

На правах рукописи



Яковлев Антон Дмитриевич

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В ЦУНАМИОПАСНЫХ РАЙОНАХ

Специальность: 2.1.1. Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Белаш Татьяна Александровна

Официальные оппоненты: **Нуднер Игорь Сергеевич**
доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», кафедра «Высшая математика», профессор;

Долгая Анжелика Александровна
кандидат технических наук, АО «Трансмост», сектор разработки программных средств, инженер-проектировщик I категории;

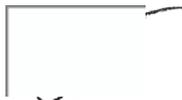
Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».**

Защита состоится «10» февраля 2022 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/yakovlev-anton-dmitrievich>

Автореферат разослан «21» декабря 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов Владимир Мирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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. R. 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 жизни 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 беспре-

пятственное движение волн во время действия цунами, является наиболее предпочтительным конструктивным вариантом для повышения их цунами-стойкости.

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 цунамиозащиты.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, приведены основные положения, которые составляют научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы.

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.

При изучении отечественной и зарубежной литературы было выявлено несколько причин возникновения волн цунами: сейсмическая активность, подводный оползень, извержение подводного вулкана, локальное изменение атмосферного давления, подводные взрывы и падение в воду крупных объектов. Установлено, что наиболее частой причиной возникновения волн цунами являются сильные землетрясения (с магнитудой $M > 5$), происходящие под дном моря так, чтобы над эпицентром находилась большая толща воды.

На территории Российской Федерации волны цунами были зафиксированы в Тихом океане, Черном и Каспийском морях. При этом высота и повторяемость цунами в Черном и Каспийском морях существенно меньше, чем в Тихоокеанском регионе.

Выходящая на берег волна цунами обладает сразу несколькими поражающими факторами: затопление территории; гидродинамическое давление от волны; транспортирующие действие, которое обусловлено наличием в потоке воды различных объектов (обломки лодок, машины, деревья, камни и многое другое), наносящих дополнительный урон.

Для защиты населения и сохранения материального имущества в мировой практике сформированы различные направления по обеспечению безопасности цунамиопасных районов: цунамирайонирование территории; прогнозирование и оповещение о возможных цунами; усовершенствуется математический аппарат, который описывает распространение волн и взаи-

модействие их с различными объектами; инженерные системы защиты (от простых лесонасаждений до сложных дамб); цунамистойкое строительство. При этом цунамистойкое строительство на сегодняшний день является одним из наиболее перспективных методов обеспечения цунамибезопасности.

В мировой практике сформировался ряд требований к проектированию цунамистойких зданий: здание должно быть прочным, способным выдерживать большую ударную нагрузку; здание рекомендуется располагать длинной стороной вдоль движения волны цунами; фундаменты следует строить таким образом, чтобы они были неподверженными влиянию эрозии почвы и подмыву в результате действия течений; первый этаж следует делать как можно более «открытым»; ключевые элементы инфраструктуры здания (аварийные генераторы, лифтовые моторные отсеки и др.) следует располагать на не затопляемых этажах.

Все описанные выше направления по обеспечению цунамибезопасности побережий должны быть закреплены в нормативно-правовой базе. На территории РФ с 2018 года вступил в силу СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», который охватывает большое количество перечисленных ранее направлений по обеспечению цунамибезопасности побережий. Несмотря на большой объем научных работ в рассматриваемой области, выполненных российскими и зарубежными специалистами, вопрос об особенностях воздействия волн цунами на здания и сооружения, находящихся в опасных сейсмических районах, требует проведения дальнейших исследований, необходимых для поиска наиболее обоснованных конструктивных решений, обеспечивающих безопасность функционирования строительных объектов в условиях совместного проявления сейсмических воздействий и волн цунами. Все вышесказанное определило цель диссертационной работы.

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.

Прибрежные районы, находящиеся в сейсмоопасной зоне, дополнительно могут быть подвержены воздействию волн цунами. Оценить влияние этих волн на различные строительные объекты довольно сложно, но вполне реально произвести качественный анализ этого влияния. Для данного исследования был выбран модуль «Fluid Flow (Fluent)» программного комплекса ANSYS 2021.

В исследовании рассмотрен накат волн на три различных сооружения: сплошное (без проемов и открытых пространств) здание (рисунок 1 (а)), здание с открытым первым этажом (рисунок 1 (б)) и фрагмент мостового сооружения (рисунок 1 (в)). В рассматриваемых сооружениях не учитывались различные варианты конструктивных систем и используемых строительных материалов рассмотренных сооружений.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ

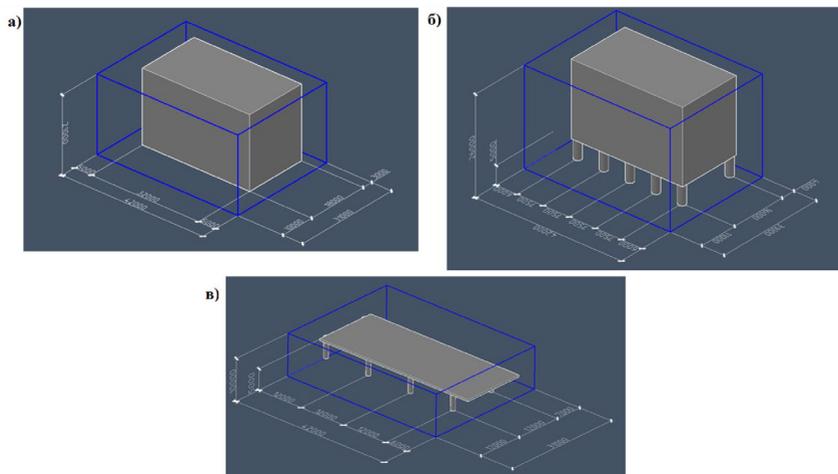


Рисунок 1 – Расчетные схемы: *a* – сплошное здание; *б* – здание с открытым нижним этажом; *в* – фрагмент мостового сооружения

Первоначально в исследовании 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 (1):

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

где h – глубина; H – высота волны; h_{cr} – высота от желоба; c – скорость волны; m – параметр эллиптической функции; α – переменная; n – индекс волновой теории; x_0 – расстояние от начала координат.

Анализ результатов расчетов показал, что исследуемые параметры волны влияют на величину максимального гидродинамического давления от волны на все рассматриваемые сооружения одинаково. При этом, максимальное влияние (в процентном соотношении) на величину давления, оказывает высота волны: увеличение этого параметра в 2 раза приводит к увеличению максимального давления от волны также в 2 раза. Высота волны, по сути, определяет общую массу воды в волне, которая давит на здание или сооружение. Скорость волны в меньшей степени оказывает влияние на величину

ну гидродинамического давления: увеличение скорости в 2 раза приводит к увеличению максимального давления в 1,5 раза.

Кроме численного сравнения величины максимального давления, интересен и характер его распределения. На вертикальной сплошной стене (рисунок 3 (а)), 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. Следовательно, заменив стены первого этажа колоннами и сделав первый этаж открытым (рисунок 3 (б)), существенно снижается суммарная нагрузка от волны цунами на здание. Однако, если высота волны превысит высоту открытого нижнего этажа, стены здания также будут подвержены воздействию волн цунами. При этом, показанное на рисунке 3 (в) мостовое сооружение имеет наибольшую проницаемость из всех рассмотренных. Это приводит к уменьшению общей площади воздействия волн цунами и, как следствие, к большей цунамибезопасности.

Исследования показали, что, если в сейсмическом районе добавится воздействие волн цунами, может возникнуть опасная ситуация для строительных конструкций. Во-первых, величина нагрузки от волн цунами может достигать больших значений. Во-вторых, еще до прихода волн цунами, сооружения могут быть ослаблены сильным сейсмическим воздействием. Таким образом, становится очевидно, что игнорировать нагрузку от волн цунами нельзя. Это приводит к необходимости поиска новых специальных средств защиты зданий от цунами, отвечающих также требованиям сейсмостойкости.

Выполненные исследования показали, что наименьшее воздействие от волн цунами следует ожидать при высокой пропускной способности конструкции. Данный вывод подтверждается мировым опытом проектирования зданий в цунамиопасных районах. Увеличить пропускную способность здания возможно различными способами. Одним из них может быть, например, использование автомобильной эстакады, которая при этом будет совмещать ряд функций: увеличивать высоту свободного пространства под зданием, создавать возможность быстрой эвакуации населения в случае угрозы прихода волны цунами, обеспечивать подъезд к зданиям различных видов транспорта. Такая конструкция может быть расположена вдоль побережья в том числе и в районах со сложным рельефом этого побережья. Она может создавать возможность для решения различных градостроительных задач при развитии удаленных населенных пунктов.

Идея совместить мостовое сооружение и здание не нова. Начиная со средних веков люди, пытаясь сэкономить пространство, строили здания на мостах. Этот прием используется и в наши дни, более того, с тенденцией уплотнения городской застройки, набирает большую популярность. Архитекторы и инженеры по всему миру активно предлагают свои проекты по строительству зданий «оторванных» от поверхности земли.

На первом этапе расчетного обоснования предлагаемого решения был выполнен анализ напряженно-деформированного состояния четырех вариантов расположения зданий на конструкции автомобильной эстакады (см. рис. 2). На всех четырех вариантах были заданы одинаковые нагрузки, типы и жесткости элементов. Данные расчеты производились с помощью метода конечных элементов в программном комплексе SCAD 21.1. Сравнивались деформации, периоды колебаний и усилия в опорах при расчете на основное и особое (с учетом девятибалльного землетрясения, определяемого по спектральной методике) сочетания нагрузок.

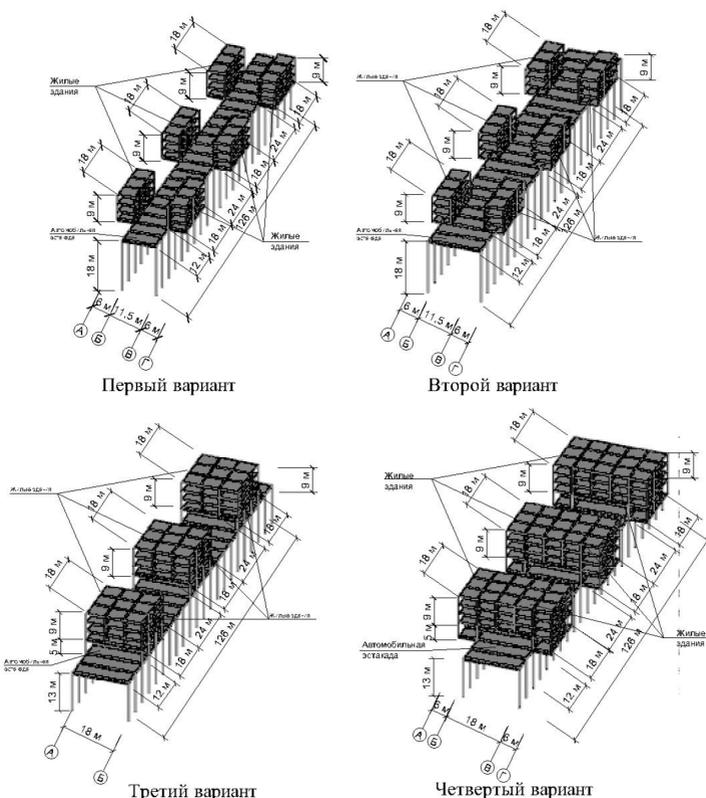


Рисунок 2 – Варианты размещения зданий на эстакаде

В ходе данного исследования было установлено, что третий вариант (см. рис. 2, 3) является наиболее предпочтительным с точки зрения устойчивости и сейсмостойкости.

На данную конструкцию был получен патент, а также ее описание было опубликовано в альбоме инновационных предложений РААСН (выпуск 2017-1).



Рисунок 3 – Здания на автомобильной эстакаде

Для обоснования сейсмостойкости предлагаемого решения на следующем этапе бы выполнен анализ предлагаемой цунамизащиты при сейсмических воздействиях различного частотного состава, а также свойств грунтового основания.

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.

Расчеты производились 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. Для оценки сейсмостойкости конструкции проводилось сравнение деформаций, усилий в опорах, а также частоты и периода колебаний. Расчетное исследование проводилось в несколько этапов.

На первом этапе расчетного исследования было определено, как влияют геометрические параметры автомобильной эстакады на её сейсмостойкость. Основными геометрическими характеристиками эстакады являются длина участка (между деформационными швами), его ширина и высота. Для изучения изменения одного параметра, необходимо было его менять, а два оставшихся зафиксировать. В данных исследованиях длина участка принималась равной 60 м., 90 м. и 120 м.; ширина участка – 9 м., 12 м., 15 м., 18 м., 21 м.; высота стоек – 4 м., 4,5 м., 5 м., 5,5 м. и 6 м. Влияние геометрических параметров на сейсмостойкость конструкции было изучено по двум расчетным моделям (без здания и со зданием). Расчетная модель со зданием с различными вариантами геометрических характеристик представлена на рисунке 4.

График влияния геометрических параметров на возникающую в опорах продольную силу представлен на рисунке 5.

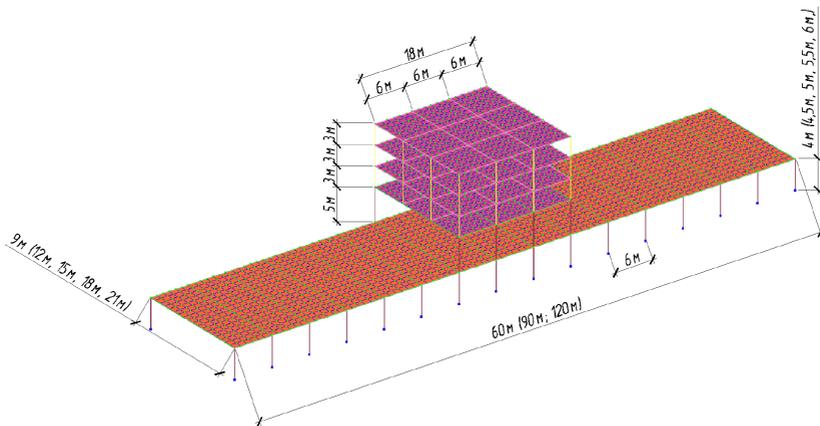


Рисунок 4 – Расчетная модель эстакады со зданием

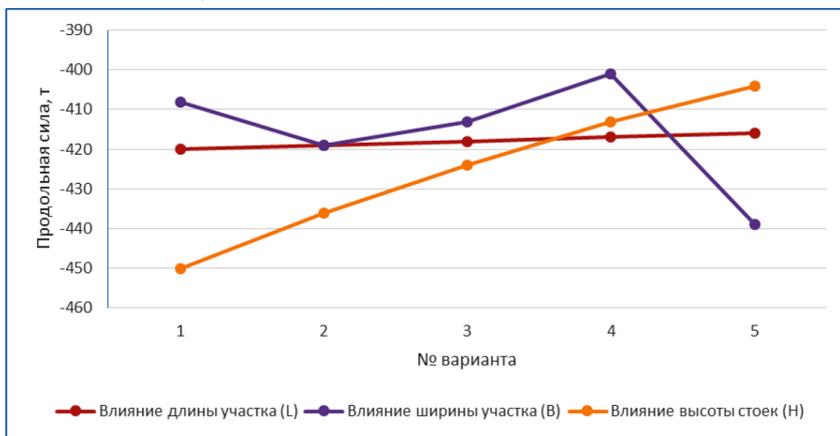


Рисунок 5 – График влияния геометрических параметров на возникающую в опорах продольную силу

В результате выполненного исследования установлено, что геометрические параметры в различной степени влияют на сейсмостойкость. Существенное влияние оказывает высота эстакады (разница между значениями продольных усилий в опорах составляет 14% при изменении высоты на 1 м.), а также её ширина (разница между значениями продольных усилий в опорах 7,7% при изменении ширины на 1 м.). 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.). Исходя из полученных данных, для повышения сейсмостойкости в первую очередь необходи-

мо 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_b^* , определяемая по формуле (2), которая принята в соответствии с рекомендациями нормативных документов (РД 31.33.07-86 и СП 385.1325800.2018):

$$h_b^* = \left(1 - \frac{i \cdot x}{h_{100}} \right) \cdot h_{100} + h_3, \quad (2)$$

где i – уклон берега; x – расстояние от линии уреза воды до объекта; h_{100} – максимальное за 100 лет значение вертикальных заплесков цунами; 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_b^* 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.

Следующим этапом стало изучение влияния жесткости опор на сейсмостойкость конструкции. Жесткость опор изменялась за счет двух параметров – поперечного сечения и материала. Поперечное сечение принималось 630×20 мм., 720×20 мм., 820×20 мм., 920×20 мм., 1020×20 мм., 1120×20 мм. при этом материалом опор служили полые металлические трубы. При исследовании влияния материала опор на сейсмостойкость конструкции были рассмотрены следующие варианты: металлические трубы 630×20 мм., труботетон, включающий в себя металлическую трубу 630×20 мм. с заполнением бетоном, и железобетонные круглые колонны диаметром 630 мм. Дополнительно были рассмотрены различные варианты компоновки опор. При изменении какого-либо параметра, все остальные не изменялись, что является важным условием для получения достоверных результатов.

В результате расчетного исследования установлено, что жесткость опор является существенным фактором, влияющим на сейсмостойкость всей конструкции, а варианты компоновки опор не значительно (при принятых геометрических размерах) влияют на частоту или период колебаний. Выбор всех этих параметров будет зависеть, по большей части, от возникающих расчетных усилий и деформации конструкции.

Графики влияния материала и сечения опор на деформации сооружения представлены на рисунке 6.

Принимая во внимание все вышеописанные результаты, а также нормативно-правовые документы в области градостроительства, проектирования дорог, зданий и сооружений было предложено участки автомобильной

эстакады с расположенными на ней зданиями отделять от остальной эстакады деформационными швами. Также были установлены предпочтительные геометрические параметры всего сооружения (длина конструкции – 30 м., ширина – 12 м., высота стоек – 5 м.), по которым была построена уточненная расчетная схема (рисунок 7).

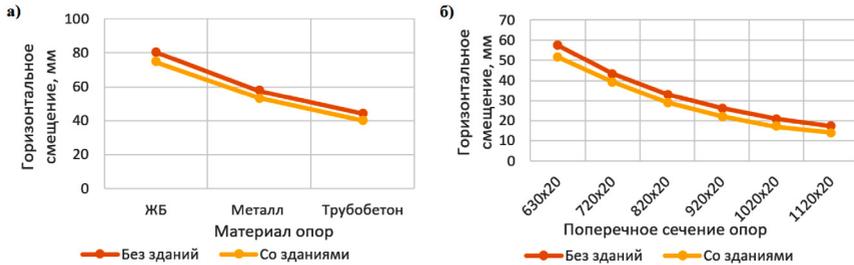


Рисунок 6 – Графики влияния на деформации: *а* – материала; *б* – сечения опор

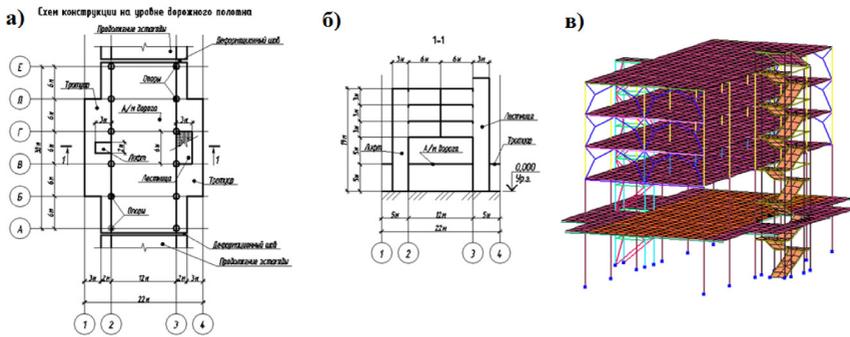


Рисунок 7 – Схема предлагаемой конструкции:

а – на уровне дорожного полотна; *б* – поперечный разрез; *в* – расчетная схема

Для данной схемы был выполнен подбор сечений для всех стальных элементов от действия особого сочетания нагрузок с учетом землетрясения. Были приняты следующие сечения основных несущих элементов эстакады: опоры – металлические трубы сечением 1420×30 мм.; несущие балки – двутавр 100Б4, балки между опорами в уровне дорожного полотна вдоль конструкции – двутавр 20Б1.

На третьем этапе расчётного исследования рассматривались вопросы влияния сейсмического воздействия с различной частотой колебания на заданную конструкцию. Рассматривались синтезированные акселерограммы с преобладающими частотами, характерными для высокочастотного, среднечастотного и низкочастотного землетрясений.

В результате исследования установлено, что наибольшее влияние оказывают среднечастотные землетрясения, так как преобладающий период таких землетрясений совпадает с периодом собственных колебаний сооруже-

ния. Результаты проверки принятых сечений при действии среднечастотного землетрясения представлены на рисунке 8.

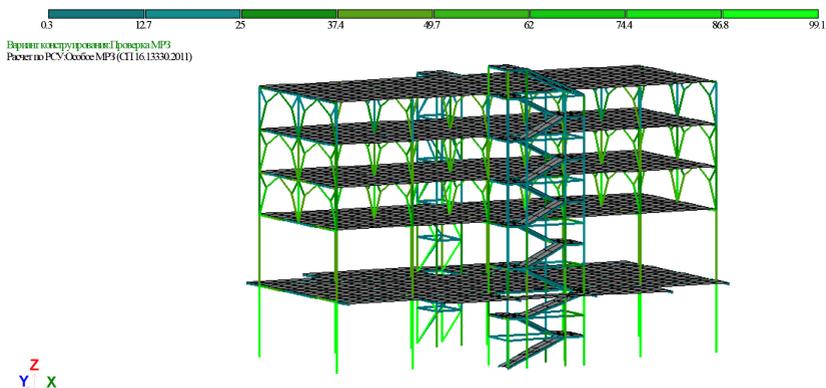


Рисунок 8 – Процент использования материала

Как видно из рисунка 8, процент использования материала не превышает 100%, следовательно, принятых ранее сечений достаточно.

Следующей проверкой стал расчет от прогрессирующего обрушения. Данный расчет был выполнен в соответствии с требованиями СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения». Так, расчетная схема здания или сооружения при расчете от прогрессирующего обрушения предусматривает выключение из работы схемы (удаление) несущего конструктивного элемента. В рассматриваемой конструкции были поочередно удалены одна из центральных опор и одна крайняя опора. Доказано, что принятые при проектировании сечения металлических элементов с запасом обеспечивают сохранность конструкции при выключении из работы одной из опор.

Заключительным этапом изучения сейсмостойкости предлагаемого варианта цунамизащиты зданий является расчет принятой конструкции с учетом различной податливости основания, которая моделировалась одноузловым конечным элементом №51 (связь конечной жесткости). Для расчета данному конечному элементу задавались значения, которое соответствует погонной жесткости грунта на осевое сжатие. Для каждой стойки, в зависимости от приходящих на обрез фундамента нагрузок, определялась погонная жесткость грунта. Она, для чистоты результатов, зависела только от модуля деформации грунта, который принимался соответственно 1000 т/м², 1500 т/м², 2000 т/м², 2500 т/м² и 3000 т/м². В ходе данного этапа расчетного исследования установлено, что чем меньше жесткость грунта (выше его податливость), тем меньше усилия в опорах возникают при действии сейсмической нагрузки, но возникают большие горизонтальные отклонения конструкции (см. рисунок 9).

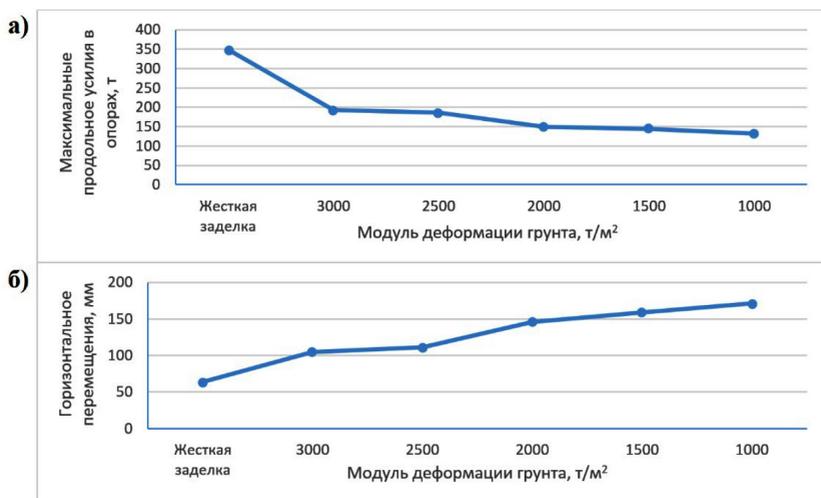


Рисунок 9 – График влияния жесткости грунта:

а – на усилия в опорах; *б* – на деформации конструкции

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.

Определение величины нагрузки от волн цунами выполнялось с использованием двух методик: по РД 31.33.07-86 и по СП 292.1325800.2017. Оба нормативных документа позволяют найти значение нагрузки от предполагаемой волны цунами, которое в дальнейшем следует задавать как статическую нагрузку по направлению предполагаемого действия волны цунами. Значение давления волны цунами по РД 31.33.07-86 определяется по формуле (3):

$$P_l = 1,5 \cdot \rho \cdot g \cdot \eta, \quad (3)$$

где ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; η – величина высоты волны непосредственно у сооружения.

Удельная нагрузка на лобовую грань сооружения от воздействия бора по СП 292.1325800.2017 определяется по формуле (4):

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

где C_1 – скорость фронта бора при накате на берег; μ – безразмерный параметр; t_* – длительность воздействия фронта бора на береговой объект; t – время распространения бора; ε – угол между направлением распространения фронта бора, вкатывающегося на берег, и лобовой гранью сооружения; $K_{пр}$ – коэффициент проницаемости грани сооружения.

В настоящем расчетно-теоретическом исследовании приняты величина высоты 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, что делает данное исследование более универсальным. Схема приложения нагрузки от волны высотой 10 м. на предлагаемое сооружение представлена на рисунке 10.

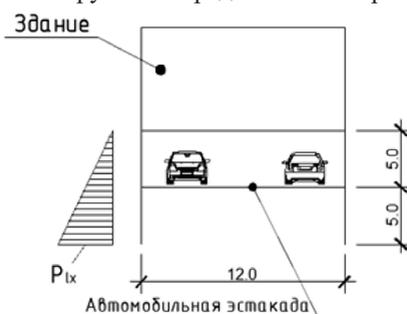


Рисунок 10 – Схема приложения нагрузки от волны высотой 10 м.

Анализ результатов определения численного значения нагрузок от волн цунами с использованием методик, представленных в РД 31.33.07-86 и в СП 292.1325800.2017 показал, что 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. При этом в расчете по СП 292.1325800.2017 на величину нагрузки от волн цунами также влияют: скорость волны, время ее распространения, безразмерный параметр μ , 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, безразмерный параметр μ также зависит от высоты волны и незначительно зависит от шероховатости откоса. Угол между направлением распространения фронта бора и лобовой гранью сооружения и коэффициент проницаемости грани сооружения являются характеристикой сооружения. Таким образом, исследование влияния различных волн цунами сводится к исследованию влияния высоты волны на поведение рассматриваемого сооружения.

Сравнение воздействия от действия волн цунами различной высоты с землетрясением уровня 9 баллов проводилось по максимальным горизон-

тальным перемещениям конструкции и возникающим в опорах усилиям. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 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 Mu, 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 1, для предлагаемого варианта цунамизащиты зданий, продольная сила в опорах и горизонтальные перемещения больше от сейсмического 9-балльного воздействия, чем от волны цунами, что связано с высокой проницаемостью сооружения, так как большая часть волны цунами проходит сооружение «насквозь». Данные выводы подтверждают результаты, полученные во второй главе диссертации.

На следующем этапе было произведено сравнение напряженно-деформированного состояния здания, расположенного на автомобильной эстакаде с таким же отдельно стоящим зданием и с таким же зданием, но с открытым нижним этажом (высота открытого этажа 5 м.). Различия хорошо заметны на графике влияния высоты волны на возникающие в колоннах продольные усилия (см. рис. 11). Стоит отметить, что увеличение возникающих усилий приводит к тому, что принятых ранее сечений недостаточно.

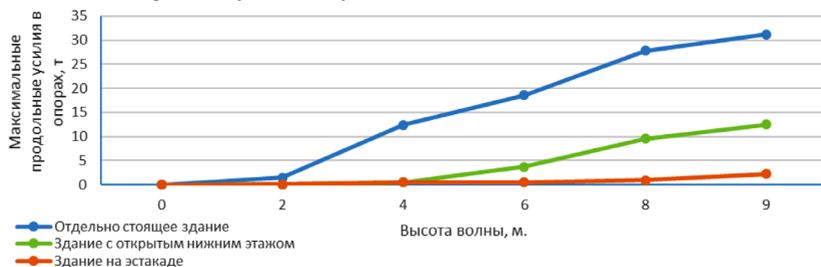


Рисунок 11 – График влияния высоты волны на возникающие в колоннах продольные усилия

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование автомобильной эстакады в качестве варианта организации свободного пространства под зданиями оправдано и полностью выполняет заложенные функции безопасности при воздействии волны цунами.

В описанных выше исследованиях цунамистойкости предлагаемой конструкции 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 СП 292.1325800.2017 ее можно учитывать при необходимости, но конкретных рекомендаций по ее определению нет.

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. На данное сооружение был смоделирован накат волн различной высоты (6, 7, 8, 9 и 10 метров). Скорости этих волн были приняты как при расчете давления от цунами по СП 292.1325800.2017. Пример расчета влияния высоты волны на сооружение представлен на рисунке 12 для высоты волны равной 10 метров.

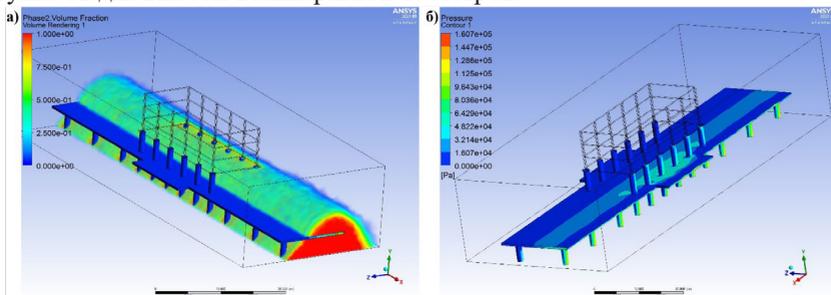


Рисунок 12 – Взаимодействие волны с сооружением:

a – накат волны на сооружение; *b* – давление волны на сооружение

Как видно из рисунка 12(а), в случае, когда высота волны превышает высоту сооружения, часть волны оказывается на пролетном строении моста и должна оказывать вертикальное давление на него. Это подтверждается картиной распределения давлений от волны на сооружение, которая представлена на рисунке 12 (б).

Максимальное давление испытывают на себе опоры в нижней точке и сам пролет эстакады со стороны волны. При этом 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 (5):

$$p_b = p \cdot k_b, \quad (5)$$

где p_b – вертикальное давление на пролетную конструкцию; p – максимальное горизонтальное давление на сооружение; k_b – коэффициент перехода, определяемый по графику на рисунке 14.

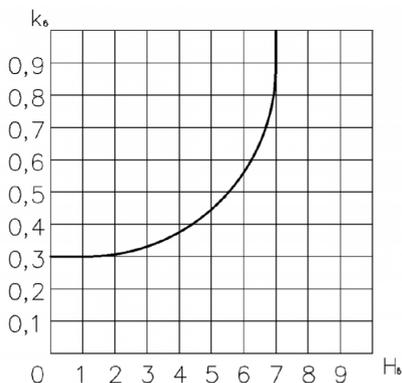


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента перехода (k_b) от превышения высоты волны цунами над высотой сооружения (H_b)

График на рисунке 14 получен путем аппроксимации данных результатов расчета конструкции на волны различной высоты. В случае, если высота волны превышает высоту сооружения более чем на 7 метров ($H_b > 7$ м), коэффициент перехода следует принимать равным 1 ($k_b = 1$).

Таким образом, предлагаемая методика позволит учесть вертикальную составляющую нагрузки от волн цунами, тем самым, дополнив основную методику определения нагрузок от волн цунами при проектировании зданий и сооружений, высота которых может быть ниже высоты волны.

В *пятой главе* были представлены рекомендации по практической реализации предлагаемого варианта цунамизащиты. Предложены вариант 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.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Установлено, что наиболее частые и опасные цунами происходят вследствие высокой сейсмической активности, что приводит к необходимо-

сти 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 1420×30 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.

Перспективой дальнейшей разработки данной темы является разработка новых конструктивных решений по обеспечению цунамибезопасности зданий и сооружений с учетом рельефа и прибрежной застройки. А также включение результатов исследования (методики определения численного значения вертикальной составляющей нагрузки от волн цунами на мосто-

вые сооружения) в нормативные документы, что может помочь проектировщикам в полной мере учесть такое опасное стихийное бедствие как цунами.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

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.

Компьютерная верстка В. С. Весниной

Подписано к печати 06.12.2021. Формат 60×84^{1/16}. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 133.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.