,96
	820x20	369	-399	199	91,8	511	1,076	0,93
	920x20	350	-392	211	117	572	1,104	0,906
	1020x20	335	-402	211	126	594	1,128	0,886
	1120x20	323	-379	216	142	634	1,15	0,869

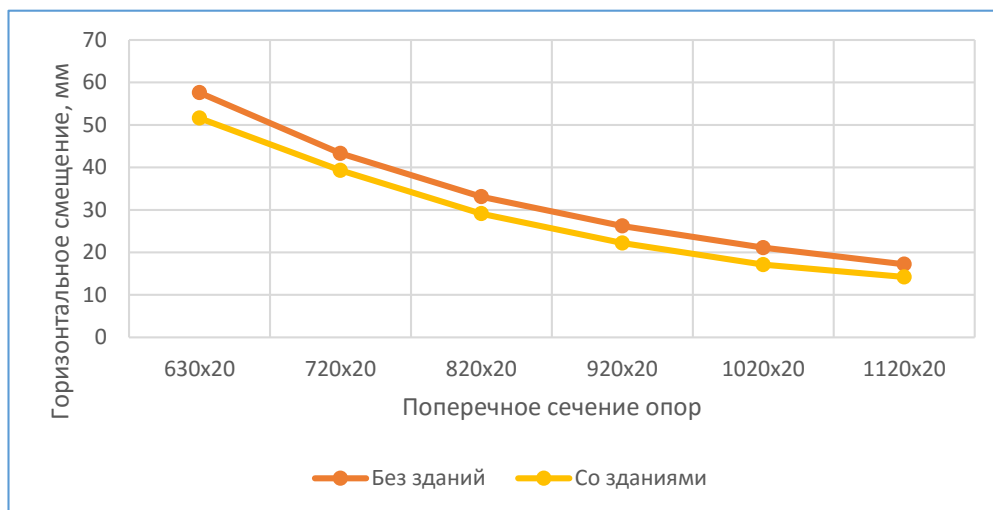


Рисунок 3.7 – График влияния поперечного сечения опор на горизонтальные смещения дорожного полотна

Как видно из таблицы 3.4 и рисунка 3.7, сечение опор – существенный фактор, влияющий на сейсмостойкость всей конструкции. Кроме того, с увеличением сечения опор повышается их несущая способность, следовательно, подбор сечения опор необходимо производить с учетом сейсмического воздействия (так, как это происходит в практике проектирования).

В заключении расчетного исследования предлагаемой конструкции на воздействие от проектного землетрясения, было произведено сравнение нескольких вариантов компоновки опор. Результаты данных расчетов представлены в таблице 3.5. На рисунке 3.8 представлен график влияния варианта компоновки опор на горизонтальное смещения дорожного полотна.

Таблица 3.5 – Результаты расчетов при изменении вариантов компоновки опор

Этап	Вариант опор	Макс. перемещение, мм	Продольная сила N, т	Макс. поперечная сила Qy, т	Макс. момент My, т*м	Макс. момент Mz, т*м	Частота колебаний, Гц	Период колебаний, сек
1	1	57,6	101	234	30,1	561	2,574	0,389
	2	34,4	88	157	31,1	362	3,521	0,284
	3	48,6	180	8,41	463	24,1	2,507	0,399
	4	28,4	101	146	252	335	3,153	0,317
	5	2,62	189	3,84	65,7	9,73	2,716	0,368
2	1	427	419	199	79,4	473	1,002	0,998
	2	376	377	147	41,9	336	1,013	0,987
	3	380	446	16,7	400	49,1	0,99	1,01
	4	346	384	125	202	295	1,01	0,993
	5	318	416	3,75	97	9,33	1	1

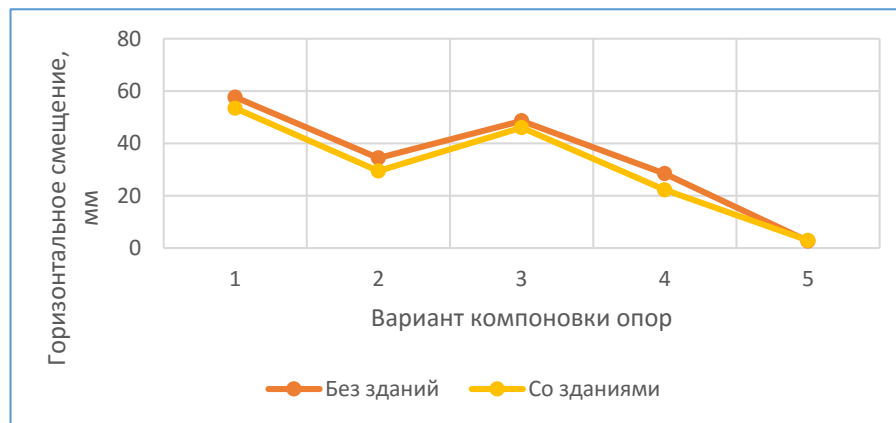


Рисунок 3.8 – График влияния варианта компоновки опор на горизонтальные смещения дорожного полотна

Из таблицы 3.5 и рисунка 3.8 видно, что варианты опор не значительно (при принятых геометрических размерах) влияют на частоту или период колебаний и их выбор будет зависеть по большей части от возникающих расчетных усилий и деформации конструкции.

Также из рисунков 3.6-3.8 видно, что надстраиваемое на конструкцию здание не сильно влияет на горизонтальные смещения дорожного полотна от действия сейсмических сил.

### 3.4 Выбор параметров предлагаемого решения цунамизащиты

Первый рассматриваемый параметр – длина участка между деформационными швами. Анализ полученных на втором этапе (расчет конструкции эстакады со зданием) усилий в опорах показал большую разницу между теми стойками на которые опираются здания и на которые здания не опираются. На рисунке 3.9 представлены нормальные усилия, возникающие в стойках от основного сочетания нагрузок.

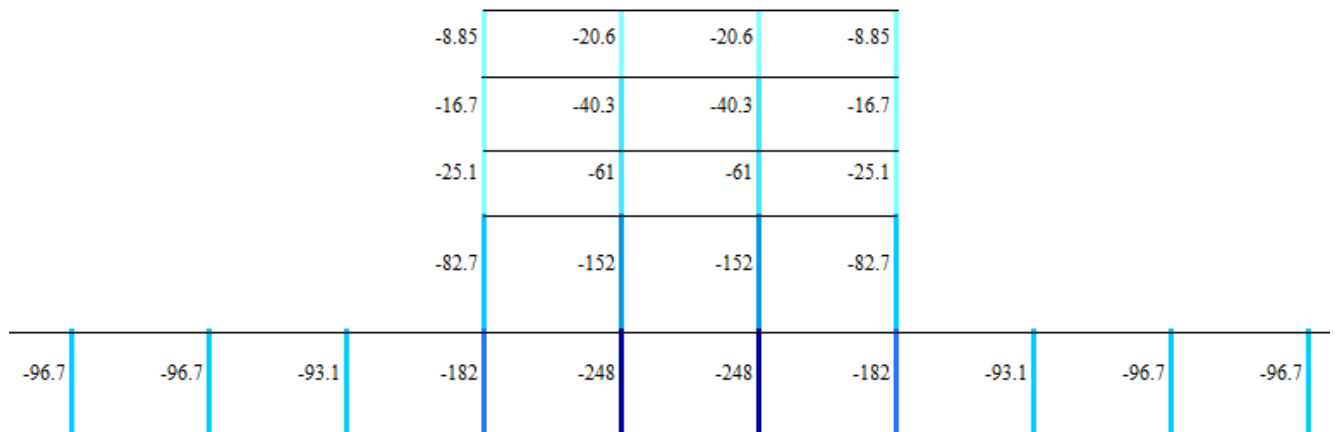


Рисунок 3.9 – Нормальные усилия в стойках от основного сочетания нагрузок

Из рисунка 3.9 видно, что усилия в стойках под зданием примерно в два раза превышают усилия в тех стойках, на которые здания не опираются. Поэтому было принято решение деформационные швы располагать перед зданием и сразу после него. На рисунке 3.10 представлен схематичный вид полученной конструкции с деформационными швами.

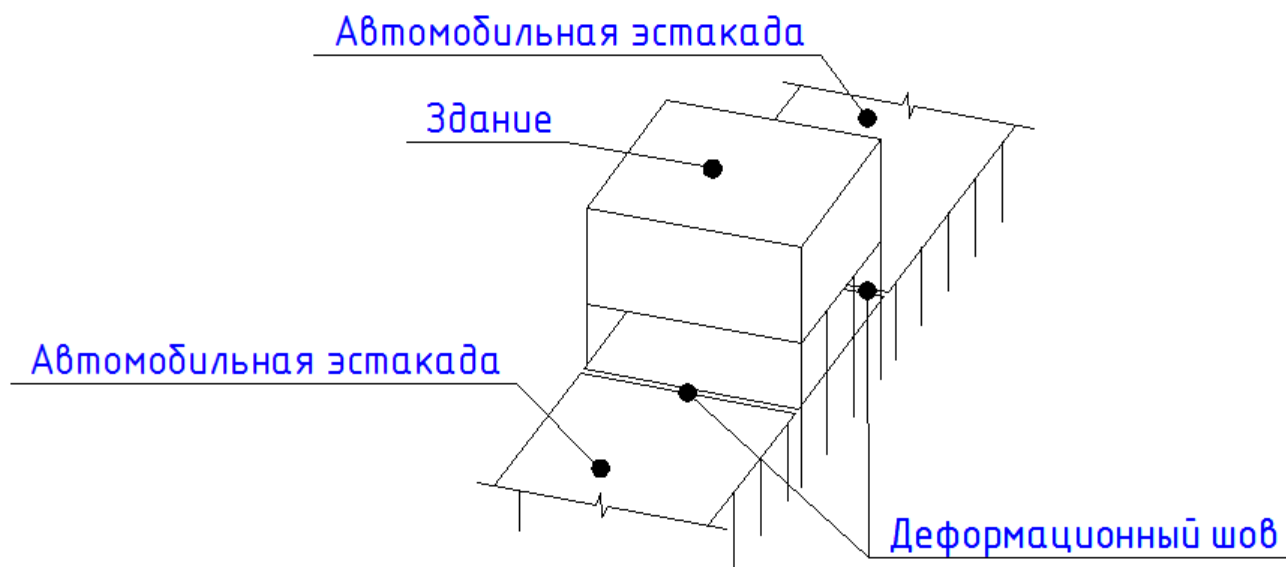


Рисунок 3.10 – Расположение деформационных швов

Данное расположение деформационных швов имеет несколько преимуществ в сравнении с первоначальным положением (Рисунок 3.4). Во-первых, большая разность усилий предполагает большую разность осадок при использовании одинаковых конструкций. При данном расположении деформационных швов можно, изменяя конструкцию фундаментов опор под зданием, достичь равной осадки эстакады и здания. Во-вторых, значительная разность усилий приводит к необходимости использования разных сечений опор в эстакаде и опор под зданием. Кроме того, при данном расположении деформационных швов, конструкция автомобильной эстакады может отличаться от конструкции участка эстакады под зданием и быть практически любой: основные требования, которые предъявляются к ней, - это быть достаточно сейсмоустойчивой и совпадение отметок дорожного полотна эстакады и участка эстакады под зданием. В-третьих, удобство, так как теперь предлагаемая конструкция представляет собой небольшой модуль шириной равной ширине эстакады и относительно небольшой длиной, равной длине здания. Это позволяет подбирать необходимое количество таких модулей для каждого населенного пункта индивидуально, ведь максимальное их количество прямопропорционально длине «приподнимаемого» участка дороги и

обратнопропорционально противопожарным требованиям, а также требованиям по теплоизоляции, аэрации и другим.

Таким образом, расстояние между деформационными швами, окружающими конструкцию равно длине конструкции – 30 метров.

Следующий рассматриваемый параметр – ширина конструкции. Согласно ГОСТ Р 52398-2005 «Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования» [16] автомобильные дороги, ведущие в большинство прибрежных населённых пунктов в цунамиопасных районах, имеют III и II категории (две полосы шириной по 3,5 м. и две полосы шириной по 3,75 м. соответственно). Для предлагаемого средства цунамизащиты зданий возможно использование автомобильных эстакад обеих категорий [16].

На рисунке 3.11 представлена схема габаритов приближения конструкций мостовых сооружений при отсутствии разделительной полосы, приведенная в ГОСТ Р 52748-2007 «Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения» [17].

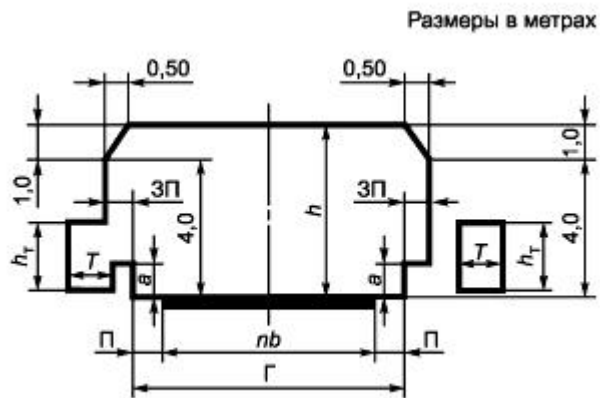


Рисунок 3.11 – Схема габаритов приближения конструкций мостовых сооружений при отсутствии разделительной полосы

На рисунке 3.11 используются следующие обозначения:

ЗП - ширина защитных полос;

$h_T$  - габарит по высоте на тротуарах;

T - ширина тротуаров;

a - высота ограждений;

$h$  - габарит по высоте на проезжей части;

$\Pi$  - ширина полосы безопасности;

$n\mathit{b}$  - общая ширина проезжей части или ширина проезжей части для движения одного направления ( $n$  - число полос движения в одном направлении,  $b$  - ширина каждой полосы движения, м), м;

$\Gamma$  - габарит по ширине (расстояние между ограждениями проезда, в которое входит и ширина разделительной полосы, не имеющей ограждений);

Таким образом, габарит по ширине можно определить по формуле 3.2:

$$\Gamma = n \cdot b + 2\Pi \quad (3.2)$$

Согласно таблице 1 из ГОСТ Р 52748-2007 [17], для дороги II категории общее число полос равно 2, ширина каждой полосы 3,75 метра, ширина полосы безопасности 2 метра. Тогда подставляя принятые значения в формулу 3.2 получим:

$$\Gamma = 2 \cdot 3,75 + 2 \cdot 2 = 11,5 \text{ (м)}$$

Расстояние между опорами конструкции принимаем 12 метров. Но общая ширина конструкции будет больше, так как необходимо предусмотреть с обеих сторон защитные полосы по 0,5 м. и тротуары по 1,5 м. (согласно таблице 11.4 из СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89\*» [74]), а также уширение тротуаров возле лестницы и лифта (см. рисунок 3.13).

Следующий рассматриваемый параметр – высота стоек. Как было ранее установлено, высота стоек конструкции от уровня земли до низа несущих элементов дорожного полотна должна быть не менее величины  $h_6^*$  и для каждого населенного пункта индивидуальна и зависит от максимального за 100 лет вертикального заплеска волн цунами, удаленности автомобильной эстакады от линии уреза воды и уклоном береговой линии. Для предлагаемого средства цунамизащиты зданий принимаем высоту стоек 5 метров.

Согласно п. 6.2 из ГОСТ Р 52748-2007 [17], для дорог I-III категории высота стоек конструкции от уровня дорожного полотна до низа несущих горизонтальных конструкций здания (параметр  $h$  на рисунке 3.11) составляет не менее 5 м.



На рисунке 3.12 представлена расчетная схема предлагаемого средства цунамизащиты.

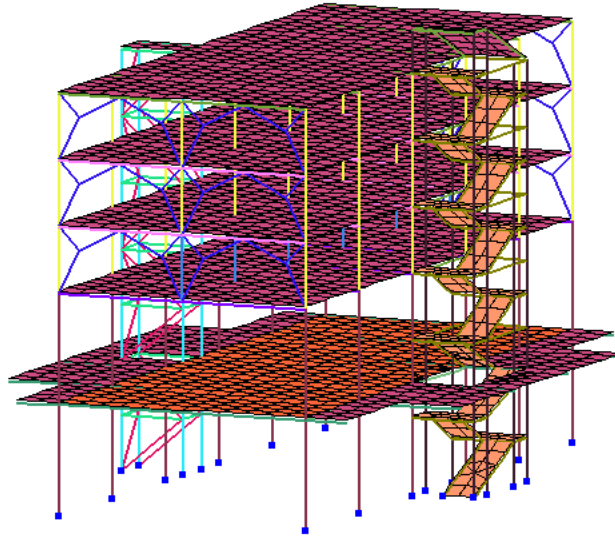


Рисунок 3.12 – Расчетная схема предлагаемого средства цунамизащиты

На рисунке 3.13 – представлена принципиальная схема конструкции на уровне дорожного полотна (слева) и поперечный разрез всей конструкции (справа) с основными размерами.

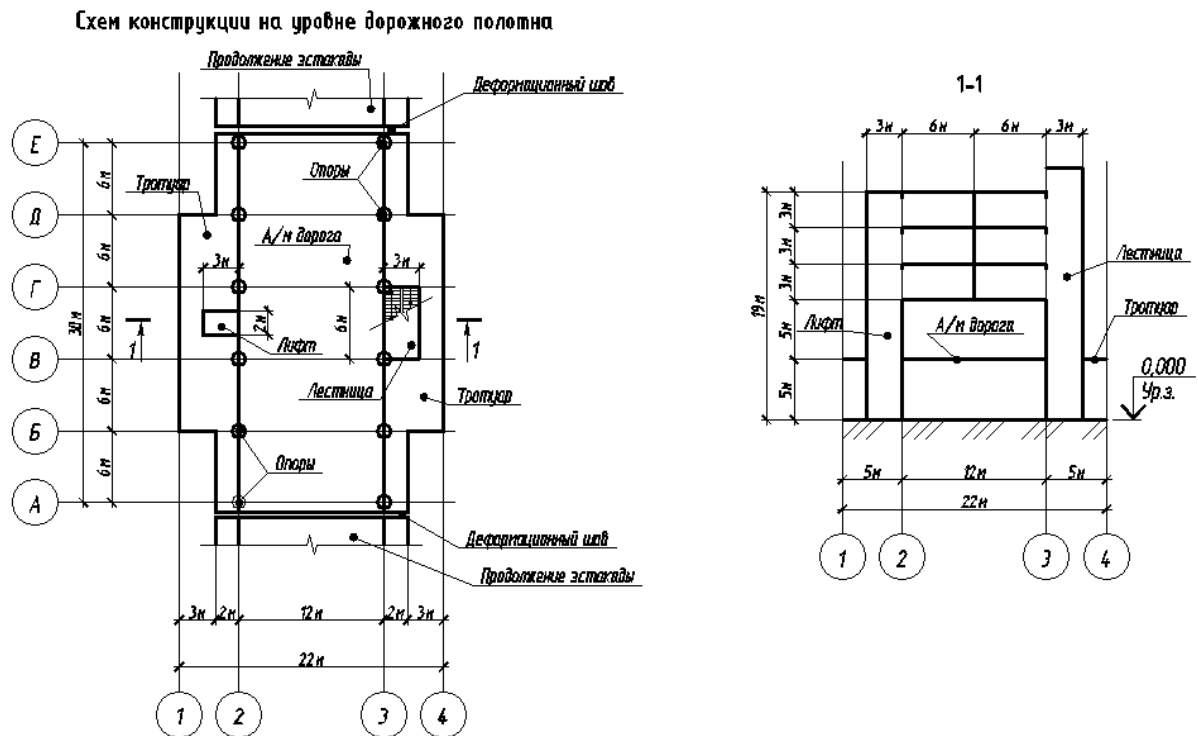


Рисунок 3.13 – Схема конструкции на уровне дорожного полотна (слева) и поперечный разрез (справа)

Как видно из рисунков 3.12 и 3.13 выбрано двухрядное расположение опор, которые представляют собой полые металлические трубы. Также в данную конструкцию включены лестница и лифт для вертикального перемещения населения.

После выбора основных параметров конструкции был выполнен подбор сечений также с помощью программы ЛИРА-САПР 2016. Подбор сечений осуществлялся для всех стальных элементов от действия особого сочетания нагрузок с учетом проектного землетрясения, но с коэффициентом  $K_0=1,5$ , чтобы обеспечить запас надежности.

В результате подбора были приняты следующие сечения автомобильной эстакады: опорные стойки – полые металлические трубы 1420x30 мм., несущие балки – двутавр 100Б4, балки между опорами в уровне дорожного полотна вдоль конструкции – двутавр 20Б1. Основные элементы здания: несущие балки нижнего этажа – двутавр 80Б2, несущие стойки здания (кроме средних колонн 1-го этажа) – трубы квадратного профиля 400x10 мм., стойки среднего ряда 1-го этажа – 500x20 мм., несущие балки 2-го и 3-го этажа – двутавр 40Б1, несущие балки покрытия – двутавр 40Б1, вертикальные металлические связи – два уголка 160x100x14 мм. Элементы лестницы: вертикальные несущие элементы – трубы квадратного профиля 180x16 мм., горизонтальные несущие элементы, а также косоуры – швеллер 16П. Элементы лифтовой шахты: стойки и балки лифтовой шахты – трубы квадратного профиля 180x10 мм., раскосы - два уголка 160x100x14 мм. Результаты проверки принятых сечений представлены на рисунке 3.14.

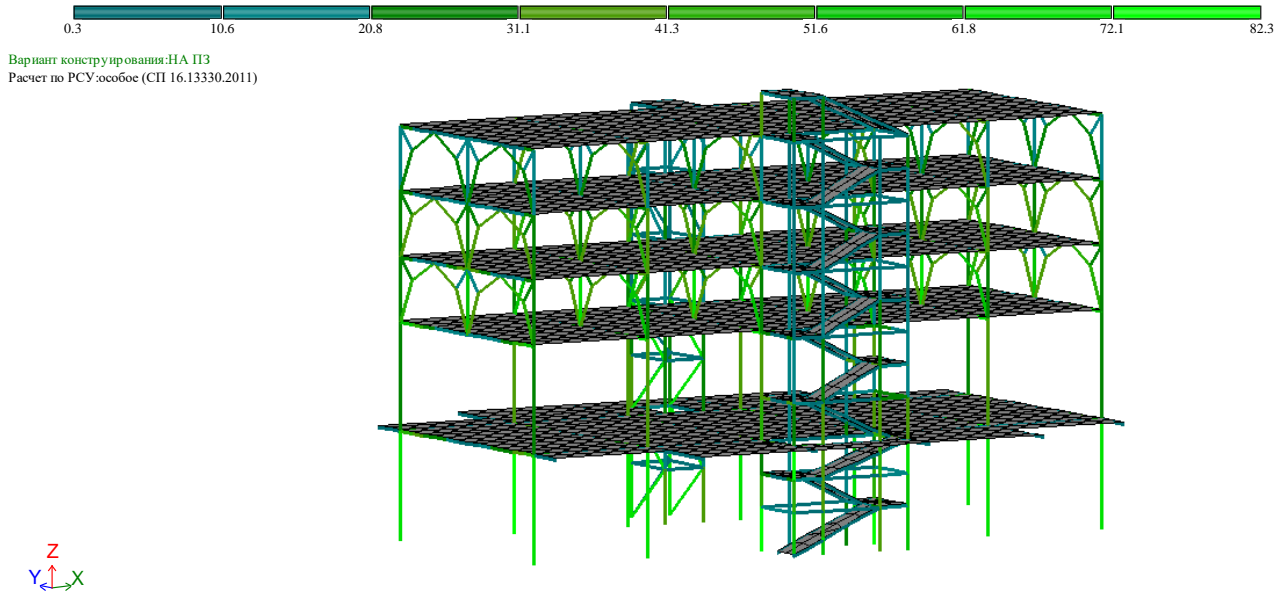


Рисунок 3.14 – Процент использования материала

Как видно из рисунка 3.14, процент использования материала при расчете на особое сочетание усилий с участием проектного землетрясения 9 баллов не превышает 100%.

### 3.5 Расчет на землетрясение уровня МРЗ

Заключительным этапом расчета предлагаемого средства цунамизащиты на сейсмостойкость стал расчет на максимальное расчетное землетрясение. Для данного расчета были выбраны три синтезированные акселерограммы с разной частотностью. В таблице 3.6 представлены основные характеристики применяемых акселерограмм.

Таблица 3.6 – Характеристики акселерограмм

№ п.п.	Диапазон преобладающих периодов, с	Амплитуда максимального ускорения грунта, $m/c^2$	Шаг дискретизации, с	Количество точек	Время действия акселерограммы, с
1	0,1-0,3	4,055	0,0125	10500	131,2375
2	0,4-0,7	4,073	0,00781	16800	131,20019
3	1,0-1,7	4,082	0,01001	17430	174,46429

Стоит отметить, что согласно п. 5.2.2 из СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» [69] ускорения грунта необходимо умножить на коэффициент  $K_0=1,5$  (из таблицы 4,2 [69]). Коэффициент диссипации (параметр затухания) принят  $k_{si}=0,05$  (значение по умолчанию в ПК ЛИРА-САПР 2016 для строительных конструкций).

По результатам расчета на землетрясение по акселерограммам, была выполнена проверка принятых сечений, результаты данной проверки представлены на рисунке 3.15.

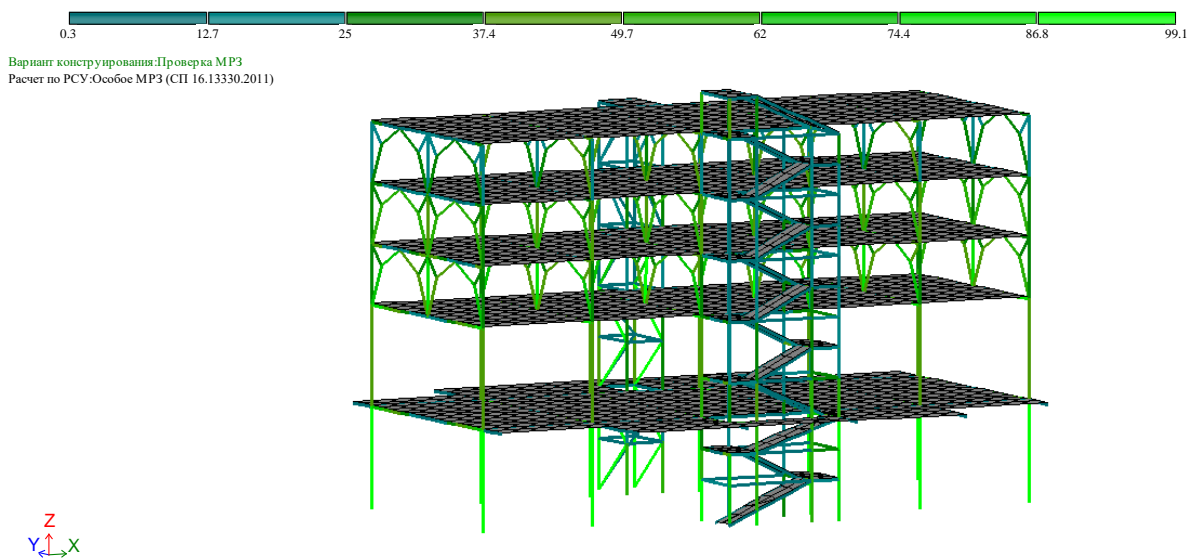


Рисунок 3.15 – Процент использования материала

Как видно из рисунка 3.15, процент использования материала с учетом землетрясения по акселерограммам различной частотности не превышает допустимые значения.

### 3.6 Проверка предлагаемого решения цунамизащиты зданий на защиту от прогрессирующего обрушения

В рассматриваемой конструкции, в следствии воздействия землетрясения, волн цунами и/или других внешних факторов, которые превышают расчетные значения, возможно разрушение одной из опор. В СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования.

Основные положения» [73] приведены требования к расчету от прогрессирующего обрушения зданий и сооружений повышенного уровня ответственности, а также для зданий и сооружений нормального уровня ответственности с массовым пребыванием людей.

Так, расчетная схема здания или сооружения при расчете от прогрессирующего обрушения предусматривает выключение из работы схемы (удаление) несущего конструктивного элемента. В рассматриваемой конструкции для расчёта ее от прогрессирующего обрушения были поочередно удалены различные участки опор: в первом расчете одна из центральных опор, во втором – крайняя опора.

Расчет защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения следует выполнять на сочетание нагрузок, включающее постоянные и длительные временные нагрузки. При этом коэффициенты надежности по нагрузке, сочетания нагрузок и надежности по ответственности следует принимать равными 1.

Результаты проверки металлических конструкций на расчет от прогрессирующего обрушения при выключении из работы центральной опоры представлены на рисунке 3.16.

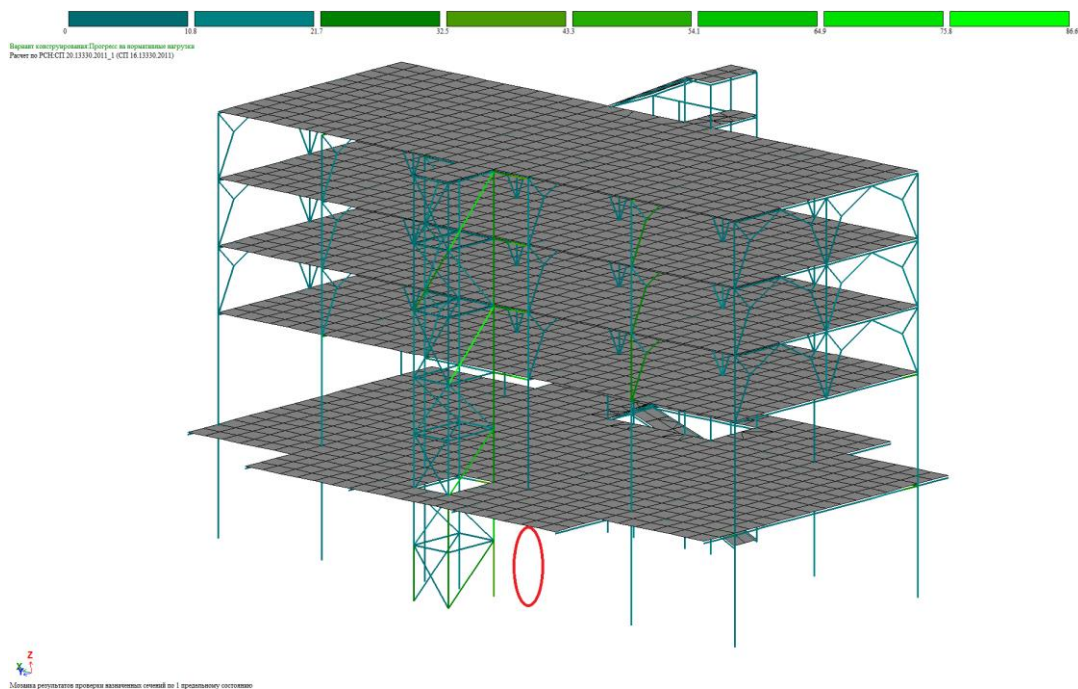


Рисунок 3.16 – Результаты проверки принятых сечений при расчете от прогрессирующего обрушения (при выключении из работы центральной опоры)

Результаты проверки металлических конструкций на расчет от прогрессирующего обрушения при выключении из работы крайней опоры представлены на рисунке 3.17.

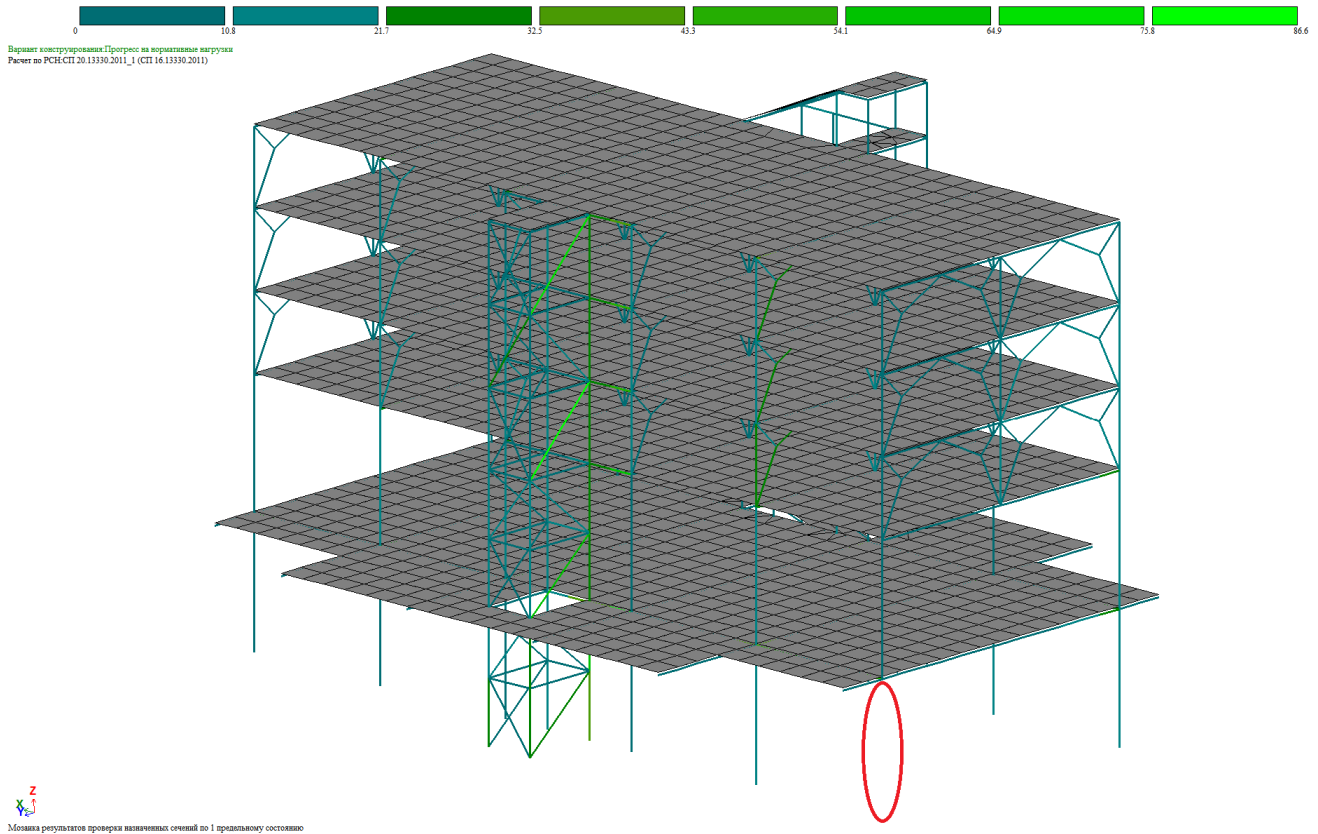


Рисунок 3.17 – Результаты проверки принятых сечений при расчете от прогрессирующего обрушения (при выключении из работы крайней опоры)

Как видно из рисунков 3.16 и 3.17, принятые при проектировании сечения металлических элементов с большим запасом обеспечивают сохранность конструкции при выключении из работы одной из опор. Такой большой запас прочности обусловлен в первую очередь тем, что изначально подбор сечений металлических элементов производился с учетом сейсмического воздействия уровня МРЗ.

### 3.7 Влияние грунтовых условий на сейсмостойкость предлагаемого решения цунамизащиты зданий

Заключительным этапом изучения сейсмостойкости предлагаемого средства цунамизащиты зданий является расчет принятой конструкции с учетом различной податливости основания. Податливость основания моделируется одноузловым конечным элементом 51 (связь конечной жесткости). Для расчета данному конечному элементу необходимо задать значение, которое соответствует погонной жесткости грунта на осевое сжатие.

Значение погонной жесткости грунта и осадка определяются по схеме линейно деформируемого полупространства, представленной в СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» [71]. Осадка фундамента определяется по формуле 3.3:

$$S = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i})h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z\gamma,i}h_i}{E_{e,j}}$$

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i})h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z\gamma,i}h_i}{E_{e,j}},$$
(3.3)

где  $\beta$  – безразмерный коэффициент, равный 0,8;

$\sigma_{zp,i}$  – среднее значение вертикального нормального напряжения (далее - вертикальное напряжение) от внешней нагрузки в  $i$ -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента (см. 5.6.32), кПа;

$h_i$  – толщина  $i$ -го слоя грунта, см, принимаемая не более 0,4 ширины фундамента;

$E_i$  – модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви первичного нагружения, кПа;

$\sigma_{z\gamma,i}$  – среднее значение вертикального напряжения в  $i$ -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, от собственного веса выбранного при отрывке котлована грунта (см. 5.6.33), кПа;



$E_{e,j}$  – модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви вторичного нагружения, кПа;

$n$  – число слоев, на которые разбита сжимаемая толща основания.

Определение значения погонной жесткости грунта выполнялось в ПК ЛИРА-САПР 2016, исходные данные представлены на рисунке 3.18.

Рисунок 3.18 – Исходные данные для определения погонной жесткости грунта

Для сравнительного анализа влияния грунтового основания на сейсмостойкость конструкции варьировался для каждого типа стоек только модуль деформации слоя и принимался соответственно  $1000 \text{ т/м}^2$ ,  $1500 \text{ т/м}^2$ ,  $2000 \text{ т/м}^2$ ,  $2500 \text{ т/м}^2$  и  $3000 \text{ т/м}^2$ .

В данной задаче было рассмотрено три типа стоек: внутренние опоры эстакады, крайние опоры эстакады и опоры лестничного и лифтового узлов. Выбор типов опор обусловлен нагрузкой от вышележащих конструкций на обрез фундаментов. Данная нагрузка была собрана для схемы с жесткой заделкой фундаментов от основного сочетания и представлена на рисунке 3.19.



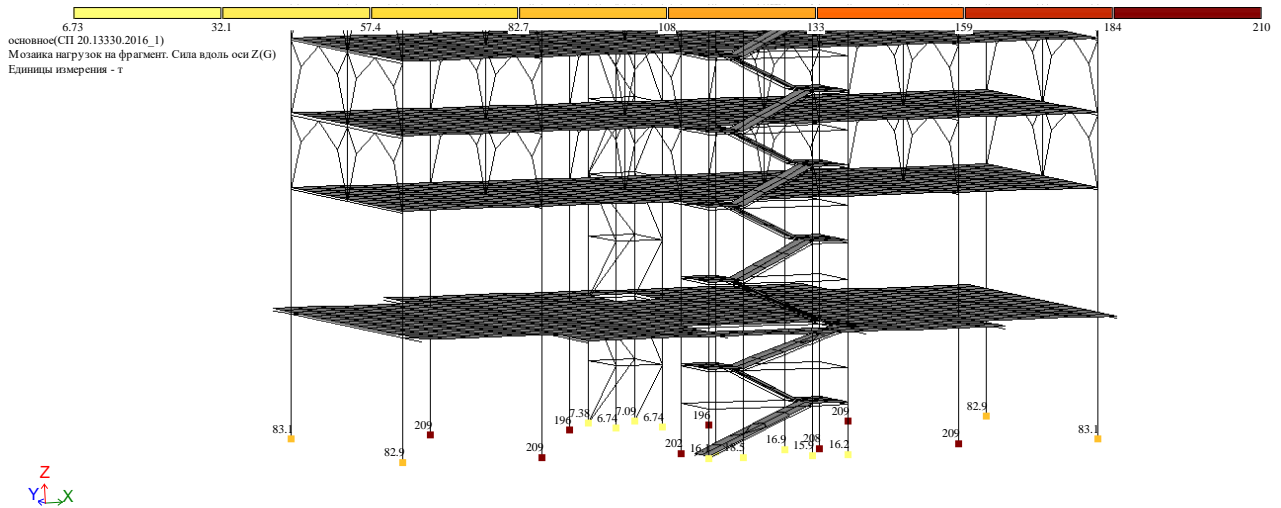


Рисунок 3.19 – Вертикальная нагрузка от вышележащих конструкций на фундаменты

Как видно из рисунка 3.19, на фундаменты внутренних опор эстакады приходит нагрузка около 210 т., на фундаменты крайних опор (возле деформационных швов) эстакады – около 85 т. и на опоры лестничного и лифтового узлов – около 15 т. Данные значения нагрузок вносились в поле «Вертикальная нагрузка (P)» исходных данных (рисунок 3.18).

Таким образом, для каждого типа стоек и каждого модуля деформации слоя была рассчитана своя погонная жесткость, которая задавалась в КЭ 51. В результате расчета данных схем на особое сочетание нагрузок (с учетом сейсмического воздействия уровня ПЗ) были получены данные, приведенные в таблице 3.7. На рисунке 3.20 представлена деформированная схема конструкции при особом сочетании нагрузок и податливом основании.

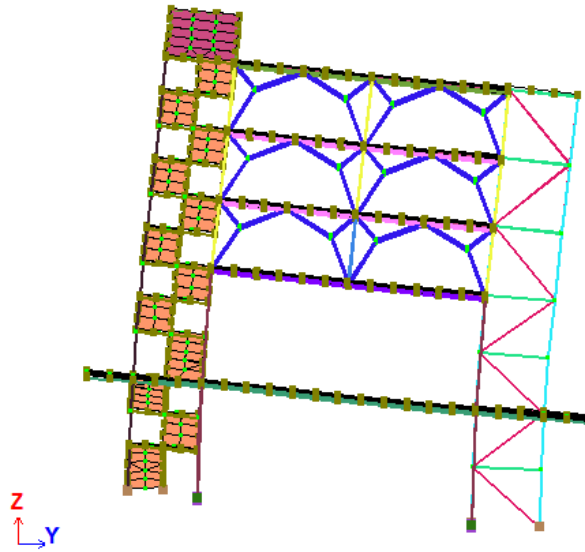


Рисунок 3.20 – Деформированное состояние конструкции

Таблица 3.7 – Результаты расчетов при изменении жесткости грунта

Модуль деформации грунта $E$ , т/м <sup>2</sup>	Макс. перемещение, мм	Продольная сила $N$ , т	Макс. поперечная сила $Q_y$ , т	Макс. Момент $M_y$ , т*м	Частота колебаний, Гц	Период колебаний, сек
Жесткая заделка	63,9	349	184	15,7	1,399	0,715
3000	105	193	115	45,7	0,594	1,684
2500	111	186	91,5	51,8	0,577	1,733
2000	146	149	107	39,4	0,555	1,8
1500	159	144	108	38,3	0,525	1,904
1000	171	132	105	40,6	0,477	2,096

На рисунке 3.21 представлен график влияния жесткости основания на горизонтальные перемещения плиты покрытия.

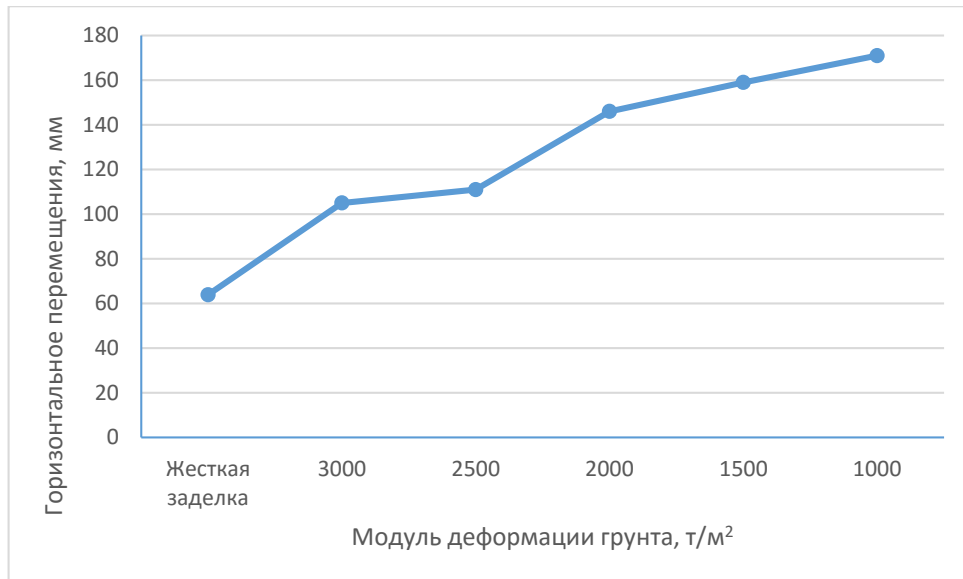


Рисунок 3.21 – График зависимости горизонтального перемещения плиты покрытия от модуля деформации грунта

На рисунках 3.22 представлен график влияния жесткости основания на возникающие в опорах продольные усилия соответственно.

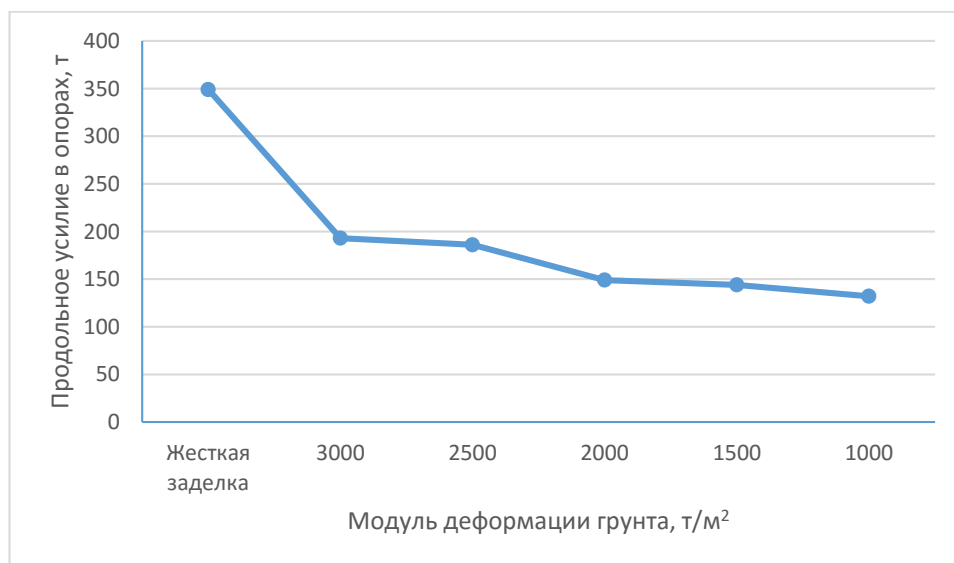


Рисунок 3.22 – График зависимости продольного усилия в опорах от модуля деформации грунта (в т/м<sup>2</sup>)

Как видно из таблицы 3.7 и рисунков 3.21 и 3.22, чем жестче основание сооружения (меньше его податливость), тем меньшие горизонтальные отклонения конструкции и большие усилия в опорах возникают при действии сейсмической нагрузки.

### 3.8 Выводы по главе

1. Предложена методика расчета автомобильной эстакады, на основании которой выполнено расчетно-теоретическое исследование сейсмостойкости с различными вариантами характеристик основных несущих конструктивных элементов предлагаемого средства цунамизащиты зданий и доказана работоспособность предлагаемой конструкции в условиях высоких сейсмических воздействий.

2. Установлено, что длина участка (расстояние между деформационными швами) в наименьшей степени влияет на сейсмостойкость конструкции, но из-за значительной разности усилий в опорах предлагаемой конструкции здания и эстакады, деформационными швами следует отделять конструкцию цунамизащитного здания от автомобильной эстакады. Ширина участка оказывает в большей степени влияние на сейсмостойкость конструкции, но не основное, поэтому ширину конструкции следует принимать в соответствии с необходимой пропускной способностью автомобильной эстакады (классом дороги, числом полос движения и их шириной). Наибольшее влияние оказывает высота эстакады, которую рекомендуем принимать равной величине  $h_6^*$ , которая зависит от максимальных за 100 лет вертикальных заплесков волн цунами, расстояния от уреза воды до объекта и уклона берега. Использование величины  $h_6^*$  в качестве высоты стоек обеспечивает цунамистойкость конструкции при наименьших сейсмических нагрузках.

3. Показано, что сечение опор в достаточной степени влияет на сейсмостойкость конструкции, кроме того с увеличением сечения опор повышается их несущая способность, поэтому сечение конструкций в первую очередь необходимо задавать в соответствии с расчетными усилиями. Конструктивные варианты опор незначительно (при принятых геометрических размерах) влияют на частоту или период колебаний и их выбор будет зависеть по большей части от возникающих расчетных усилий (таким способом можно значительно снизить возникающие от сейсмического воздействия поперечную

силу и моменты) и деформации конструкции. Материал опор в достаточной степени влияет на сейсмостойкость конструкции.

4. По результатам данного исследования установлено, что наиболее рациональные геометрические параметры предлагаемого средства цунамизащиты зданий из рассмотренных вариантов составляют следующие значения: длина конструкции 30 м., ширина 12 м., высота стоек - 5 м.

5. Произведен расчет конструкции на землетрясение с использованием синтезированных акселерограмм различной частотности: высокочастотные (период 0,1-0,3 с.), среднечастотные (период 0,4-0,7 с.), низкочастотные (период 1,0-1,7 с.). Доказано, что принятые сечения удовлетворяют требованиям надежности при расчете конструкции на действие землетрясения с использованием синтезированных акселерограмм различной частотности.

6. С помощью расчета от прогрессирующего обрушения доказано, что предлагаемая конструкция не обрушится даже при выключении из работы одной из опор.

7. Построены зависимости влияния податливости основания на сейсмостойкость конструкции и доказано, что чем жестче основание сооружения (меньше его податливость), тем меньшие горизонтальные отклонения конструкции и большие усилия в опорах возникают при действии сейсмической нагрузки.

## 4 РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЦУНАМИСТОЙКОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

### 4.1 Общие положения

В предыдущей главе была предложена методика оценки сейсмостойкости предлагаемого средства цунамизащиты, определено в какой степени на сейсмостойкость влияют различные геометрические, жесткостные и конструктивные параметры, выбраны наиболее рациональные значения для каждого из исследуемых параметров и, в конечном итоге, доказана работоспособность предлагаемого решения при воздействии на него сейсмического воздействия.

В данном разделе произведена оценка цунамистойкости предлагаемого решения. Для этого использовались два нормативных документа: РД 31.33.07-86 «Руководство по расчету воздействия волн цунами на портовые сооружения, акватории и территории. Рекомендации для проектирования» и СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования». Оба нормативных документа позволяют найти значение нагрузки от предполагаемой волны цунами, которое в дальнейшем следует задавать как статическая нагрузка по направлению предполагаемого действия волны цунами. Таким образом, в данной главе, кроме оценки цунамистойкости, выполнено сравнение двух нормативов с точки зрения величины нагрузки от волн цунами на береговые объекты. А также выполнено сравнение влияния волн цунами и сейсмического воздействия 9 баллов.

Расчетная схема для расчета предлагаемого средства цунамизащиты на действия волн цунами принята та же, что и для расчета на сейсмическое воздействие с жестким основанием (рисунок 4.1).

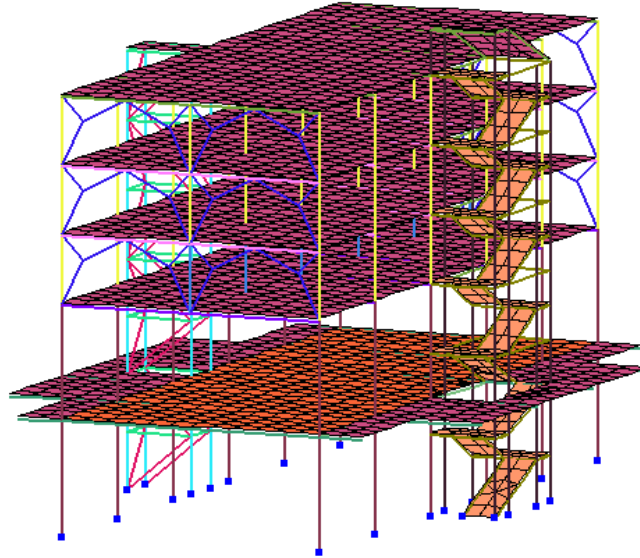


Рисунок 4.1 – Расчетная схема предлагаемого средства цунамизащиты

Выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния жилых зданий, расположенных на уровне земли и на автомобильной эстакады по СП 292.1325800.2017. И доказана эффективность предлагаемого средства цунамизащиты зданий.

В заключении данного исследования был смоделирован накат волны на предлагаемую конструкцию с помощью модуля «Fluid Flow (Fluent)» программного комплекса ANSYS 2021. Доказана необходимость учета вертикальной составляющей наката волны цунами на пролетное строение мостовых сооружений при проектировании, а также предложена методика по определению ее численных значений.

#### **4.2 Определение значения величины нагрузки от волн цунами**

Как было сказано выше, определение величины нагрузки от волн цунами выполнялось с использованием двух методик: по РД 31.33.07-86 [63] и по СП 292.1325800.2017 [72].

В обеих методиках основным параметром, влияющим на величину нагрузки от волны цунами, является высота волны. В настоящем расчетно-теоретическом исследовании приняты величина волны непосредственно у сооружения: 2 м., 4,5 м.,

6 м., 8 м. и 10 м. Величина волны взята непосредственно около сооружения, так как это позволяет не привязываться к конкретным характеристикам населенных пунктов, таким как удаленность объекта от береговой линии, уклон береговой линии, а также максимальные заплески волн. Значения высоты волны выбраны исходя из принятых в предыдущей главе вертикальных размеров конструкции: 4,5 м. – соответствует максимальному значению высоты волны цунами для данной конструкции в соответствии с рекомендациями СП 292.1325800.2017, так как позволяет беспрепятственно проходить волне под дорожным полотном автомобильной эстакады; 10 м. – соответствует расстоянию от уровня земли до низа жилых зданий, что, в свою очередь, является максимальным значением, когда реализуется главное преимущество предлагаемой конструкции относительно традиционных жилых зданий – волна в пределах этой высоты взаимодействует только с опорами и горизонтальными конструкциями дорожного полотна, что обеспечивает высокую проницаемость сооружения. Значения высоты волны в 2 м., 6 м. и 8 м. выбраны произвольно в качестве промежуточных значений. На рисунке 4.2 представлены схемы приложения нагрузки от волны 4,5 м. (а) и 10 м. (б).

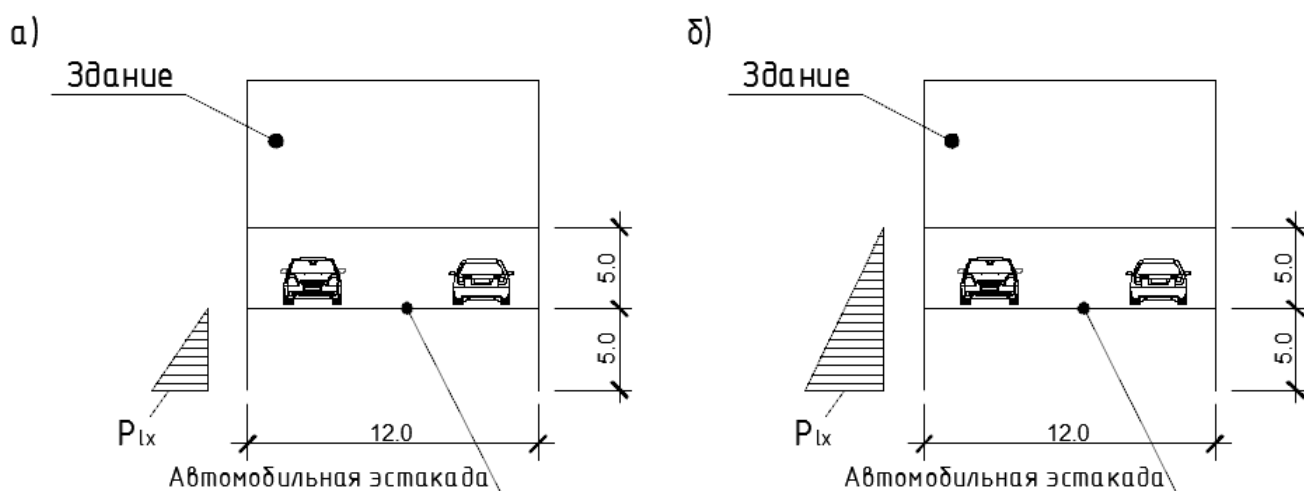


Рисунок 4.2 – Схема приложения нагрузки от волны цунами: а) высотой 4,5 м.; б) высотой 10 м.

Значение давления волны цунами по РД 31.33.07-86 определяется по формуле (4.1):



$$P_l = 1,5 \cdot \rho \cdot g \cdot \eta, \quad (4.1)$$

где  $\rho$  – плотность воды, принимаемая  $1 \text{ т/м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения, принимаемое  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$\eta$  – величина высоты волны непосредственно у сооружения, принимаемая  $4,5 \text{ м.}$  и  $10 \text{ м.}$

Тогда, подставив все значения в формулу (4.1), получим:

для волны высотой  $4,5 \text{ м.}$ :  $P_l = 1,5 \cdot 1 \cdot 9,81 \cdot 4,5 = 66,2 \text{ (кН/м}^2\text{)} = 6,75 \text{ (т/м}^2\text{)}$ ;

для волны высотой  $10 \text{ м.}$ :  $P_l = 1,5 \cdot 1 \cdot 9,81 \cdot 10 = 147,15 \text{ (кН/м}^2\text{)} = 15 \text{ (т/м}^2\text{)}$

Переход от давления к нагрузке на опору эстакады выполняется по формуле (4.2):

$$P_{lx} = P_l \cdot b, \quad (4.2)$$

где  $b$  – ширина опоры, принимаемая  $1,42 \text{ м.}$  (так как для данной конструкции по результатам расчтена конструкции на особое сочетание нагрузок с учетом сейсмического воздействия приняты опоры из металлических труб сечением  $1420 \times 30 \text{ мм.}$ )

Тогда, подставив все значения в формулу (4.2), получим:

для волны высотой  $4,5 \text{ м.}$ :  $P_{lx} = 6,75 \cdot 1,42 = 9,6 \text{ (т/м)}$ ;

для волны высотой  $10 \text{ м.}$ :  $P_{lx} = 15 \cdot 1,42 = 21,3 \text{ (т/м)}$

Удельная нагрузка на лобовую грань сооружения от воздействия бора по СП 292.1325800.2017 определяется по формуле (4.3):

$$P = 0,33 \cdot \rho \cdot C_1^3 \cdot \exp(1,4\mu) \cdot \mu \cdot (3 - \mu) \left(1 - \frac{t}{t_*}\right) \cdot t \cdot K_{\text{пр}} \cdot \sin^3 \varepsilon + 0,5 \cdot \rho \cdot g \cdot C_1^2 \cdot t^2 \cdot \mu \cdot K_{\text{пр}}, \quad (4.3)$$

где  $C_1$  – скорость фронта бора при накате на берег, определяемая по формуле (4.4);

$\mu$  – безразмерный параметр, определяемый по формуле (4.5);

$t_*$  – длительность воздействия фронта бора на береговой объект, определяемая по формуле (4.6);

$t$  – время распространения бора, определяемое по формуле (4.7);

$\varepsilon$  – угол между направлением распространения фронта бора, вкатывающегося на берег, и лобовой гранью сооружения, равный  $90^\circ$ ;

$K_{пр}$  – коэффициент проницаемости грани сооружения, равный отношению заполненной материалом части грани сооружения к её общей части.

Скорость фронта бора при накате на берег  $C_1$ , определяется по формуле (4.4):

$$C_1 = k_6 \cdot \sqrt{g \cdot d_n}, \quad (4.4)$$

где  $k_6$  – коэффициент, равный 2,0 для незастроенного и 1,82 для застроенного участка побережья;

$d_n$  – глубина потока у сооружения

Тогда, подставив все значения в формулу (4.4), получим:

для волны высотой 4,5 м.:  $C_1 = 2 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 4,5} = 13,3$  (м/с)

для волны высотой 10 м.:  $C_1 = 2 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 10} = 19,8$  (м/с)

Безразмерный параметр  $\mu$ , определяется по формуле (4.5):

$$\mu = 1,35 \cdot g^{4/7} \cdot n^{6/7} \cdot C_1^{-2/7}, \quad (4.5)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости откоса, равный  $0,04 \text{ с/м}^{1/3}$  (отсутствие растительности),  $0,067 \text{ с/м}^{1/3}$  (заросший откос) и  $0,08 \text{ с/м}^{1/3}$  (нагромождение камней, валунов).

Тогда, подставив все значения в формулу (4.5), получим:

для волны высотой 4,5 м.:  $\mu = 1,35 \cdot 9,81^{4/7} \cdot 0,04^{6/7} \cdot 13,3^{-2/7} = 0,15$

для волны высотой 10 м.:  $\mu = 1,35 \cdot 9,81^{4/7} \cdot 0,04^{6/7} \cdot 19,8^{-2/7} = 0,13$

Длительность воздействия фронта бора на береговой объект  $t_*$ , определяется по формуле (4.6):

$$t_* = \frac{2C_1}{g}, \quad (4.6)$$

Тогда, подставив все значения в формулу (4.6), получим:

$$\text{для волны высотой 4,5 м.: } t_* = \frac{2 \cdot 13,3}{9,81} = 2,7 \text{ (с)}$$

$$\text{для волны высотой 10 м.: } t_* = \frac{2 \cdot 19,8}{9,81} = 4 \text{ (с)}$$

Время распространения бора  $t$ , определяется по формуле (4.7):

$$t = \frac{0,5 \cdot t_*}{1 - \mu}, \quad (4.7)$$

Тогда, подставив все значения в формулу (4.7), получим:

$$\text{для волны высотой 4,5 м.: } t = \frac{0,5 \cdot 2,7}{1 - 0,15} = 1,6 \text{ (с)}$$

$$\text{для волны высотой 10 м.: } t = \frac{0,5 \cdot 4}{1 - 0,13} = 2,3 \text{ (с)}$$

$$\text{Коэффициент проницаемости грани сооружения } K_{\text{пр}} = \frac{1,42}{6} = 0,24$$

Подставив все значения в формулу (4.3), получим:

$$\begin{aligned} \text{для волны высотой 4,5 м.: } P &= 0,33 \cdot 1 \cdot 13,3^3 \cdot \exp(1,4 \cdot 0,15) \cdot 0,15 \cdot (3 - \\ &0,15) \left(1 - \frac{1,6}{2,7}\right) \cdot 1,6 \cdot 0,24 \cdot \sin^3 90 + 0,5 \cdot 1 \cdot 9,81 \cdot 13,3^2 \cdot 1,6^2 \cdot 0,15 \cdot 0,24 = \\ &14,6 \text{ (т/м)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{для волны высотой 10 м.: } P &= 0,33 \cdot 1 \cdot 19,8^3 \cdot \exp(1,4 \cdot 0,13) \cdot 0,13 \cdot (3 - \\ &0,13) \left(1 - \frac{2,3}{4}\right) \cdot 2,3 \cdot 0,24 \cdot \sin^3 90 + 0,5 \cdot 1 \cdot 9,81 \cdot 19,8^2 \cdot 2,3^2 \cdot 0,13 \cdot 0,24 = \\ &62,6 \text{ (т/м)} \end{aligned}$$

Сосредоточенная нагрузка на опору определяется по формуле (4.8):

$$F_x = P \cdot b \quad (4.8)$$

Тогда, подставив все значения в формулу (4.8), получим:

$$\text{для волны высотой 4,5 м.: } F_x = 14,6 \cdot 1,42 = 20,7 \text{ (т)}$$

$$\text{для волны высотой 10 м.: } F_x = 62,6 \cdot 1,42 = 88,9 \text{ (т)}$$

Для перехода от сосредоточенной нагрузки к распределенной, которая изображена на рисунке 4.2, используем формулу (4.9):

$$P_{lx} = F_x / \left(\frac{1}{2} \cdot d_n\right) \quad (4.9)$$

Тогда, подставив все значения в формулу (4.9), получим:

$$\text{для волны высотой 4,5 м.: } P_{lx} = \frac{20,7}{\left(\frac{1}{2} \cdot 4,5\right)} = 9,2 \text{ (т/м)}$$

$$\text{для волны высотой 10 м.: } P_{lx} = \frac{88,9}{\left(\frac{1}{2} \cdot 10\right)} = 17,8 \text{ (т/м)}$$

Аналогичным образом были посчитаны величины нагрузок от волн цунами высотой 2, 6 и 8 метров.

Как видно из формул (4.1) и (4.3), единственным параметром в обоих нормативных документах, существенно влияющим на величину нагрузки от волн цунами, является ее высота. Так как ускорение свободного падения и плотность воды постоянны. В формуле (4.3) (определение нагрузки по СП 292.1325800.2017) на величину нагрузки от волны цунами также влияют: скорость волны, время ее распространения, безразмерный параметр  $\mu$ , угол между направлением распространения фронта бора и лобовой гранью сооружения, а также коэффициент проницаемости грани сооружения. Однако, скорость волны и время ее распространения зависят только от высоты волны (так как ускорение свободного падения и плотность воды постоянны), безразмерный параметр  $\mu$  также зависит от высоты волны и незначительно зависит от шероховатости откоса, а такие параметры как угол между направлением распространения фронта бора и лобовой гранью сооружения и коэффициент проницаемости грани сооружения являются характеристикой непосредственно сооружения. Таким образом, исследование влияния различных волн цунами сводится к исследованию влияния высоты волны на поведение сооружения.

Как видим из полученных по формулам (4.2) и (4.9) результатов, нагрузка, рассчитанная по РД 31.33.07-86 больше, чем по СП 292.1325800.2017, однако данное утверждение верно лишь для данной конструкции. Дело в том, что по формулам из СП 292.1325800.2017 нагрузка напрямую зависит от коэффициента проницаемости грани сооружения  $K_{пр}$ , который для предлагаемого средства цунамизащиты имеет маленькое значения. Если бы пространство между опорами

сооружения было заполнено сплошным материалом ( $K_{пр} = 1$ ), то значение нагрузки от волны цунами было бы примерно в 4,2 раза больше. [87]

### 4.3 Результаты расчета

Сравнение воздействия от действия волн цунами различной высоты с землетрясением уровня ПЗ 9 баллов проводилось по максимальным горизонтальным перемещениям конструкции и возникающих в опорах усилиях. Результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнение воздействия волн цунами и сейсмической нагрузки

Воздействие	Макс. перемещение покрытия здания, мм	Макс. продольное усилие N, т	Макс. поперечная сила Qy, т	Макс. момент My, т*м	Макс. момент Mz, т*м
Цунами 2 м. (по РД)	0,03	0,1	11,3	1,4	8,4
Цунами 2 м. (по СП)	0,02	0,08	8	1	5,9
Цунами 4,5 м. (по РД)	0,8	1,78	72,9	13,1	102
Цунами 4,5 м. (по СП)	0,7	1,73	70,7	12,7	99
Цунами 6 м. (по РД)	2,2	5,5	123	18,8	210
Цунами 6 м. (по СП)	1,4	3,3	75,3	13,5	128
Цунами 8 м. (по РД)	6,5	16,5	226	27,8	467
Цунами 8 м. (по СП)	4,1	10,2	142	17,5	294
Цунами 10 м. (по РД)	12,9	33,8	337	37,6	775
Цунами 10 м. (по СП)	10,3	27	269	30,1	620
Сейсмика 9 баллов	63,7	210	190	15,9	889

Как видно из таблицы 4.1, для предлагаемого средства цунамизащиты зданий, продольная сила в опорах и горизонтальные перемещения больше от сейсмического 9-балльного воздействия, чем от волны цунами высотой, что связаны с высокой проницаемостью сооружения, так как большая часть волны цунами проходит сооружение «насквозь». При этом поперечная сила и моменты, возникающие от волны цунами 10 м. больше, чем от сейсмического воздействия. Большие значения поперечной силы и моментов, возникающих в опорах объясняется тем, что при линейно-спектральной методике сейсмическое воздействие задается каждому элементу, имеющему массу (что распределяет

нагрузку по всей высоте сооружения), а нагрузка от волн цунами сосредоточена непосредственно на опорах, жесткозащемленных в грунт.

По данным таблицы 4.1 были построены графики влияния высоты волны цунами на горизонтальные перемещения конструкции и возникающие в опорах продольные усилия. Данные графики представлены на рисунке 4.4.

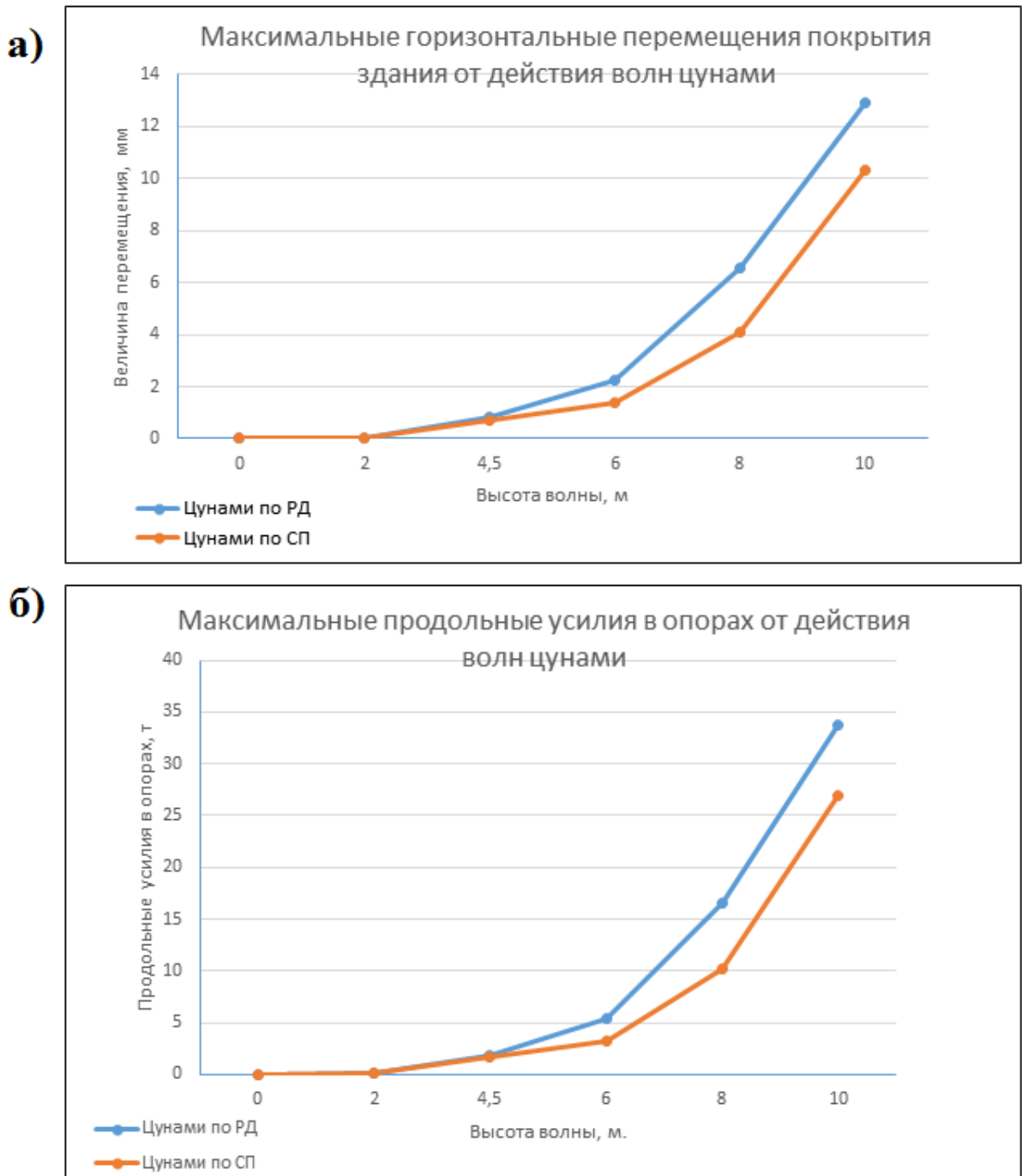


Рисунок 4.4 – Графики влияния высоты волны цунами на горизонтальные перемещения конструкции (а) и возникающие в опорах продольные усилия (б)

Следующим этапом данного исследования является обоснования отсутствия необходимости анкеровки предлагаемого сооружения. В настоящее время достаточно большое внимание уделяется процессу размыва грунтов при воздействии волн цунами [6], [40], [93], [94], [101], [102], [112], [113], [115]. Несмотря на то что нет точного способа определить изменение свойств грунта при действии цунами, существует ряд рекомендаций, позволяющих избежать негативных последствий. Среди этих рекомендаций инъекционное укрепление грунтов основания, создание дренажных систем, а также анкеровка секций сооружения, которая нужна для нивелирования выдергивающих усилий при накате волны цунами. Чтобы определить существует ли необходимость в анкеровки предлагаемой конструкции, были собраны нагрузки на обрез фундамента от особого сочетания нагрузок с учетом расчетной волны высотой 4,5 метра (рисунок 4.5). В этом особом сочетании нагрузок, в соответствии с СП 292.1325800.2017, постоянные вертикальные нагрузки учитывают с понижающим коэффициентом 0,9, а временные вертикальные нагрузки - с понижающим коэффициентом 0,8 от их нормативных значений.

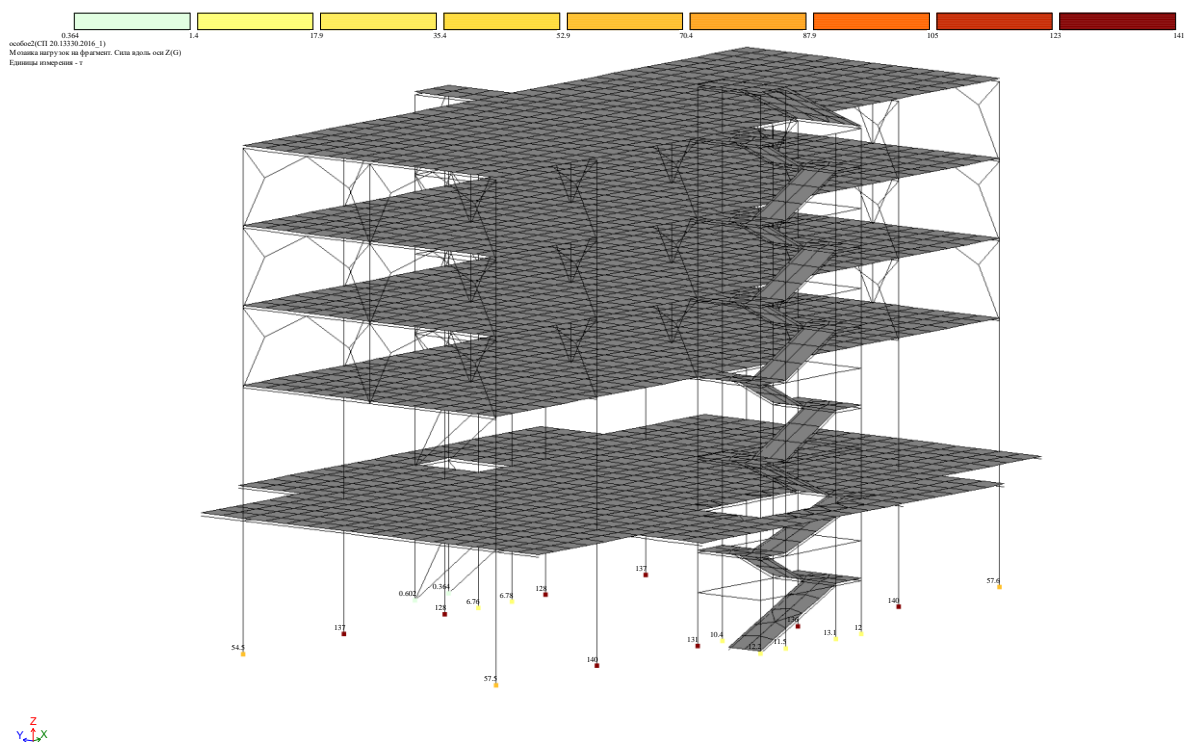


Рисунок 4.5 – Нагрузки, приходящие на обрез фундамента, с учетом воздействия цунами

Как видно из рисунка 4.5, ни один фундамент предлагаемой конструкции не испытывает выдергивающих усилий и, соответственно, анкеровка конструкции в данном случае не требуется. Это связано в основном с двумя факторами. Во-первых, у предлагаемой конструкции высокая проницаемость и, как следствие, волна не оказывает большого воздействия. Во-вторых, предлагаемая конструкция имеет достаточную ширину, чтобы противостоять опрокидывающему воздействию волны.

В заключении данного исследования была выполнена проверка принятых в предыдущей главе сечений на особое сочетание нагрузок (с учетом нагрузки от волны цунами высотой 10 м. (нагрузка определена по РД 31.33.07-86)). Результаты проверки принятых сечений представлены на рисунке 4.6.

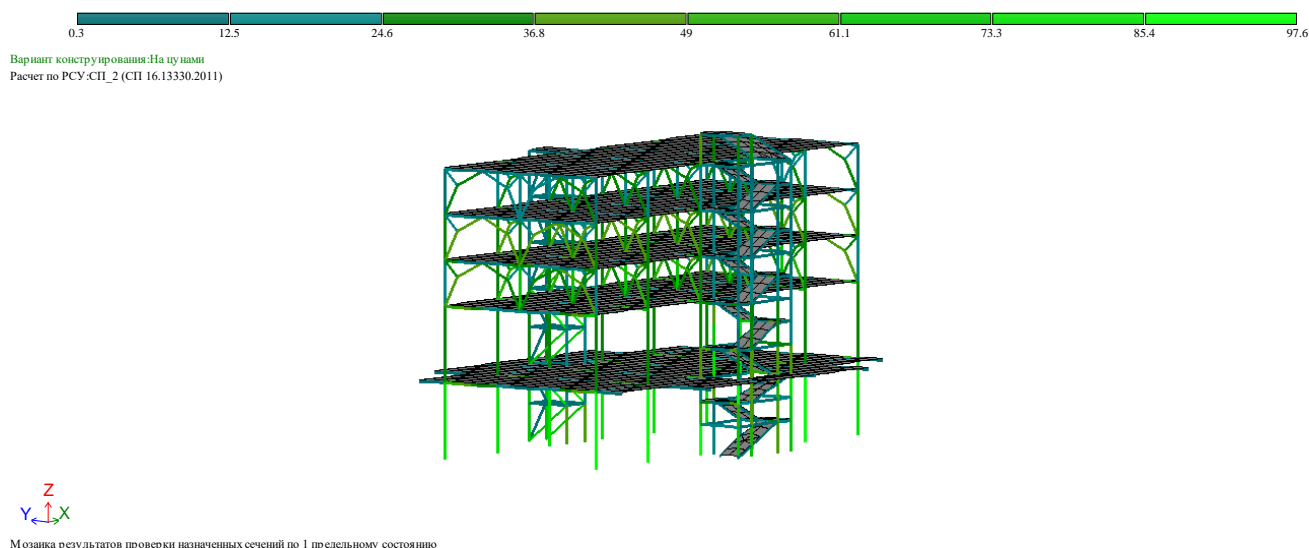


Рисунок 4.6 – Процент использования материала

Как видно из рисунка 4.6, максимальный процент использования материала при расчете на особое сочетание усилий с участием волны цунами высотой 10 м. не превышает 100%.

#### 4.4 Сравнение воздействия цунами на здание, расположенное на уровне земли и на эстакаде

Как уже многократно было сказано, предлагаемое средство цунамизащиты зданий подразумевает, что эти здания расположены на автомобильной эстакаде.



Данное решение должно снизить нагрузку на всё сооружение, так как волна цунами будет проходить «насквозь» оказывая наименьшее влияние так как значительно снижается площадь воздействия волны.

В данном пункте описано как влияет такое решение цунамизащиты на напряженно-деформированное состояние самих зданий. Данное исследование проводится в два этапа. На первом этапе выполняется расчет здания, стоящего на земле. Данный расчет выполняется по методикам, которые предложены в РД 31.33.07-86 и в СП 292.1325800.2017. Цель первого этапа – определить как влияет выбор методики на напряженно-деформированное состояние рассматриваемых конструкций. Второй этап подразумевает сравнение между собой напряженно-деформированного состояния зданий, расположенных на уровне земли, на эстакаде и здания с открытым нижним этажом. Цель второго этапа исследования – показать эффект от применения идеи свободного пространства в целом и от эстакады в частности. Для сравнения использовались здания из исходной расчетной модели (рисунок 4.1), высота которых без конструкции автомобильной эстакады составляет 9 м. (рисунок 4.7 (а)), а также здание с открытым нижним этажом (рисунок 4.7 (б)) с высотой свободного пространства 5 м. Расчет всех вариантов сооружения производился на действие волны цунами высотой 2, 4, 6, 8 и 9 метров.

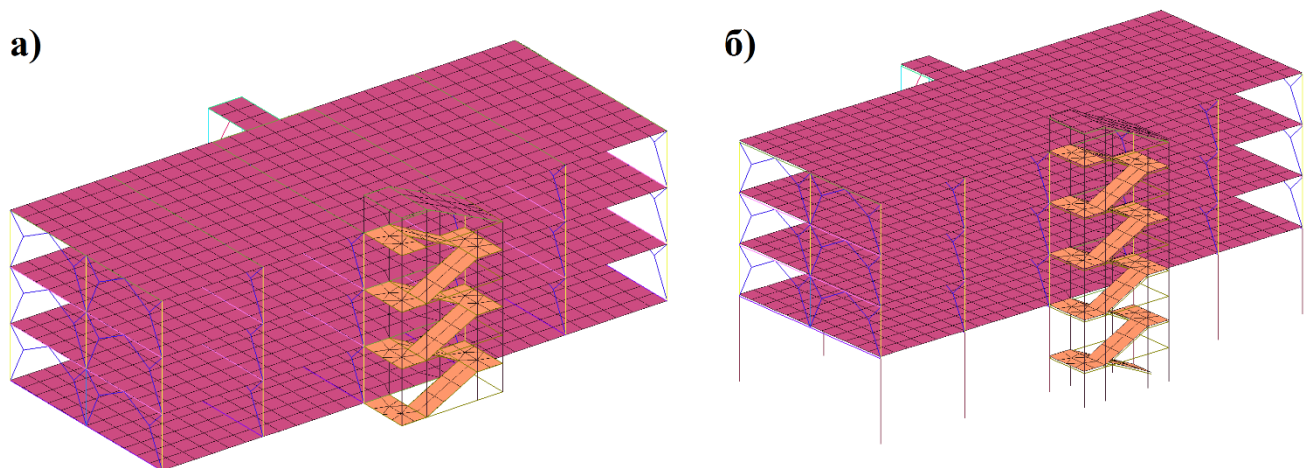


Рисунок 4.7 – Расчетные схемы: а) отдельно стоящее зданий; б) здание с открытым нижним этажом

Нагрузки от волн цунами определялись по формулам (4.1) и (4.3) При этом параметры, входящие в формулу (4.1) никак не изменились по сравнению с первоначальным исследованием, а в формуле (4.3) изменилось значение коэффициента проницаемости  $K_{пр}$ , который для непроницаемых сооружений равен 1. Прикладывались полученные нагрузки к колоннам здания в соответствии с их грузовой площадью.

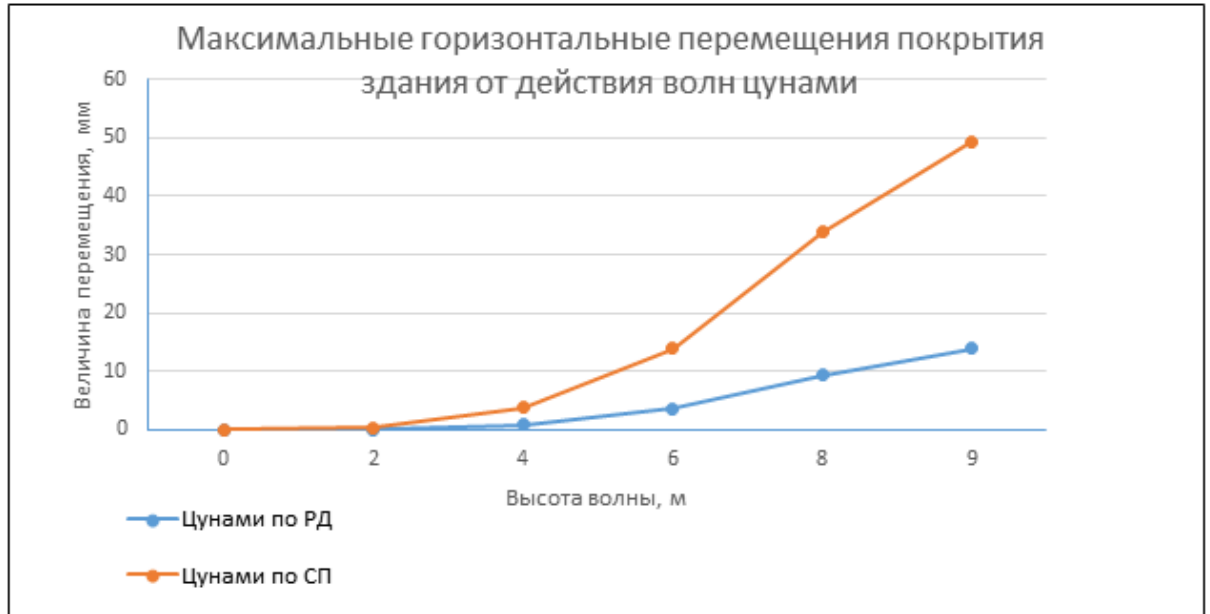
Результаты всех расчетов сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Влияние воздействия волн цунами различной высоты

Методика	Высота волны, м	Макс. перемещение покрытия здания, мм	Макс. продольное усилие N, т	Макс. поперечная сила Qy, т	Макс. момент My, т*м	Макс. момент Mz, т*м
РД 31.33.07-86	2	0,08	0,76	21,9	0,05	8,85
	4	0,92	5,14	64,9	0,69	34,7
	6	3,66	7,9	110	2,06	65
	8	9,38	10,5	157	3,6	99,4
	9	13,9	14,7	181	4,39	119
СП 292.1325800.2017	2	0,36	3,53	101	0,21	40,9
	4	3,74	21	265	2,82	142
	6	13,9	30	417	7,82	247
	8	33,9	38,1	566	13	359
	9	49,4	52,1	641	15,5	420

По данным таблицы 4.2 были построены графики зависимости высоты волны на горизонтальные перемещения зданий и возникающие в колоннах продольные усилия. Данные графики представлены на рисунке 4.8.

а)



б)

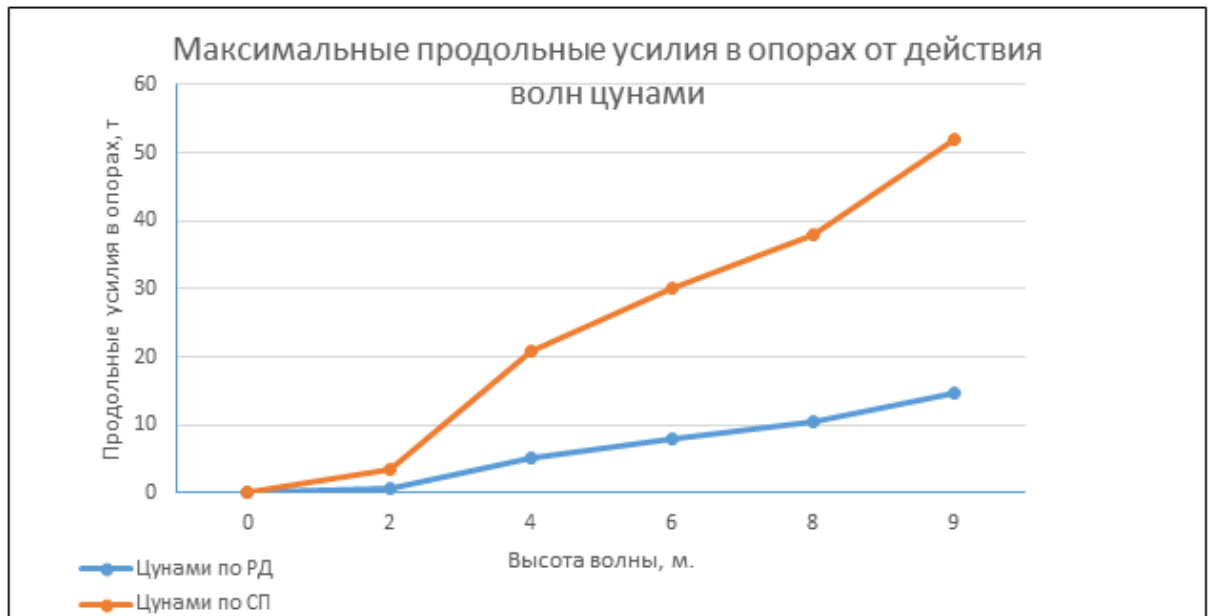


Рисунок 4.8 – Графики влияния высоты волны на горизонтальные перемещения здания (а) и возникающие в колоннах продольные усилия (б)

Как видно из графиков, представленных на рисунке 4.8, деформации и усилия в конструкциях, возникающие при расчете по методике, представленной в СП 292.1325800.2017, значительно превышают эти же параметры при расчете по методике, представленной в РД 31.33.07-86. Это связано с тем, что нагрузки на  $1 \text{ м}^2$  конструкции, определенные по СП 292.1325800.2017 примерно в 4 раза больше, чем нагрузки на  $1 \text{ м}^2$  конструкции, определенные по РД 31.33.07-86.

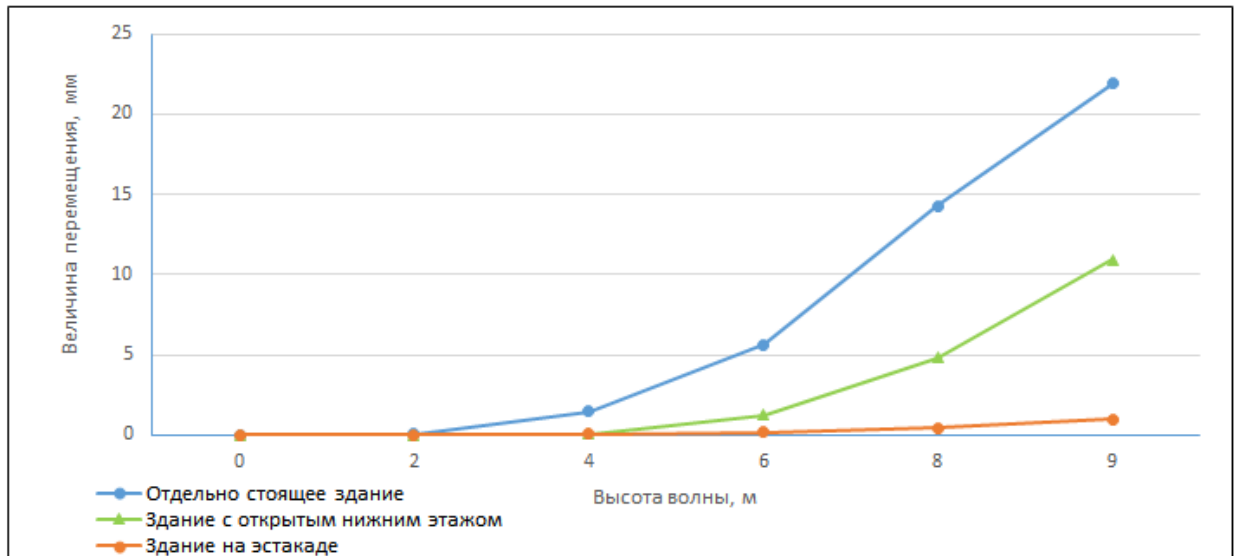
Следующий этап, как было сказано выше, подразумевает сравнение напряженно-деформированного состояния зданий, расположенных на уровне земли (рисунок 4.7) и на эстакаде (рисунок 4.1). Расчет производился по методике, представленной в СП 292.1325800.2017. Результаты расчета представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Влияние воздействия волн цунами различной высоты

Вариант размещения здания	Высота волны, м	Макс. перемещение покрытия здания, мм	Продольное усилие N, т	Макс. поперечная сила Qy, т	Макс. момент My, т*м	Макс. момент Mz, т*м
Отдельно стоящее здание (на уровне земли)	2	0,07	1,48	3,11	4	2,5
	4	1,49	12,4	14,7	13,3	18
	6	5,65	18,6	28,1	23,7	28,6
	8	14,3	27,8	38,2	26	44,8
	9	21,9	31,2	42,3	27,6	52,8
Здание с открытым нижним этажом	2	0	0,03	0,01	0,01	0,01
	4	0,08	0,47	0,26	0,12	0,45
	6	1,25	3,72	6,24	4,74	6,50
	8	4,82	9,59	12,73	8,39	15,45
	9	10,95	12,48	22,26	13,80	27,79
На автомобильной эстакаде	2	0	0,03	0,01	0,01	0,01
	4	0,08	0,47	0,26	0,12	0,45
	6	0,16	0,47	0,52	0,12	0,91
	8	0,47	0,94	1,59	0,25	2,86
	9	1	2,21	4,32	0,64	7,83

По данным таблицы 4.3 были построены графики зависимости высоты волны на горизонтальные перемещения зданий и возникающие в колоннах продольные усилия. Данные графики представлены на рисунке 4.9.

а)



б)

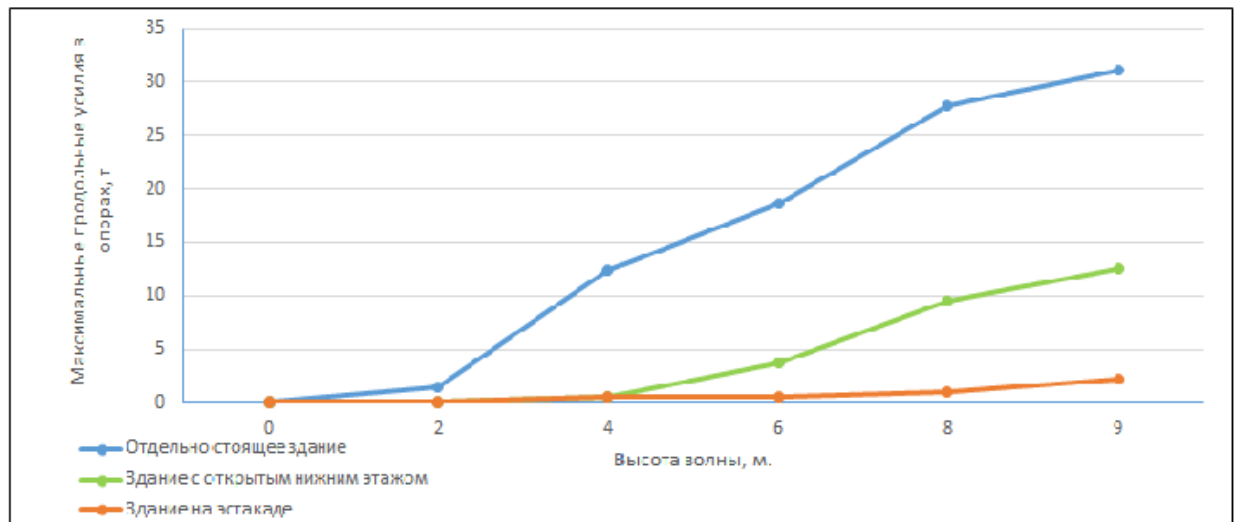


Рисунок 4.9 – Графики влияния высоты волны на горизонтальные перемещения здания (а) и возникающие в колоннах продольные усилия (б)

Как видно из графиков, представленных на рисунке 4.9, и таблицы 4.5, размещение зданий на автомобильной эстакаде значительно снижает как деформации здания, так и усилия, возникающие в его несущих элементах. Увеличение возникающих усилий приводит к тому, что принятых ранее сечений недостаточно. На рисунке 4.10 представлены результаты проверки принятых ранее сечений на особое сочетание нагрузок (включающее воздействие волны цунами высотой 9 м. нагрузка от которой вычислена по СП 292.1325800.2017).

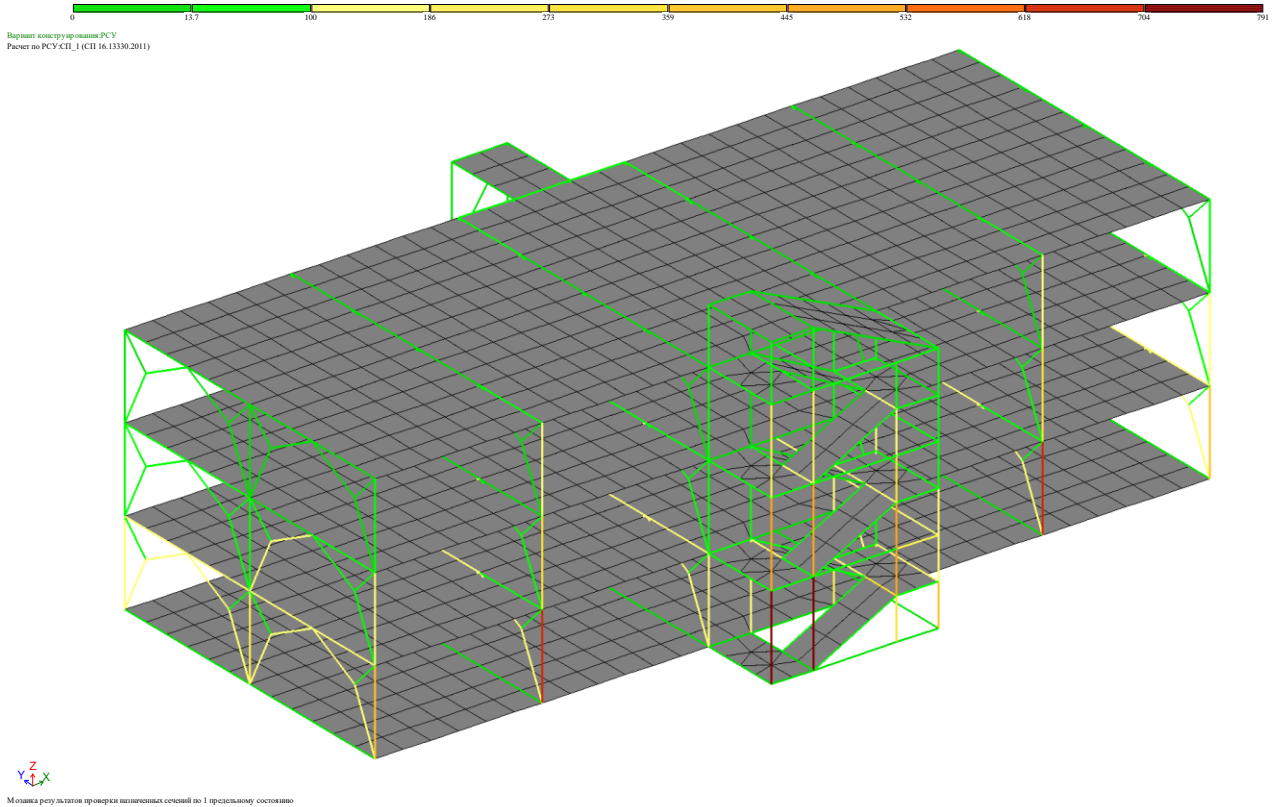


Рисунок 4.10 – Процент использования материала отдельно стоящего здания

Как видно из рисунка 4.10, некоторые элементы здания не проходят по прочности. При этом, если здание расположено на автомобильной эстакаде, то все его элементы проходят проверку по прочности (рисунок 4.6). Кроме того, расположение зданий на эстакаде практически исключает попадание воды и обломков внутрь помещений через окна и двери, что дополнительно повышает безопасность населения и имущества. Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование автомобильной эстакады в качестве средства цунамизащиты зданий оправдано и полностью выполняет заложенные функции безопасности при воздействии волны цунами.

#### **4.5 Проверка предлагаемого решения цунамизащиты зданий на защиту от прогрессирующего обрушения с учетом волны цунами**

В предыдущей главе уже была выполнена проверка предлагаемого средства цунамизащиты на прогрессирующее обрушение. Стоит напомнить, что предыдущая проверка была выполнена в соответствии с рекомендациями,

представленными в СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» [73] на действие нормативных постоянных и длительных нагрузок.

В настоящей главе представлены результаты проверки сечений на действие нормативных постоянных, длительных нагрузок и с учетом нагрузки от цунами высотой 4,5 метров. Такое сочетание нагрузок объясняется следующим сценарием: в результате сейсмической активности, превышающей предельное значение, была разрушена одна из опор, но следом после землетрясения образовалось цунами.

Результаты проверки металлических конструкций на расчет от прогрессирующего обрушения при выключении из работы центральной опоры представлены на рисунке 4.11.

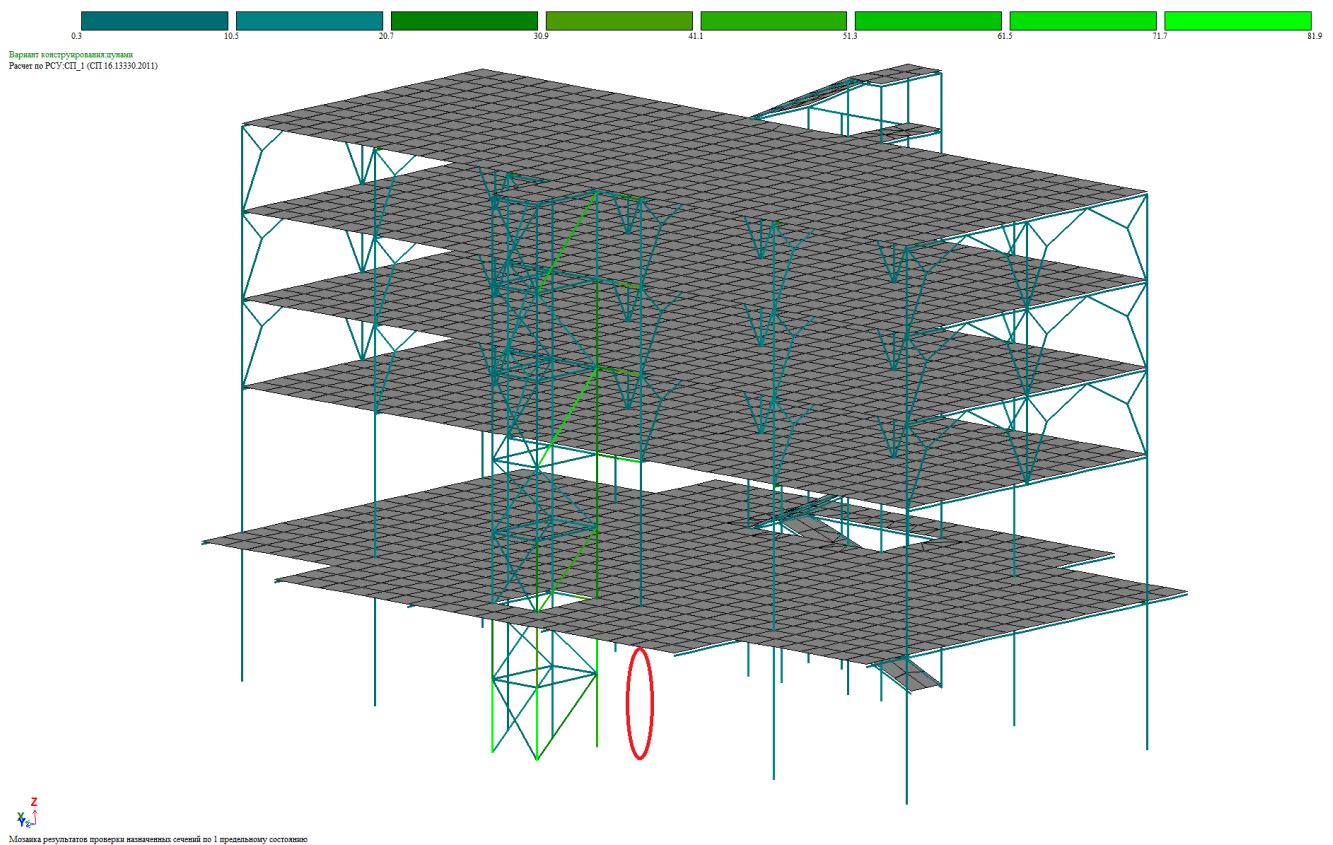


Рисунок 4.11 – Результаты проверки принятых сечений при расчете от прогрессирующего обрушения (при выключении из работы центральной опоры)

Результаты проверки металлических конструкций на расчет от прогрессирующего обрушения при выключении из работы крайней опоры представлены на рисунке 4.12.

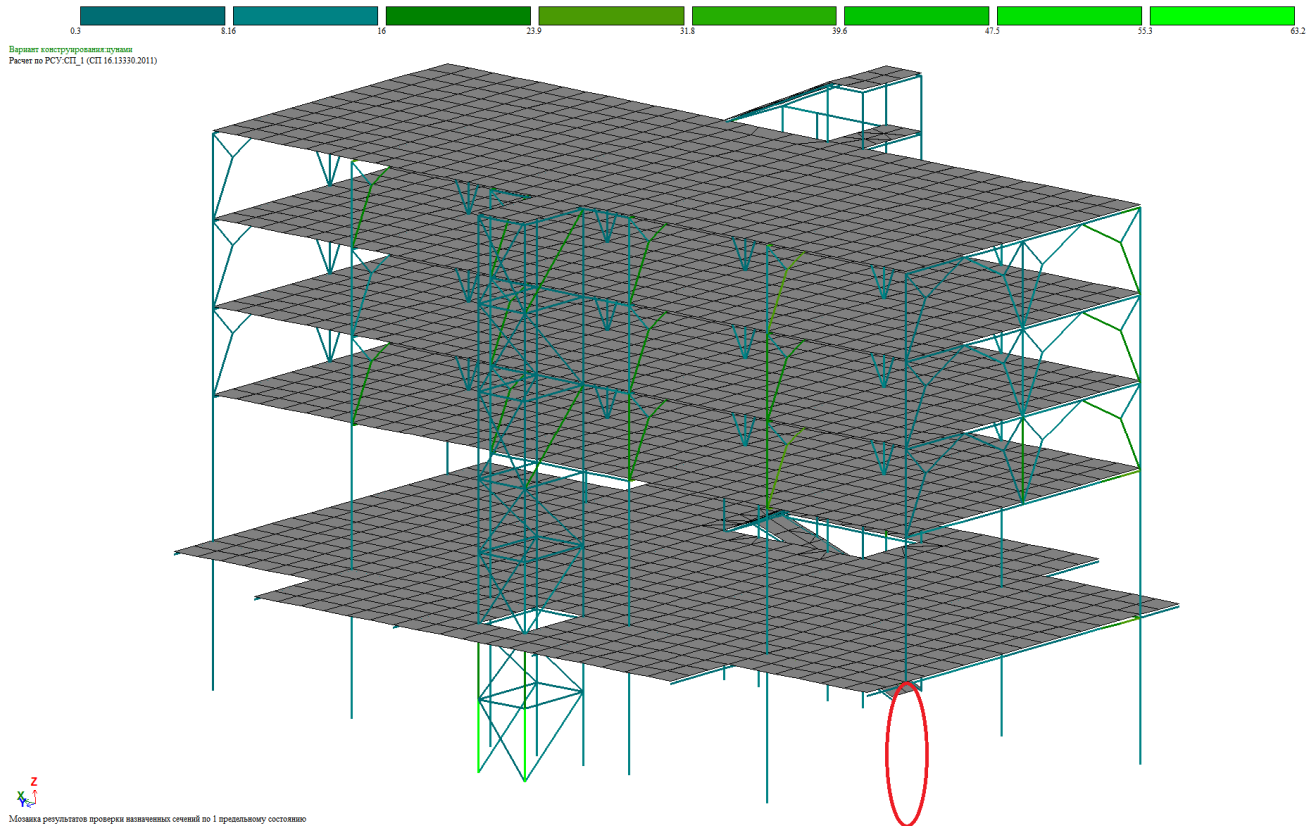


Рисунок 4.12 – Результаты проверки принятых сечений при расчете от прогрессирующего обрушения (при выключении из работы крайней опоры)

Как видно из рисунков 4.11 и 4.12, принятые при проектировании сечения металлических элементов с запасом обеспечивают сохранность конструкции при выключении из работы одной из опор в том числе и с учетом волны цунами высотой 4,5 м.

#### 4.6 Моделирование наката волны в расчетном комплексе ANSYS 2021

Как показывают исследования, приведенные выше, предлагаемая конструкция за счет своей высокой проницаемости способна выдержать нагрузку от волны цунами, высота которой превышает высоту пролетного строения. Но в представленных исследованиях учитывалась только горизонтальная составляющая



нагрузки от волны цунами несмотря на то, что в случае, когда волна цунами выше пролетного строения, часть этой волны в какой-то момент времени окажется на пролетном строении и будет оказывать вертикальное давление на него. Это давление можно назвать вертикальной составляющей нагрузки от волны цунами и, согласно пункту 5.7.4 СП 292.1325800.2017, ее можно учитывать при необходимости, но конкретных рекомендаций по ее определению нет [72].

Для определения величины этой нагрузки на мостовое сооружение было проведено исследование в модуле «Fluid Flow (Fluent)» программного комплекса ANSYS 2021. Для этого была смоделирована предлагаемая конструкция в соответствии со всеми принятыми сечениями и размерами, а также расчетная область вокруг нее размерами 100x37x19,5 м. Расчетная модель представлена на рисунке 4.13.

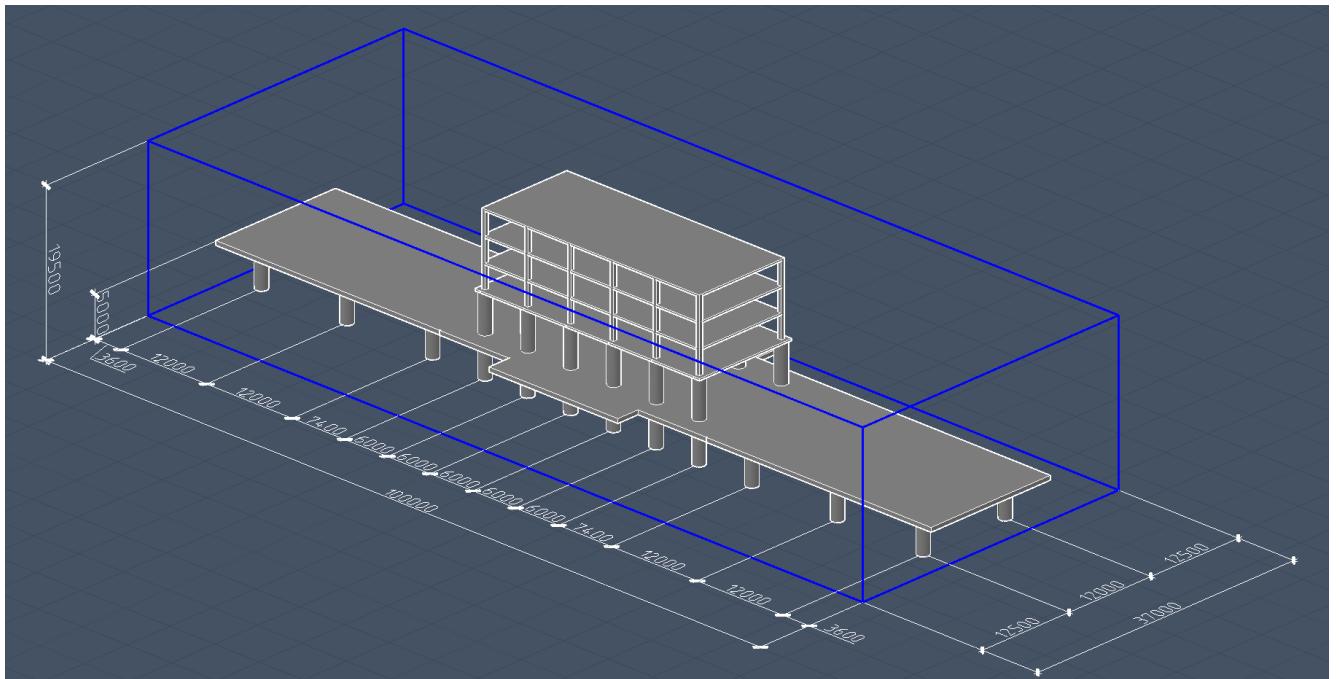


Рисунок 4.13 – Расчетная модель

Далее данная расчетная модель была разбита на конечные элементы размерами 0,35-3 метров с учащением сетки у граней (рисунок 4.14).

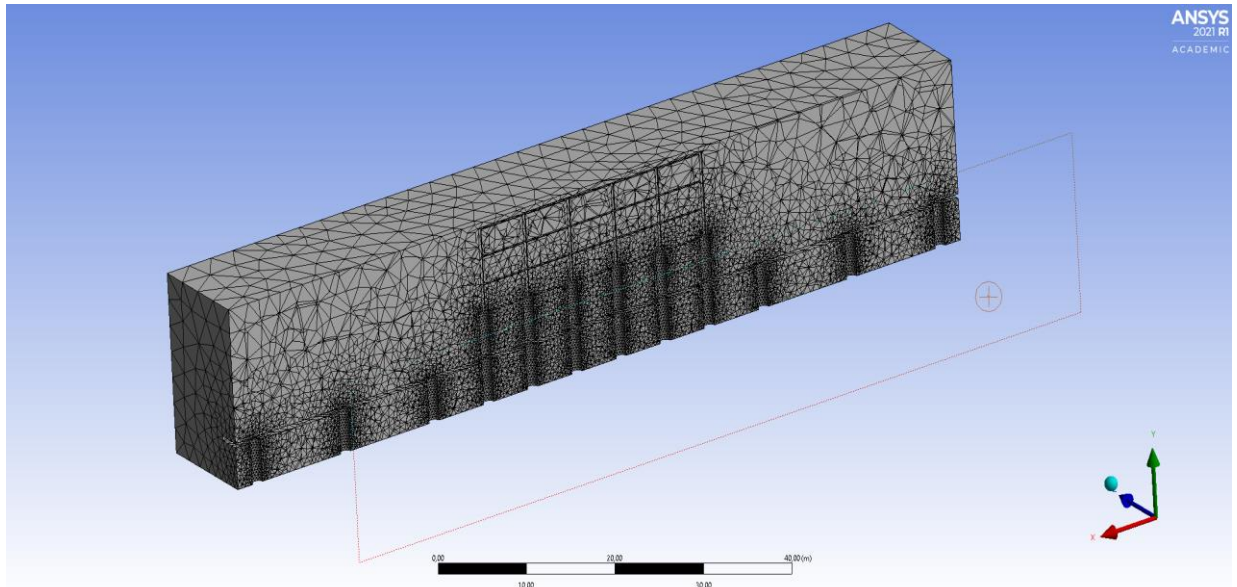


Рисунок 4.14 – Генерация сетки конечных элементов

На данное сооружение был смоделирован накат волн различной высоты. Были приняты волны высотой 6, 7, 8, 9 и 10 метров. Скорость этих волн были приняты как при расчете давления от цунами по СП 292.1325800.2017 (формула (4.4)), модель распространения волн принята «Short Gravity Waves». Описанные выше параметры являются изначальными установками входной грани – грани расчетной области от которой начинается генерация волн (синяя грань на рисунке 4.15). Кроме этой грани, в расчетной области были определены и другие объекты, которым также необходимо было задать граничные условия и начальные параметры.

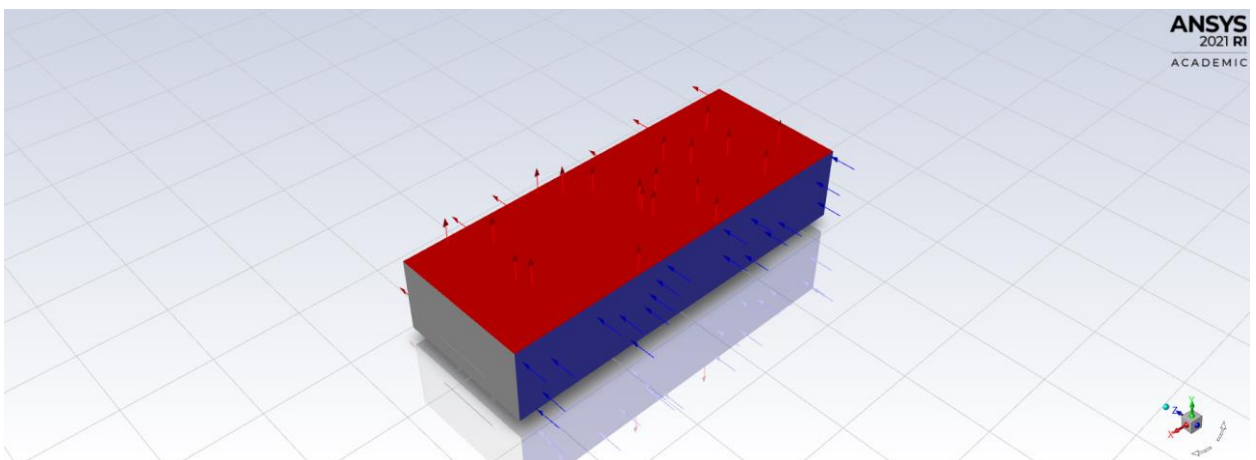


Рисунок 4.15 – Граничные параметры расчетной области

Как видно из рисунка 4.15, у расчетной области есть одна входная грань (синяя) и две выходные (красные), которые были заданы как открытые без дополнительного давления. Это сделано, чтобы сгенерированные на входной грани волны могли свободно выходить через грани выхода. Боковые грани (на рисунке 4.15 они серые) заданы как стационарные стенки со значением «No Slip», чтобы исключить потерю энергии волны при взаимодействии с ними, такие же параметры заданы и сооружению (фрагменту автомобильной эстакады со зданиями). Практически такие же параметры заданы и нижней грани расчетной модели, моделирующей поверхность земли, с той лишь разницей, что для земли дополнительно были заданы высота шероховатости (0,2 м) и постоянная шероховатость (0,5), моделирующий взаимодействие волны с поверхностью земли, аналогично параметру  $n$  из формулы (4.5).

Кроме рассмотренных выше граничных условий также были заданы и параметры самого объема расчетной области. Основными из этих параметров являются наличие гравитации ( $9,81 \text{ м/с}^2$ ) и многофазность модели. Многофазность подразумевает то, что в расчетной области встречаются несколько различных веществ (в данном случае воздух и жидкость). Для каждого вещества установлены стандартные параметры плотности и вязкости, взятые из библиотеки программы Ansys по умолчанию.

Получившаяся картина наката волны высотой 10 метров на сооружение представлено на рисунке 4.16.

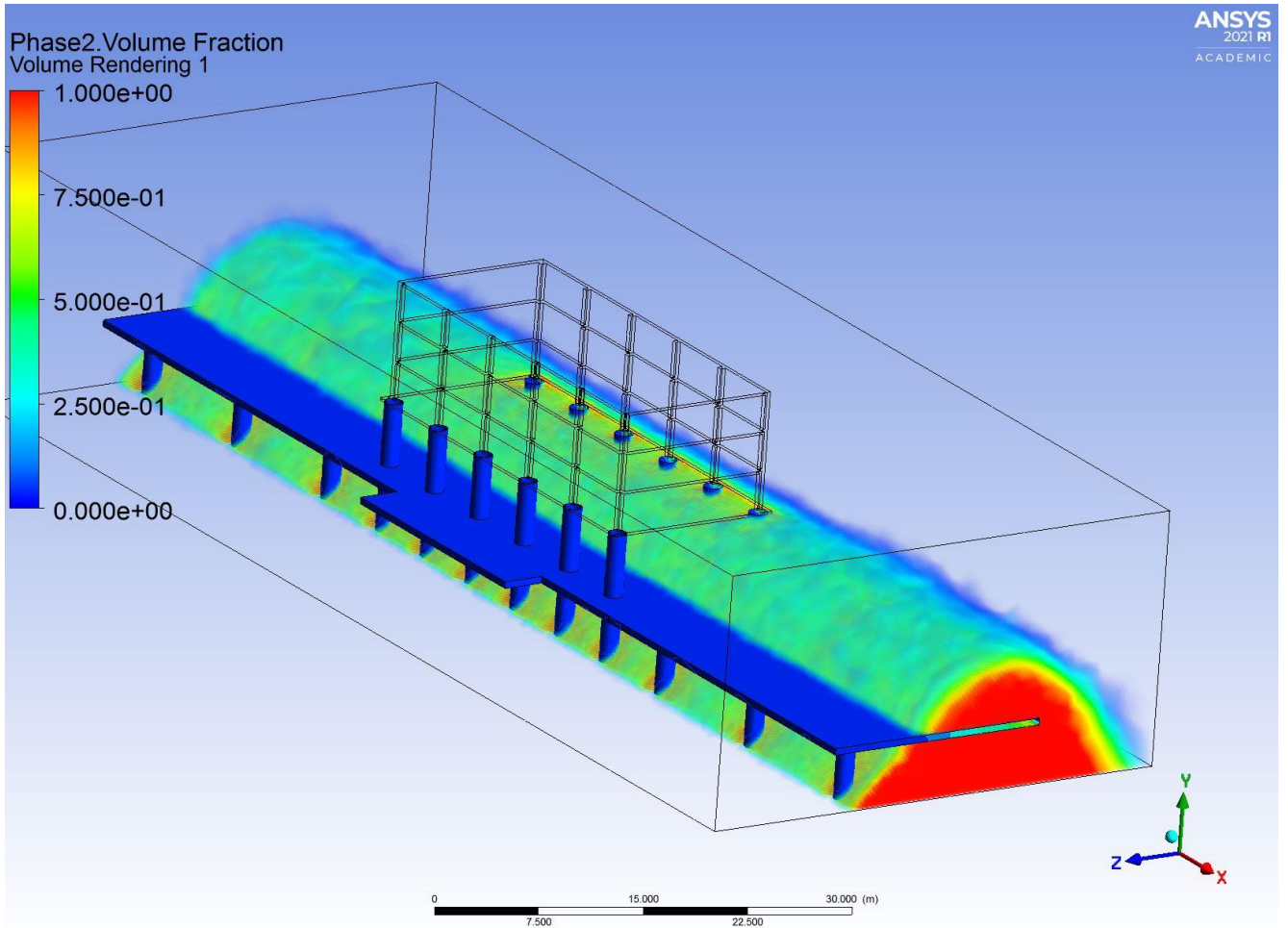


Рисунок 4.16 – Накат волны на сооружение

Как видно из рисунка 4.16, в случае, когда высота волны превышает высоту сооружения, часть волны оказывается на пролетном строении моста и должно оказывать вертикальное давление на него. Это подтверждается картиной распределения давлений от волны на сооружение, которая представлена на рисунке 4.17.

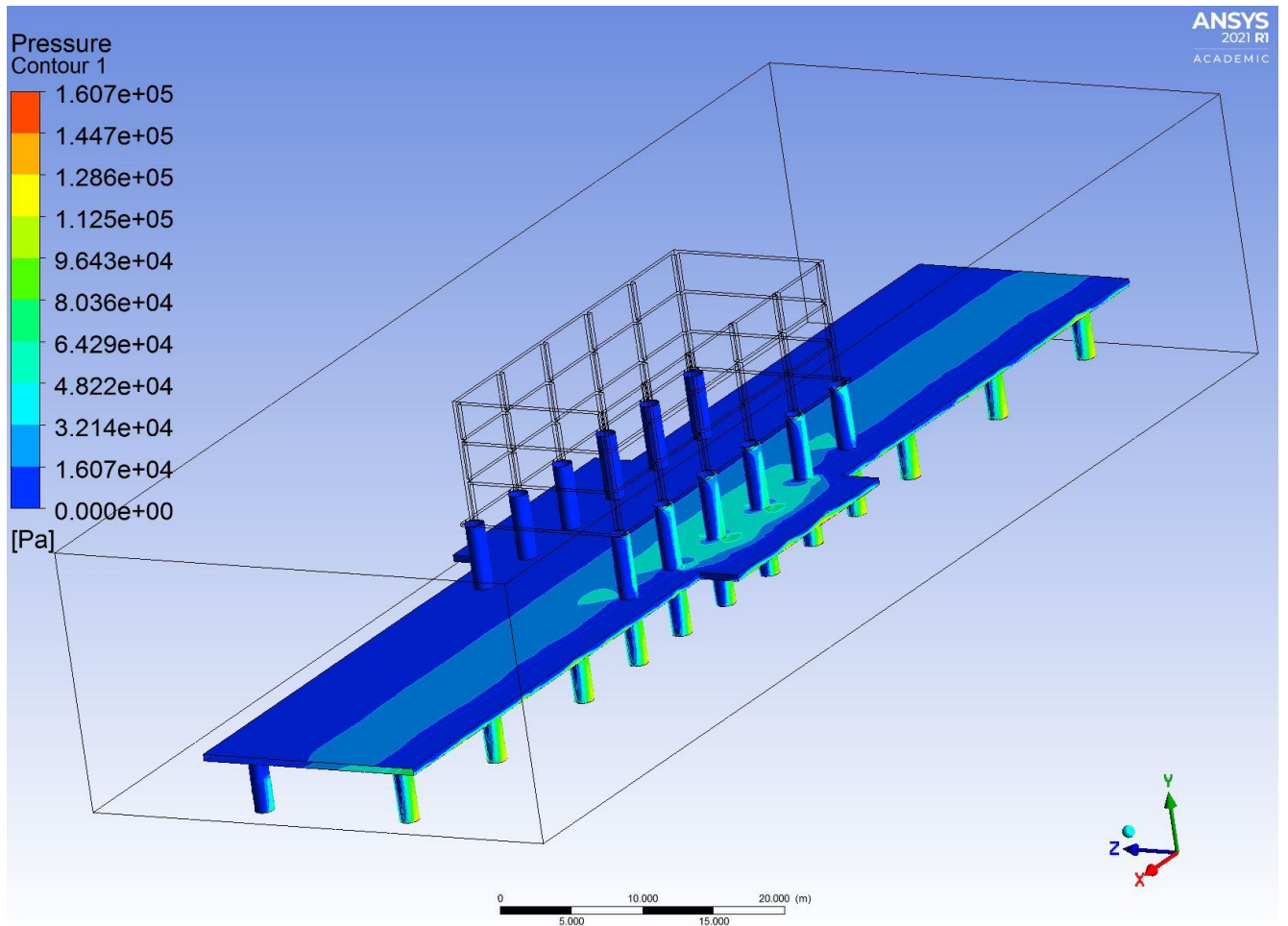


Рисунок 4.17 – Давление волны на сооружение

Как видно из рисунка 4.17, максимальное давление испытывают на себе опоры в нижней точке. При этом сам пролет эстакады также испытывает на себе давление со стороны волны. И подобная картина распределения давления характерна для всех рассмотренных волн. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчетов

Высота волны, м	Превышение волны над пролетным строением ( $H_B$ ), м	Максимальное давление на сооружение ( $p$ ), Па	Давление на пролет моста ( $p_B$ ), Па	Отношение давления на пролет к максимальному значению
6	1	64540	19360	0,3
7	2	93130	27940	0,3
8	3	103100	30920	0,3
9	4	144000	50400	0,35
10	5	160700	64290	0,4

На рисунке 4.18 представлен график зависимости между отношением давления на пролет к максимальному значению и превышением волны над пролетным строением.

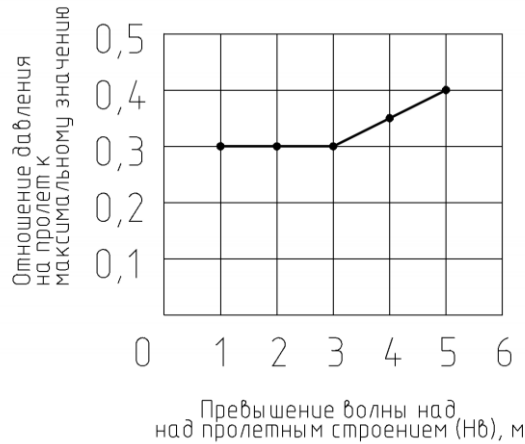


Рисунок 4.18 – График зависимости между отношением давления на пролет к максимальному значению и превышением волны над пролетным строением

Как видно из рисунка 4.18 и таблицы 4.6, вертикальное давление от волны составляет минимум 30% от максимального давления, и, следовательно, его необходимо учитывать при расчете пролетного строения на волну цунами высота которой превышает высоту сооружения.

Предлагается учитывать вертикальное давление от волны цунами по формуле (4.10):

$$p_v = p \cdot k_v, \quad (4.10)$$

где  $p_v$  – вертикальное давление на пролетную конструкцию;

$p$  – максимальное горизонтальное давление на сооружение;

$k_v$  – коэффициент перехода, определяемый по графику на рисунке 4.19.

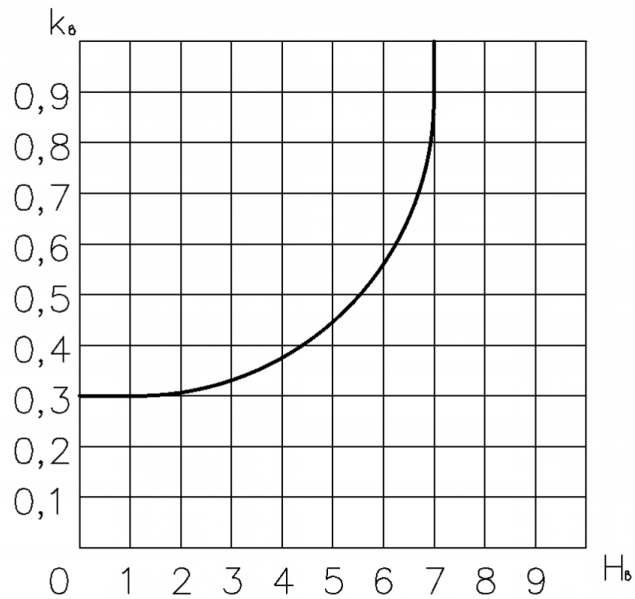


Рисунок 4.19 – Зависимость  $k_b$  от превышения высоты волны цунами над высотой сооружения ( $H_b$ )

График на рисунке 4.19 получен путем аппроксимации графика из рисунка 4.18. В случае, если высота волны превышает высоту сооружения более чем на 7 метров ( $H_b > 7$  м), коэффициент перехода следует принимать равным 1 ( $k_b = 1$ ). [116]

#### 4.7 Выводы по главе

1. Произведена оценка цунамистойкости предлагаемого решения с использованием двух нормативных документов: РД 31.33.07-86 «Руководство по расчету воздействия волн цунами на портовые сооружения, акватории и территории. Рекомендации для проектирования» и СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования». Доказана безопасность размещения жилых зданий на конструкции автомобильной эстакады в условиях действия волны цунами.

2. Установлено, что при расчете проницаемых сооружений с коэффициентом проницаемости  $0 < K_{пр} < 0,5$  нагрузки от волны цунами, определяемые по методикам из РД 31.33.07-86 и СП 292.1325800.2017 отличаются

незначительно. Однако, при расчете непроницаемых сооружений ( $K_{пр} = 1$ ) имеются большие расхождения между величинами нагрузки, определяемой по данным нормативным документам.

3. Выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния жилых зданий, расположенных на уровне земли и на автомобильной эстакаде. Доказана эффективность предлагаемого средства цунамизащиты зданий.

4. С помощью расчета от прогрессирующего обрушения с учетом действия волны цунами доказано, что предлагаемая конструкция не обрушится даже при выключении из работы одной из опор.

5. Смоделирован накат волны на предлагаемую конструкцию. Установлено, что в случаях, когда высота волны превышает высоту мостового сооружения (эстакады), часть волны оказывает вертикальное воздействие на пролетное строение. Это воздействие имеет большое значение и, следовательно, его необходимо учитывать при проектировании подобных сооружений.

6. По данным моделирования получена зависимость между вертикальной и горизонтальной составляющих нагрузки от волны, а также разработана методика по определению численного значения вертикального давления от цунами на пролетное строение. Данная методика может стать дополнением к основной методике определения нагрузок от волн цунами на мостовые сооружения и помочь проектировщикам в полной мере учесть такое опасное стихийное бедствие как цунами.



## **5 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕАЛИЗАЦИИ**

### **5.1 Общие положения**

В предыдущих главах было представлено решение, которое представляет собой жилое здание, расположенное на конструкции автомобильной эстакады. Данное решение реализует идею организации свободного пространства под зданием для того, чтобы волна цунами могла проходить «насквозь» не оказывая большого давления. Далее было определено как именно лучше расположить жилое здание на конструкции автомобильной эстакады. Изучив влияние различных параметров как конструкции, так и самих землетрясений, в третьей главе были установлены рациональные параметры конструкции. В предыдущей главе было рассмотрено влияние волн цунами различной высоты на предлагаемое сооружение.

Для полученной конструкции был выполнен ряд проверок, подтверждающих работоспособность предлагаемого решения в условиях высокой сейсмической активности и волн цунами высотой до 10 метров.

В данной главе рассмотрены различные рекомендации и варианты по реализации предлагаемого средства цунамизащиты.

### **5.2 Архитектурно-планировочные решения**

Здания, расположенные на автомобильной эстакаде, могут быть использованы для различных нужд. Наиболее перспективным является использование в качестве офисов или для временного проживания людей. Такое предназначение определено из-за экономического развития всего региона в целом, а также из-за развития туризма в Тихоокеанском регионе Российской Федерации, а также в связи с тем, что данный регион является пограничным. Таким образом, одним из перспективных вариантов является использование этих зданий в качестве гостиниц для туристов, либо в качестве временного жилья для военнослужащих. Однако при необходимости, здания могут быть предназначены и для других нужд,

если они (здания) будут удовлетворять соответствующим нормам СанПиН, ГОСТ и др. На рисунке 5.1 представлен план типового этажа.

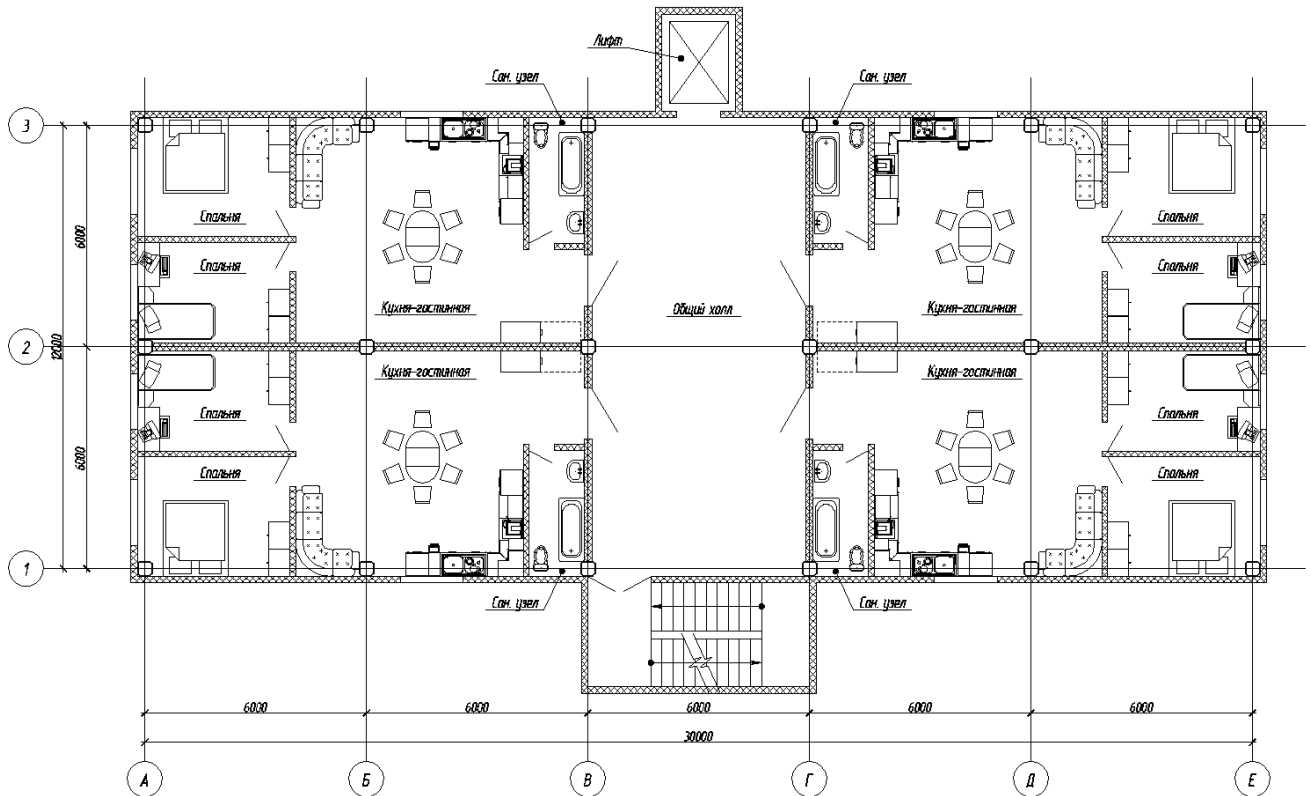


Рисунок 5.1 – План типового этажа

На рисунке 5.1 представлен примерный план типового этажа с расположенными на нём квартирами. При такой близости автомобильного транспорта к жилым помещениям появляется острая необходимость в защите жителей от воздействия шума, выхлопных газов и вибраций, которые возникают от проезжающего транспорта. Для защиты шума и поднимающихся выхлопных газов можно использовать шумозащитные экраны (рисунок 5.2 (а)) или шумозащитный туннель (рисунок 5.2 (б)).

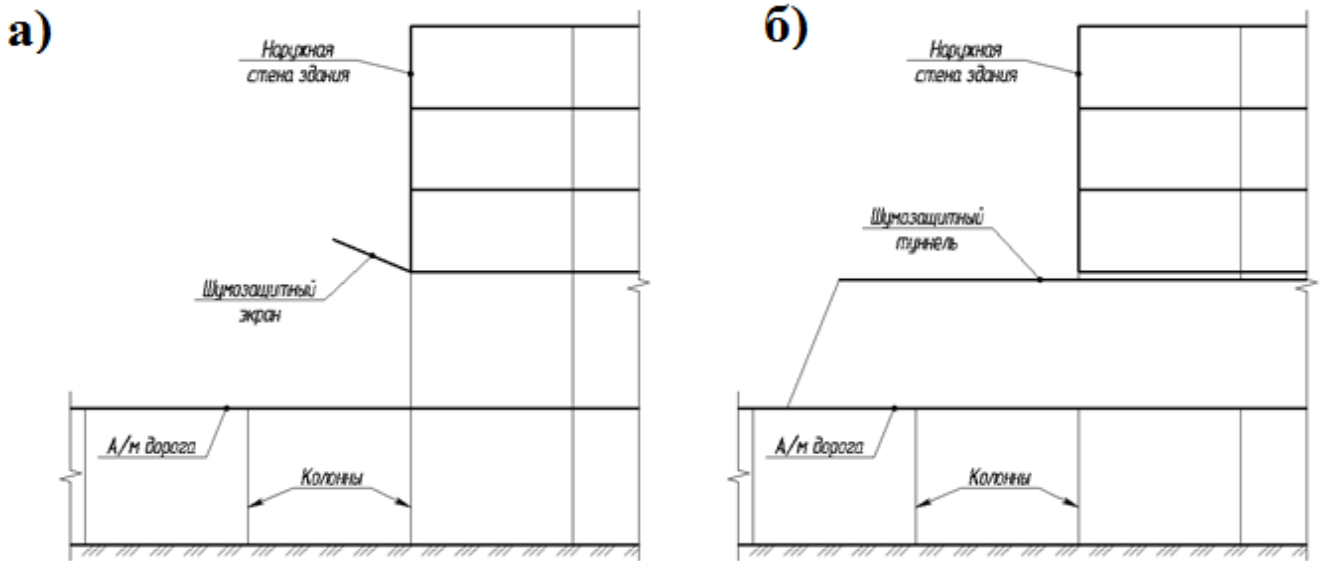


Рисунок 5.2 – Средства шумозащиты здания: а) шумозащитный экран;  
б) шумозащитный туннель

Шумозащитный экран следует крепить к нижнему перекрытию здания по периметру, а шумозащитный туннель можно установить на конструкцию автомобильной эстакады, отделив автомобильную дорогу от тротуара.

Для защиты здания от вибраций возможно использование виброизолирующих опор (рисунок 5.3 (а)) или виброизолирующих материалов (рисунок 5.3 (б)).

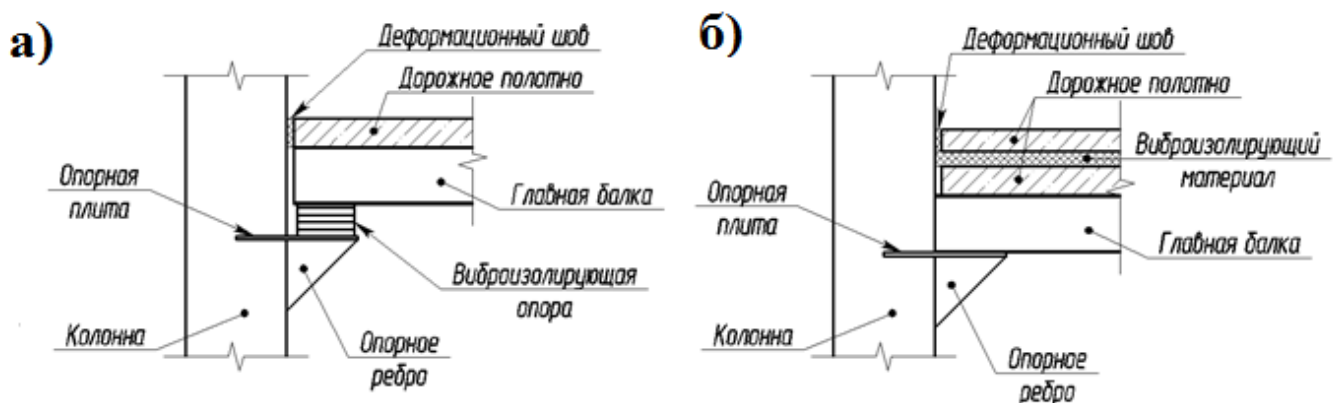


Рисунок 5.3 – Средства виброизоляции: а) виброизолирующая опора;  
б) виброизолирующий материал

Как видно из рисунка 5.3, оба варианта предусматривают изоляцию колонн от вибраций, создаваемых движением автотранспорта.

Таким образом, применяя средства защиты от шума и вибраций, которые используются повсеместно, можно обеспечить комфортное пребывание людей в зданиях.

### **5.3 Конструктивные решения**

В предыдущих главах для исследования сейсмо- и цунамистойкости использовалась одна конструктивная система – металлическая каркасная рамная система. Но такое решение было принято лишь для данного исследования и не является единственным возможным.

Исходя из ранее проведенных исследований установлено, что наиболее опасным воздействием для данной конструкции является землетрясение уровня МРЗ. Таким образом, ниже представлены результаты подбора и проверки сечений на действие этого особого сочетания нагрузок.

Первым альтернативным вариантом конструктивной системы является рамно-связевый каркас. Введение шарниров в балках под дорогой позволяет значительно снизить сечение этих балок: с двутавра 100Б4 до 60Б1, а также незначительно снизить сечение опор с 1420x30 мм. до 1420x25 мм. Но для сохранения геометрической неизменяемости необходимо ввести вертикальные связи из квадратной трубы сечением 180x16 мм. Результат проверки принятых сечений представлен на рисунке 5.4.

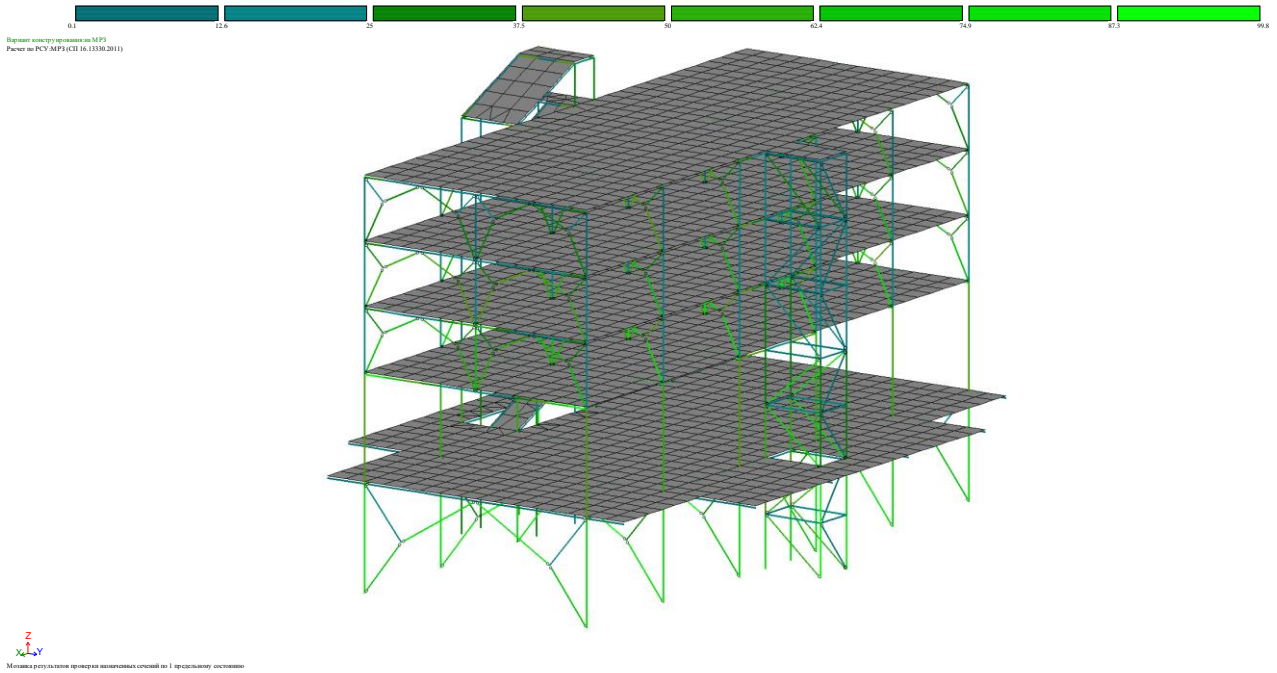


Рисунок 5.4 – Проверка сечений рамно-связевого каркаса

Как видно из рисунка 5.4, введение шарниров и связей позволяет снизить сечение некоторых элементов и при этом обеспечить достаточную прочность при особом сочетании нагрузок с учетом землетрясения уровня МРЗ.

Вторым альтернативным вариантом конструкции может служить монолитный железобетонный каркас. Для проверки этого варианта на железобетонные были заменены все металлические конструкции, кроме конструкции лестницы и лифтовой шахты. Все железобетонные конструкции выполнены из бетона класса В25 с армированием конструкции арматурой класса А500С. Несущие балки дороги и пола первого этажа были приняты сечением 600x800 мм., балки между опорами в уровне дорожного полотна вдоль конструкции и балки перекрытий зданий – сечением 200x400 мм., колонны здания – 400x400 мм. Опоры здания и эстакады приняты круглыми диаметром 1400 мм. Диаметр опор был установлен исходя из подбора оптимального армирования, результат которого представлен на рисунке 5.5.

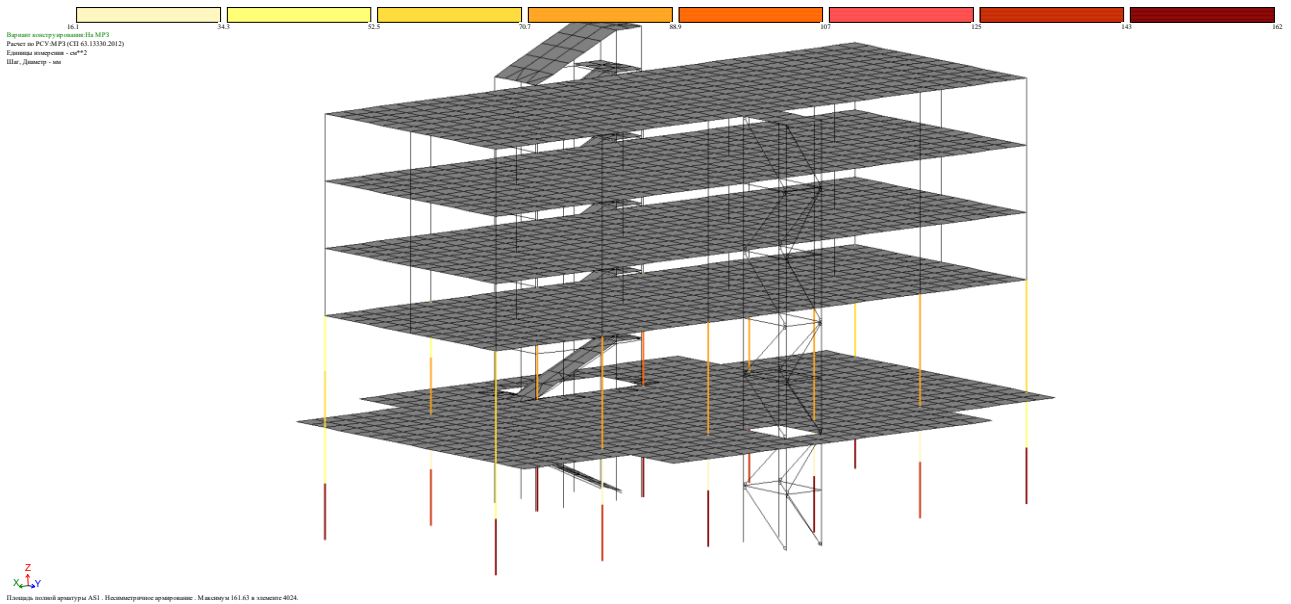


Рисунок 5.5 – Подбор армирования опор

Как видно из рисунка 5.5, для восприятия усилий, возникающих от особого сочетания нагрузок, в нижних опорах эстакады необходимо заложить до  $162 \text{ см}^2$  арматуры, что соответствует 16 стержням  $\text{Ø}36 \text{ мм.}$ ; на участке опор от эстакады до здания необходимо заложить до  $88,9 \text{ см}^2$  арматуры, что соответствует 16 стержням  $\text{Ø}28 \text{ мм.}$

Таким образом, кроме рамного металлического каркаса, возможно использование различных альтернативных конструктивных вариантов предлагаемого средства цунамизащиты зданий. Материал и конструктивная система должны удовлетворять требованиям сейсмо- и цунамибезопасности и определяться исходя из технико-экономического анализа различных вариантов.

#### 5.4 Выводы по главе

1. Предложен вариант типовой планировки жилых зданий, расположенных на конструкции автомобильной эстакады.
2. Предложены варианты стандартных решений по обеспечению шумо- и виброзащиты жилых помещений от воздействия автомобильного транспорта.
3. Установлено, что смена рамной конструктивной системы с металлическим каркасом на рамно-связевую позволит снизить сечение некоторых

несущих элементов здания, однако требует введение вертикальных связей для сохранения геометрической неизменяемости системы.

4. Установлена возможность замены металлического каркаса на железобетонный.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что наиболее частые и опасные цунами происходят вследствие высокой сейсмической активности, что приводит к необходимости совместного их учета при проектировании зданий и сооружений в цунамиопасных районах.

2. Исследовано влияние гидродинамического максимального давления на строительные конструкции в зависимости от параметров волны цунами, при этом показано, что увеличение высоты волны в 2 раза приводит к увеличению максимального давления в 2 раза, а увеличение скорости волны в 2 раза приводит к увеличению максимального давления в 1,5 раза.

3. Подтверждена эффективность организации свободного пространства под зданием, для реализации которого предлагается использовать, например, конструкцию автомобильной эстакады, которая позволяет увеличивать высоту свободного пространства под зданием, а также обеспечивает безопасность населения во время эвакуации при возможной опасности возникновения волн цунами, рекомендуемые параметры конструкции: длина здания с фрагментом эстакады – 30 м., ширина – 12 м., высота стоек – 5 м., опоры – металлические трубы сечением 1420x30 мм.

4. Рассмотрен широкий спектр вопросов влияния на сейсмостойкость предлагаемой цунамизащиты в зависимости от различных факторов: частотного состава сейсмического воздействия, грунтовых свойств основания, а также прогрессирующего обрушения. Установлено, что:

– наибольшее влияние на строительные конструкции оказывают сейсмические воздействия среднечастотного характера (с преобладающим периодом 0,4-0,7 с.), при этом в элементах конструкции наблюдается рост максимальных усилий;



– грунтовые свойства основания также влияют на напряженно-деформированное состояние конструкции – чем жестче основание сооружения (меньше его податливость), тем меньшие горизонтальные отклонения конструкции и большие усилия в опорах;

– расчет от прогрессирующего обрушения показал достаточный запас прочности принятых сечений при выключении из работы одной из опор.

5. Выполнена оценка цунамистойкости предлагаемой защиты при использовании различных подходов (нормативных и численного моделирования) с учетом пространственной работы конструкции, которая подтвердила эффективность предлагаемой цунамизащиты зданий.

6. Установлена необходимость в процессе проектирования мостовых сооружений учитывать вертикальную составляющую нагрузки от волны цунами на пролетное строение сооружения, разработана прикладная методика по определению её численного значения.

7. Даны рекомендации по практической реализации предлагаемого варианта цунамизащиты зданий.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ:

1. Белаш Т.А., Нудьга И.Б., Яковлев А.Д. Цунамизащита зданий в сейсмоопасных районах // Известия ПГУПС. – 2018. – №4. – С. 583-591.

2. Белаш Т.А., Нудьга И.Б., Яковлев А.Д. Защита зданий от цунами в сейсмоопасных районах // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2020. – №1(44). – С.18-20.

3. Яковлев А.Д. Нагрузки от волн цунами на береговые сооружения // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2021. – №1(50). – С. 38-41.

4. Яковлев А.Д. Об учете вертикальной нагрузки от цунами на мостовые сооружения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2021. – № 2. – С. 86-92.

Патент на изобретение:

5. Белаш Т.А., Нудьга И.Б., Яковлев А.Д. Конструкция поселения. Патент РФ № 2698367 от 06.11.2018

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:

6. Belash T.A., Yakovlev A.D. Seismic stability of a tsunami-resistant residential buildings. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 4(80). Pp. 95–103.

Другие публикации по теме диссертации:

7. Белаш Т.А., Яковлев А.Д. Исследование сейсмостойкости цунамистойкого жилого здания на Курильских островах // Сборник докладов и тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения профессора Н.Н. Леонтьева и 110-летию профессора В.З. Власова. – г. Москва, ФГБОУ ВПО НИУ МГСУ – 2017. – С. 56-59.

8. Белаш Т.А., Яковлев А.Д. Использование автомобильной эстакады для обеспечения цунамизащиты // Сборник тезисов Национальной научно-технической конференции. – г. Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. – С. 31-33

9. Белаш Т.А., Яковлев А.Д. Защита зданий от цунами в сейсмоопасных районах. XIII российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) 1-6 июля 2019 года, г. Санкт-Петербург, РАСС // Сборник тезисов конференции. – М.: 2019. - С. 98-100.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Белаш Т. А. Предложение по цунамизащите зданий / Т. А. Белаш, И. Б. Нудьга, А. Д. Яковлев // Инновационный альбом Российской Академии архитектуры и строительных наук. – 2018. – Вып. 2017-1. – С. 25.
2. Белаш Т. А., Нудьга И. Б., Яковлев А. Д. Защита зданий от цунами в сейсмоопасных районах // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. №1 (44). С. 18-20
3. Белаш Т. А., Нудьга И. Б., Яковлев А. Д. Цунамизащита зданий в сейсмоопасных районах // Известия ПГУПС. 2018. №4. С. 583-591
4. Белаш Т.А., Яковлев А.Д. Сейсмостойкость цунамистойких жилых зданий // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 4(80). С. 95–103.
5. Беленя Е.И. Металлические конструкции. / Е.И. Беленя – М.: СтройИздат, 1986. – 560 с.
6. Беляев Н. Д. Лебедев В. В., Алексеева А. В., Нуднер И. С., Семенов К. К., Щемелинин Д. И. Исследования изменений структуры грунта при воздействии волн цунами на гидротехнические сооружения//Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 4. С. 44—52.
7. Беляев Н.Д., Лебедев В.В., Нуднер И.С., Мишина А.В., Семенов К.К., Щемелинин Д.И. Экспериментальные исследования воздействия волн типа цунами на грунт у оснований морских гравитационных платформ // Инженерно-строительный журнал, №6, 2014. С. 4-12
8. Бошнятов Б.В. Исследование волн цунами в гидродинамическом лотке: эксперимент, теория, численное моделирование // Материалы XX юбилейной международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС'2017). 2017. С. 620-621
9. Бычкоровский Н.Н., Пшеничников С.К. Сборно-монолитные железобетонные пролетные строения мостов. / Н.Н. Бычкоровский, С.К. Пшеничников - Саратов: Государственный технический университет, 2005г. – 290 с.

10. Ведомости: Российские власти законодательно отменят цунами. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/opinion/articles/2009/12/28/rossijskie-vlasti-zakonodatelno-otmenyat-cunami>. – (Дата обращения: 05.03.2019).
11. Воробьев Ю.Л. Цунами: предупреждение и защита. / Ю.Л. Воробьев, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов – М.: МЧС России, 2006. – 264 с.
12. ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ВУЛКАНОВ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/avdeiko/mon\\_a\\_v/ch1.pdf](http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/avdeiko/mon_a_v/ch1.pdf) – (Дата обращения: 19.02.2017).
13. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент. – Введ. 1993-01-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 20 с.
14. ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент. – Введ. 1986-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1998. – 11 с.
15. ГОСТ 30245-94 Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия. – Введ. 1995-09-01. - М.: Издательство стандартов. - 1995г. – 31 с.
16. ГОСТ Р 52398-2005 Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования – Введ. 2006-05-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с.
17. ГОСТ Р 52748-2007 Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения – Введ. 2007-09-24. – М.: Стандартинформ, 2008. – 22 с.
18. ГОСТ Р 54157-2010 Трубы стальные профильные для металлоконструкций. Технические условия. – Введ. 2011-08-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 70 с.
19. Дж. Гир, Х. Шах. Зыбкая твердь: Что такое землетрясение и как к нему подготовиться. / Дж. Гир, Х. Шах – перевод на русский язык «Мир», 1988. – 182 с.
20. Жилая единица (Unité d'Habitation), Марсель, Франция. 1945-1952 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

[http://corbusier.totalarch.com/unite\\_d\\_habitation\\_marseille](http://corbusier.totalarch.com/unite_d_habitation_marseille) – (Дата обращения: 28.06.2018).

21. Здание Министерства автомобильных дорог Тбилиси [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.architime.ru/specarch/ministry\\_transportation/ministry\\_transportation.htm#./ministry\\_transportation](https://www.architime.ru/specarch/ministry_transportation/ministry_transportation.htm#./ministry_transportation). – (Дата обращения: 07.03.2019).

22. Землетрясение в Японии (2011) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.wonderfulnature.ru/statji/Earthquake\\_Japan\\_2011.php](http://www.wonderfulnature.ru/statji/Earthquake_Japan_2011.php) – (Дата обращения: 09.04.2017).

23. Землетрясение в Японии (2011) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Землетрясение\\_в\\_Японии\\_\(2011\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Землетрясение_в_Японии_(2011)) – (Дата обращения: 09.04.2017).

24. Злобин Т.К. Природные катастрофы в литосфере Сахалино-Курильского региона и меры безопасности. / Т.К. Злобин – Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2000. – 132 с.

25. И СНОВА – ДОМ НА ПЛАВУ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://green-city.su/i-snova-dom-na-plavu> – (Дата обращения: 07.03.2019).

26. Информация центра цунами [электронный ресурс]. Режим доступа: [http://kammeteo.ru/gms\\_interest3.html](http://kammeteo.ru/gms_interest3.html). – (Дата обращения: 28.05.2017)

27. Как правильно запроектировать рамный узел "ригель-колонна"? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://forum.dwg.ru/showthread.php?t=111411> – (Дата обращения: 17.03.2017).

28. Кантаржи И. Г., Акулинин А. Н. Физическое моделирование воздействия волн цунами на береговые сооружения // ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОФИЗИКА, 2017. Т. 10. № 3. С. 1-13

29. Климович В.И., Воронков О.К., Давиденко В.М., Иванов С.Н. Численное моделирование приливов и распространения волн цунами // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 6(82). С. 228–242.

30. Клячко М. А. О нормах проектирования зданий и сооружений в цунамиопасных районах // ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ и ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОФИЗИКА. 2017. Том 10. № 3. С. 5-25
31. Клячко М. А., Пелиновский Е. Н., Кайстренко В. М. Концепция и нормирование цунамизащиты в Российской Федерации // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2017. №6. С. 72.
32. Клячко М.А., Максимов В.В., Нуднер И.А., Фильков В.Ю. О межгосударственном стандарте «Здания, сооружения и территории. Требования безопасности при воздействии цунами» // Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием “Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска”. 2015. С. 304-306
33. Клячко М.А./ Землетрясения и мы. / М.А. Клячко – Санкт-Петербург: РИФ «Интеграф», 1999. – 236 с.
34. Королёв Ю.П. Оперативный прогноз цунами в Тихом океане // Геосистемы переходных зон. 2017. № 2. С. 3-17.
35. Королёв Ю.П. Оперативный прогноз цунами на Дальнем Востоке // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2017. № 4 (32). С. 72-81
36. Кофф Г.Л. / Методика оценки риска цунами и риска других прибрежно-морских процессов на примере западного побережья Татарского пролива в Хабаровском и Приморском краях. / Г.Л. Кофф и др. - М., 2011. - 54 с.
37. Кофф Г.Л. / Оценка риска цунами и сейсмического риска береговых зон Сахалинской области. / Г.Л. Кофф, Б.В. Левин, Е.Н. Морозов, О.В. Борсукова - Южно-Сахалинск, 2005. - 61 с.
38. Кофф Г.Л., Ганзей К.С. / Оценка риска цунами. / Г.Л. Кофф, К.С. Ганзей – Владивосток: Дальнаука, 2007. - 207 с.
39. Кульмач П.П., Филиппенок В.З. Воздействие цунами на морские гидротехнические сооружения. / П.П. Кульмач, В.З. Филиппенок – Москва: Изд-во Транспорт, 1984. – 304 с.

40. Куприн А. В., Кантаржи И. Г. Типы размывов от волн цунами, воздействующих на гидротехнические сооружения // Гидротехника №4 (61). 2020. С 48-50.
41. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. / Б.В. Левин, М.А. Носов – Москва: Изд-во Янус-К, 2005. – 360 с.
42. Ленинградский экспериментальный пластмассовый дом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fishki.net/1251459-leningradskij-jeksperimentalnyj-plastmassovyj-dom.html>. – (Дата обращения: 28.06.2018).
43. Метро сквозь высотку: в Китае железную дорогу проложили через жилой дом. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stroj.mos.ru/unikalnaya-arhitektura/mir/mietro-skvoz-vysotku-v-kitaie-zhiezlieznuiu-doroghu-prolozhili-chieriez-zhiloi-dom?from=c1> – (Дата обращения: 20.07.2019).
44. Мост-гостиница Elbow Shadow Bridge в Сербии дом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://adcitymag.livejournal.com/1841070.html> – (Дата обращения: 28.06.2018).
45. Немчинов Ю.И. Сейсмостойкость зданий и сооружений. / Ю.И. Немчинов – Киев, 2008. – 480 с.
46. Носов М.А., Колесов С.В., Нурисламова Г. Н., Большакова А.В., Семенцов К.А., Карпов В.А. Роль силы Кориолиса в динамике волн, возбуждаемых в океане глубокофокусными землетрясениями // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 1. С. 73–85. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.006.
47. Нуднер И. С., Семенов К. К., Лебедев В. В., Хакимзянов Г. С., Захаров Ю. Н. Численная модель гидроволновой лаборатории для исследования взаимодействия морских волн с гидротехническими сооружениями // Вычислительные технологии Том 24, № 1, 2019. С. 86-105
48. Об утверждении "Рекомендаций по расчету снеговых нагрузок на сооружения в Сахалинской области" [Текст]: Приказ от 29 декабря 2011 г. №102. – Министерство строительства Сахалинской области. - "Губернские ведомости". - 14.01.2012

49. Пат. 2410511 Российская Федерация, МПК Е 04 Н 9/14. Всплывающий во время наводнения дом [Текст] / Соболев В.М. / заявл. 2009-01-23; опубл. 27.01.2011.
50. Пат. 2376418 Российская Федерация, МПК Е 02 D 27/32. Опора противостихийной конструкции здания [Текст] / Елисеев А.Д. / заявл. 2008-03-27; опубл. 20.12.2009.
51. Пат. 2479702 Российская Федерация, МПК Е 04 Н 9/01, Е04В 1/61 Многоэтажный панельный дом повышенной стойкости к ударным и сейсмическим воздействиям дом [Текст] / Блажко В.П., Харитонов Г.В. / опубл. 16.11.2011.
52. Пат. 2513229 Российская Федерация, МПК Е04Н 14/00, Е01D 1/00. Здание-мост [Текст] / Забалуева Т.Р., Захаров А.В., Вакалюк Ю.Р./ заявл. 2012-12-28; опубл. 20.04.2014.
53. Пат. 2513230 Российская Федерация, МПК Е04Н 14/00, Е01D 1/00. Здание-мост [Текст] / Забалуева Т.Р., Захаров А.В., Молдавский С.С./ заявл. 2012-12-28; опубл. 20.04.2014.
54. Пат. 2513231 Российская Федерация, МПК Е04Н 14/00, Е01D 1/00. Здание-мост [Текст] / Забалуева Т.Р., Захаров А.В., Маслова Т.А./ заявл. 2012-12-28; опубл. 20.04.2014.
55. Пат. 2514075 Российская Федерация, МПК Е04Н 14/00, Е01D 1/00. Здание-мост [Текст] / Забалуева Т.Р., Захаров А.В., Лепешкина Д.А./ заявл. 2012-12-28; опубл. 20.04.2014.
56. Пат. 2514081 Российская Федерация, МПК Е04Н 14/00, Е01D 1/00. Здание-мост [Текст] / Забалуева Т.Р., Захаров А.В., Кочешкова Е.И./ заявл. 2012-12-28; опубл. 20.04.2014.
57. Пат. 2524814 Российская Федерация, МПК Е 02 В 3/04. Цунамигаситель [Текст] / Ясаков Н.В. / заявл. 2013-02-05; опубл. 10-08-14.
58. Пат. 2698367 Российская Федерация, МПК Е04Н 1/00. Конструкция поселения [Текст] / Белаш Т.А., Нудьга И.Б., Яковлев А.Д./ заявл. 2018-11-06; опубл. 26.08.2019.



59. Патент № 2485266 Российская Федерация, МПК Е 04 Н 1/00. Конструкция поселения / С. И. Рубинштейн. – Заявл. 23.01.2012 г. ; опубл. 20.06.2013 г. – Бюл. № 17
60. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. / Е.Н. Пелиновский – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996. -276 с.
61. Пийп Б. И. Засекреченное цунами // Природа №5. 2005. С 36-43
62. Попов М.А. Защита от стихийных бедствий. / М.А. Попов – Москва: Изд-во ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет природообустройства», 2014. – 128 с.
63. РД 31.33.07-86 «Руководство по расчету воздействия волн цунами на портовые сооружения, акватории и территории. Рекомендации для проектирования». – Введ. 1986-01-10. – М.: СОЮЗМОРНИИПРОЕКТ, 1986. – 53с.
64. Реконструкция завода: Бадаевский [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://арех-project.ru/projects/badaeskiy> – (Дата обращения: 28.06.2018).
65. РЕН ТВ Новости: Видео: жители бегут с Аляски на фоне угрозы цунами после землетрясения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ren.tv/novosti/2018-01-23/video-zhiteli-begut-s-alyaski-na-fone-ugrozy-cunami-posle-zemletryaseniya>. – (Дата обращения: 05.03.2019).
66. РИА Новости: Высота цунами, обрушившегося на Японию 11 марта, превышала 40 метров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ria.ru/jpquake\\_news/20110613/387803602.html](https://ria.ru/jpquake_news/20110613/387803602.html). – (Дата обращения: 09.04.2017).
67. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений. / А.М.Уздин, С.В. Елизаров, Т.А. Белаш. - М. : УМЦ ЖДТ, 2012. – 501 с.
68. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\* (с Изменением N 2) от 01.01.2013. – Введ. 2013-01-01. - М.: Минрегион России, 2012. – 113с.
69. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. – Введ. 2018-11-25. - М.: Стандартиформ, 2018. – 122с.

70. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – Введ. 2017-06-04. - М.: Стандартинформ, 2018. – 95с.
71. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. – Введ. 2017-06-17. - М.: Минстрой России, 2016. – 226с.
72. СП 292.1325800.2017. Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования. – Введ. 2017-06-23. - М.: Минстрой России, 2017. – 146с.
73. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. – Введ. 2019-01-06. - М.: Стандартинформ, 2018. – 24с.
74. СП 42.13330.2016 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89\* – Введ. 2017-07-01. – М.: Минстрой России, 2016. – 99 с.
75. Спасительные острова над землёй. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.chaskor.ru/article/spasitelnye\\_ostrova\\_nad\\_zemlej\\_26876](http://www.chaskor.ru/article/spasitelnye_ostrova_nad_zemlej_26876) (Дата обращения : 28.06.2018)
76. Степанюк И.А., Фролова Н.С. Возможности использования рыб в прогностических целях для предсказания опасных процессов в природе // Общество. Среда. Развитие. 2011. №3. С. 218-222.
77. Странная архитектура советской эпохи: как появились жилые дома на «курьих ножках» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ekabu.ru/180912-strannaya-arhitektura-sovetskoj-epohi-kak-poyavilis-zhilye-doma-na-kurih-nozhkah-14-foto-video.html>– (Дата обращения: 28.06.2018).
78. Сывороткин В.Л. Цунами. / В.Л. Сывороткин // Пространство и Время. – 2011. – № 2(4). – с. 124-137
79. Тектоника Курило-Камчатского глубоководного желоба. / Г.С. Гнибиденко и др. - Москва: Наука, 1980. – 179 с.
80. Тихонов И.Н. / Армирование элементов монолитных железобетонных зданий: Пособие по проектированию. / И.Н. Тихонов – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2007. – 170 с.

81. Тихонов М.Н. Антология катастрофы на японской атомной станции "Фукусима-1" // Анализ риска здоровью. 2015. №1. С. 82-102.
82. Удивительные дома-мосты мира [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.liveinternet.ru/users/wolfleo/post319951077/>– (Дата обращения: 28.06.2018).
83. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2016 года. [Таблица] «31. Численность населения городов и пгт. по федеральным округам и субъектам Российской Федерации на 1 января 2016 года». – М: Росстат. - 2016
84. Шарнирное примыкание колонна-балка (труба-двутавр), оценка узла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://forum.dwg.ru/showthread.php?t=98820> – (Дата обращения: 17.03.2017).
85. Шibaкин С.И. Рогачко С.И. Нагрузки и воздействия на нефтегазопромысловые гидротехнические сооружения. / С.И. Шibaкин, С.И. Рогачко - М.: ООО "Газпром экспо", 2000. — 258 с.
86. Шульчин В.Н. / Инженерная защита населения и территории в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени. Книга 1. Основы инженерной защиты населения и территории в чрезвычайных ситуациях. / В.Н. Шульчин – М.: Изд-во Академический Проект, 2010. – 688 с.
87. Яковлев А.Д. Нагрузки от волн цунами на береговые сооружения // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2021. – №1(50). – С. 38-41
88. Яковлев А.Д. Об учете вертикальной нагрузки от цунами на мостовые сооружения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2021. – № 2. – С. 86-92, DOI 10.37153/2618-9283-2021-2-86-92.
89. Additional Report of the Japanese Government to the IAEA - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations - (Second Report), 2011 (1)
90. Andrew Charleson. Seismic Design for Architects: Outwitting the Quake / Architectural Press. 2010. – 296 p.

91. ANSYS Fluent Theory Guide. – Canonsburg (PA) USA.: ANSYS, Inc., 2021. – 1028 с.
92. Bethany D. Rinard Hinga. Ring of fire: an encyclopedia of the Pacific Rim's earthquakes, tsunamis, and volcanoes. ABC-CLIO, California. 2015. 403 p.
93. Bricker J., Francis M., & Nakayama A. Scour depths of coastal structures due to the 2011 Tohoku Tsunami // *Jrnl of Hydraulic Rsrch*, 50:6. 2012. С. 637–641.
94. Chock G., Robertson I., Kriebel D., and Francis M. Tohoku Japan Tsunami of March 11, 2011. Performance of Structures // ASCE/SEI. 2013.
95. Constantin A., Henry D. Solitons and Tsunamis // *A Journal of Physical Sciences*. 2009. Vol. 64. No. 1-2. Pp. 65-68. (4)
96. Eight Chifley – вертикальная деревня в Сиднее. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dwgformat.ru/2019/05/19/8-chifley> – (Дата обращения: 07.03.2019).
97. Foster A.S.J., Rossetto T., Allsop W. An experimentally validated approach for evaluating tsunami inundation forces on rectangular buildings // *Coastal Engineering*. 2017. Vol. 128. Pp. 44-57.
98. H.R. Riggs, Ian N. Robertson, Kwok Fai Cheung, Geno Pawlak, Yin Lu Young, Solomon C.S. Yim / Experimental Simulation of Tsunami Hazards to Buildings and Bridges / Proceedings of 2008 NSF Engineering Research and Innovation Conference (11)
99. Harry Yeh, Ian N. Robertson, Jane Preuss Development of design guidelines for structures that serve as tsunami vertical evacuation sites. 2005. Washington State, Department of Natural Resources.
100. Helal M.A., Mehanna M.S. Tsunamis from nature to physics // *Chaos, Solitons and Fractals*. 2008. Vol. 36. No 4. Pp. 787-796. (10)
101. Kantarzhi I., Sharova V. Study of scour in front of vertical wall from oblique wave // Proc. Of the 12th Int. Conf. on the Mediterranean Coastal Envirionment. MEDCOAST 2015, Varna, Bulgaria, v.2, 2015. Pp. 881–889.

102. Kuswandi Kuswandi, Radianta Triatmadja, Istiarto Istiarto / Simulation of scouring around a vertical cylinder due to tsunami / Science of tsunami hazards. 2017. Vol. 36. No. 2. Pp. 59-69. (12)

103. Kuswandi Kuswandi, Radianta Triatmadja, Istiarto Istiarto / Velocity around a cylinder pile during scouring process due to tsunami / Conference: Congress of the Asia Pacific Division of the International Association for Hydro Environment Engineering and Research, At Colombo, Srilanka, Volume: 20 / 2016 (13)

104. Lukkunaprasit P., Ruangrassamee A., Thanasisathit N. Tsunami loading on buildings with openings // Science of tsunami hazards. 2009. Vol. 28. No. 5. Pp. 303-310. (6)

105. Meenakshi A.N., Juvanna B.I. Tsunami detection system using unusual animal behavior-A specified approach. // Earth Sciences. 2013. Vol. 2. No. 1. Pp. 9-13. (8)

106. S.C. Yim, D.T. Cox and M.M. Park / Experimental and Computational Activities at the Oregon State University NEES Tsunami Research Facility / Science of tsunami hazards. 2009. Vol. 28. No. 1. Pp. 1-14. (5)

107. Satake K., Rabinovich A., Lu U.K.N., Tinti S. Introduction to “Tsunamis in the World Ocean: Past, Present, and Future. Volume I” // Pure and Applied Geophysics. 2011. Vol. 168. No. 6-7. Pp. 963-968. (3)

108. Street Tree Pods — дома на деревьях в Лондоне. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dwgformat.ru/2019/05/03/street-tree-pods> – (Дата обращения: 07.03.2019).

109. Synolakis C.E., Bernard E.N. Tsunami science before and beyond boxing day 2004. // Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Series A). 2006. Vol. 364. No 1845. Pp. 2231-2265. (9)

110. THE FUKUSHIMA DAICHI ACCIDENT. Technical volume 2. Safety assessment / IAEA, 2015 (15)

111. These 165,000-Pound Columns Will Heft a 38-Story Tower 85 Feet Off the Ground. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.popularmechanics.com/technology/infrastructure/a21286764/skanska-usa-2u-construction-seattle-pickard-chilton/> – (Дата обращения: 07.03.2019).

112. Tonkin Susan & Francis Mathew & Bricker Jeremy // Limits on Coastal Scour Depths due to Tsunami. 2013. P. 671–678. DOI:10.1061/9780784413234.086.

113. Van Der Tempel J., Zaaijer M. B. and Subroto H. The effects of scour on the design of offshore wind turbines // Proc. 3rd Int. Conf. on Marine Renewable Energy, London, UK, Pp.. 27–35.

114. Yamada K. Lessons for Tsunami: Staking Our Lives on Future Disaster Prevention. / 18th PARIS Int'l Conference on Studies in Law, Business, Economics & Interdisciplinary Studies (LBEIS-19) Sept. 5-7, 2019 Paris (France). DOI: 10.17758/EIRAI6.ED0919107

115. Yeh H. and Li W. Tsunami Scour and Sedimentation // Proceedings 4th Intl. Conf. on Scour and Erosion. Tokyo, JP. 2008. Pp. 95–106.

116. Zhangping W., Robert A.D. Numerical study on mitigating tsunami force on bridges by an SPH model // Journal of Ocean Engineering and Marine Energy. 2016. Vol. 2. Issue 3. Pp. 365–380. (14)

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



**НИЦ строительство**  
научно-исследовательский центр

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«СТРОИТЕЛЬСТВО»

№ \_\_\_\_\_ от 18 января 2021 г.  
на № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
**об использовании результатов научных исследований**

**Место внедрения:** Проект Изменения №1 СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования».

**Наименование предложения:** оценка общей нагрузки на опоры мостов и транспортных сооружений

**Авторы:** Яковлев Антон Дмитриевич

**Место и время разработки:** г. Москва, АО «НИЦ «Строительство».  
2020 г.

**Форма внедрения:** материалы научных исследований, выполненных Яковлевым А.Д., в рамках написания диссертационной работы, включены в проект Изменения №1 СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования». Результаты проведенных исследований носят инновационный характер, позволяют обеспечить надежность и безопасность функционирования объектов транспортной инфраструктуры в цунамиопасных районах.

Заместитель генерального директора  
по научной работе



А. И. Звездов

AA22176

**АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»:**  
109428, Москва, 2-я Институтская ул. 6,  
тел.: +7 (499) 170-1548; +7 (495) 602-0070;  
факс: +7 (499) 171-2250  
inf@cstroy.ru | www.cstroy.ru

ИНН 5042109739, КПП 504201001,  
ОГРН 1095042005255  
Юридический адрес: 141367, Московская область,  
Сергиево-Посадский муниципальный район, городское  
поселение Сергиев Посад, пос. Загорские Дали, д. 6-11