

На правах рукописи



ЖЕМЧУГОВ-ГИТМАН Дмитрий Михайлович

**РАЗВИТИЕ ЛИНЕЙНО-СПЕКТРАЛЬНОГО
МЕТОДА РАСЧЕТА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Специальность 2.1.9 Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Уздин Александр Моисеевич

Официальные оппоненты: **Позняк Елена Викторовна**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», профессор
кафедры робототехники, мехатроники
и динамики машин;

Островская Надежда Владимировна
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-
строительный университет», доцент
кафедры строительной механики.

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский центр
«Строительство» (г. Москва).

Защита состоится 18 февраля 2026 года в 13.00 на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, 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 сайте:

<https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/zhemchugov-gitman-dmitriy-mihaylovich>

Автореферат разослан «22» декабря 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов В. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные руководящие документы Российской Федерации в области сейсмостойкого строительства требуют производить расчет сооружений на сейсмическое воздействие по линейно-спектральному методу (ЛСМ). Это требование распространяется на основные виды сооружений и на все уровни ответственности. Таким образом, ЛСМ играет ключевую роль при оценке сейсмостойкости сооружений.

Основные положения ЛСМ в руководящих документах были заложены более 70 лет назад и за это время метод расчета не претерпел значимых изменений, тогда как методы и цели проектирования сейсмостойких конструкций существенно изменились.

Важно подчеркнуть, что в первых руководящих документах по сейсмостойкости основной динамической схемой была жестко защемленная консоль, имеющая минимально допустимое число степеней свободы. Современная модернизация экономической, информационной, строительной, проектной и архитектурной отраслей привела к появлению сложных пространственных конструкций, для которых расчетная схема в виде консоли абсолютно не применима. Современное развитие компьютерной техники позволяет строить математические модели с тысячами степеней свободы, которые детальнее описывают поведение таких сложных сооружений. В последние 20 лет начали широко применяться специальные методы сейсмозащиты: сейсмоизоляция и сейсмогашение. Очевидно, что трансформация технических решений и динамической модели должна инициировать обновление метода расчета на сейсмостойкость.

Современные методы сейсмостойкого строительства ориентируются на многоуровневое проектирование сооружений. Основная задача сейсмостойкого строительства, которая традиционно заключалась в обеспечении устойчивости сооружения к сильному землетрясению без разрушений, теперь смещается в сторону анализа поведения конструкции при воздействиях разной интенсивности и соответствующем уровне повреждений. Этот подход, известный за рубежом как Performance Based Seismic Design (PBSD), подразумевает проектирование ожидаемого поведения сооружения. Таким образом, смена парадигмы проектирования закономерно требует обновления концептуальных положений ЛСМ.

Таким образом, модернизация ЛСМ представляет собой исключительно актуальную задачу.

Степень разработанности темы исследования.

Общие принципы расчета сооружений на сейсмические воздействия формулировались преимущественно в XX веке. Различные подходы и методы расчета сейсмостойкости описаны в работах Ф. Омори, Р. Сано, М. А. Био, Дж. У. Хаузенера, Н. М. Ньюмарка, В. Дж. Холла, А. Шибаты, М. Созена, П. Гюлькана, Т. Полэя, Р. Парка, М. Дж. Пристли, К. С. Завриева, И. Л. Корчинского, Я. М. Айзенберга, В. В. Болотина, М. Ф. Барштейна, И. И. Гольденבלата, Н. А. Николаенко, Ш. Г. Напетваридзе, А. Д. Абакарова, А. Г. Тяпина, А. М. Уздина, Ю. Л. Рутмана, В. Т. Рассказовского, Э. Е. Хачияна, Ю. П. Назарова, Е. В. Позняк, О. А. Савинова, Т. Ж. Жунусова, С. В. Полякова, Е. Н. Курбацкого, и многих других исследователей.

Основной вклад в развитие линейно-спектрального метода расчета внесли за рубежом: М. А. Био, Дж. У. Хаузенер, Н. М. Ньюмарк, В. Дж. Холл, Д. Хадсон, Дж. Алфорд, Р. Мартел, в России и СССР – И. Л. Корчинский, А. Г. Назаров, И. И. Голденблат, С. В. Поляков, О. А. Савинов, Е. Н. Курбацкий.

Характерной особенностью сейсмостойкого проектирования является необходимость задания уровня воздействия землетрясения, выраженная в первых исследованиях в виде сейсмического коэффициента. Верификация получаемых результатов осуществлялась при помощи сравнения результатов расчета на динамическое воздействие с результатами произошедших катастроф. На основе этих данных формировались первые нормативные документы по сейсмостойкости — прообразы современных строительных норм.

Вопросами задания сейсмического воздействия в своих работах занимались: Ф. Омори, Р. Сано, К. Сюехиро, Дж. Боммер, А. Эльнашай, Н. М. Ньюмарк, В. Дж. Холл, М. Дж. Н. Пристли, М. Дж. Ковальски, Т. Полэй, А. Чопра, Г. Гюэль, В. И. Уломов, О. А. Савинов, А. Д. Абакаров, И. Л. Корчинский, К. С. Завриев, М. Ф. Барштейн, А. А. Петров, Ш. Г. Напетваридзе, А. М. Уздин, С. В. Прокопович и многие другие.

Для анализа линейно-спектрального метода расчета сейсмостойкости необходимо учитывать уровень развития математических методов на этапе его становления. В то время вычислительная техника только зарождалась, и расчёты выполнялись на упрощённых моделях — например, на консоли с малым числом степеней свободы. Из-за сложности учёта сейсмического воздействия усилие корректировались интегральными коэффициентами. Они позволяли оценить общий уровень повреждений, но не отражали их распределение по конструкции. Наиболее очевидный при

этом всем путь – распределение усилий пропорционально упругой жесткости элементов, однако при анализе нелинейных систем выявилось, что такой подход не является корректным. Распределение усилий в упруго-пластической модели характеризуется сложностью и зависит от многих факторов, включая геометрию, материалы и степень повреждений. Современные математические модели включают десятки тысяч конечных элементов и сложные конструктивные решения. Их анализ требует более точного подхода, чем применение единых интегральных коэффициентов. Разработкой более сложных моделей, учитывающих неравномерное распределение повреждений, занимались: А. Шибата, М. Созен, П. Гюлькан, Т. Такеда, Н. Нильсен, С. Фриман, П. Фаджфар, А. Чопра, Г. Гоэля, Дж. Боммер, Э. Симборт, Ю. Л. Рутман, А. М. Уздин, А. В. Соснин, М. И. Андреев, О. В. Мкртычев, О. В. Кабанцев, Г. А. Джинчвелашвили, Н. В. Островская и другие.

Сегодняшнее развитие нормативных документов, в частности на Западе, требует от проектировщиков реализации многоуровневого проектирования с целью оптимизации затрат на последствия землетрясений. Данное требование обуславливает необходимость обновления некоторых специфических подходов определения сейсмостойкости сооружения по ЛСМ. Исследования, изучающие многоуровневое сейсмостойкое проектирование отображены в работах Дж. Боммера, А. Эльнашай, М. Дж. Н. Пристли, М. Дж. Ковальски, Т. Полэя, С. Фримана, П. Фаджфара, А. Чопры, Г. Гоэля, А. М. Уздина, Ш. Ш. Назаровой, А. В. Соснина и других исследователей.

Цель исследования – усовершенствовать линейно-спектральный метод расчета сейсмостойкости для современных методов и целей проектирования.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проанализировать развитие методов расчета сейсмостойкости и, в частности, ЛСМ;
2. Предложить способ задания интенсивности сейсмического воздействия для расчетов по ЛСМ;
3. Пересмотреть и теоретически обосновать коэффициенты, входящие в ЛСМ;
4. Разработать предложение по учету неоднородного распределения повреждений и сопоставить полученные результаты по ЛСМ с результатами расчета прямым динамическим методом;
5. Выполнить расчеты сооружений, иллюстрирующие применение предложенного метода оценки сейсмостойкости.

Объект исследования: Расчет сейсмостойкости сооружений.

Предмет исследования: Линейно-спектральный метод расчета сейсмостойкости.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 2.1.9. – Строительная механика, направление соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

п. 7 «Теория и методы расчета сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы и так далее)»

п. 12 «Исследование и моделирование нагрузок и воздействий на здания и сооружения»

Научная новизна:

1. Разработан новый вариант линейно-спектрального метода (ЛСМ) расчета сейсмостойкости, в котором спектральная кривая формируется на принципиально новой основе – как произведение независимо определяемых функций: коэффициента динамичности $\beta(\xi)$, зависящего от демпфирования в системе, и формирующей функции $PGA(T)$, задающей зависимость пикового ускорения от преобладающего периода воздействия.

2. На основе обработки базы данных около 200 акселерограмм сильных землетрясений получена новая аппроксимирующая зависимость для пиковых ускорений основания от периода $PGA(T)$, которая обеспечивает соответствие кинематических параметров (PGA , PGV , PGD) требованиям современной шкалы ШСИ-17 и устраняет существующее противоречие с нормативным документом СП 14.13330.2018.

3. Теоретически обоснована и апробирована новая зависимость для коэффициента динамичности β от затухания. Данный подход устраняет необходимость в применении условного коэффициента K_ψ и позволяет напрямую учитывать демпфирование по формам колебаний, в том числе неоднородное.

4. В рамках ЛСМ адаптирована и развита методика дифференцированного учета неоднородного распределения повреждений, основанная на задании коэффициентов пластичности μ для отдельных элементов и последующей линеаризации расчетной схемы. Это позволяет отказаться от единого коэффициента K_1 , моделировать заданные сценарии поведения сооружений, учитывать совокупное влияние различных механизмов демпфирования и приближает результаты ЛСМ к данным нелинейного динамического анализа.

5. Доказана эффективность предложенного метода для решения современных задач проектирования, включая многоуровневый анализ ($PBSD$) и расчет систем с сейсмоизоляцией и демпфированием, что расширяет область применения ЛСМ за рамки, ограниченные действующими нормами.

Теоретическая значимость заключается в разработке нового варианта ЛСМ, основанного на зависимости пиковых ускорений грунта основания PGA от спектрального состава воздействия, а также в предложении способа моделирования неоднородных повреждений.

Практическая значимость заключается в расширении функционального назначения ЛСМ, что позволяет применять его для проектирования современных сложных систем, включая сооружения с неоднородным демпфированием, сейсмоизоляцией, а также для реализации многоуровневого проектирования в соответствии с современными требованиями сейсмостойкости.

Методология и методы исследования:

Методологической основой исследования является системный подход к модернизации ЛСМ, реализованный через три последовательных этапа: аналитический, расчетно-аналитический и верификационный. На аналитическом этапе применялись методы анализа и обобщения научной литературы и нормативной базы. Расчетно-аналитический этап базировался на комплексном применении методов строительной механики и теории колебаний для формирования динамических расчетных схем, методов математической статистики и регрессионного анализа для обработки базы акселерограмм, а также математического моделирования и метода конечных элементов для верификации предложенных решений. На завершающем верификационном этапе использовались методы сравнительного анализа, обеспечившие сопоставление полученных результатов с данными других авторов, положениями нормативных документов, последствиями реальных землетрясений и результатами прямого динамического расчета.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый вариант линейно-спектрального метода расчета сейсмостойкости, в котором спектральная кривая формируется как произведение независимо определяемых функций коэффициента динамичности $\beta(\xi)$ и формообразующей функции $PGA(T)$;

2. Аппроксимирующая зависимость пиковых ускорений основания от периода $PGA(T)$, полученная на основе обработки базы акселерограмм и обеспечивающая соответствие кинематических параметров требованиям шкалы ШСИ-17;

3. Зависимость коэффициента динамичности от затухания $\beta(\xi)$ для сейсмического воздействия, устраняющая необходимость в применении условного коэффициента $K\psi$ и позволяющая учитывать демпфирование по формам колебаний;

4. Методика дифференцированного учета повреждений в ЛСМ на основе задания коэффициентов пластичности μ для отдельных элементов, позволяющая моделировать сценарии разрушения и комплексно учитывать различные механизмы демпфирования;

5. Сбалансированная система расчетных коэффициентов для практического применения усовершенствованного ЛСМ.

Степень достоверности основных положений диссертационной работы обеспечивается последовательной верификацией результатов, включающей сопоставление с последствиями известных землетрясений, корреляцию с данными нелинейного динамического анализа, согласованность с результатами обработки базы акселерограмм сильных землетрясений, а также соответствие исследованиям ведущих специалистов и положениям нормативных документов.

Апробация работы:

Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы подтверждены апробацией на следующих конференциях и семинарах:

– Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием «Строительство и архитектура: теория и практика сейсмической безопасности» в г. Махачкала., 14–16 марта 2023 года;

– LXXXIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» в г. Санкт-Петербург, 17–24 апреля 2023 г.

– Международная научно-практическая конференция, посвященная 160-летию кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций» и 170-летию Механической лаборатории имени профессора Н. А. Белелюбского в г. Санкт-Петербург, 22–23 мая 2024 года

– IX Международной конференции «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии» в г. Владикавказ, 6–9 октября 2024 г.,

– LXXXV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» в г. Санкт-Петербург, 14–16 апреля 2025 г.

– III Национальная (всероссийская) научно-техническая конференция «Перспективы современного строительства» в г. Санкт-Петербург, 21–23 апреля 2025 г.

Личное участие в получении результатов работы

Результаты диссертационной работы получены соискателем лично, а именно:

1. Проанализировано развитие методов расчета сейсмостойкости и, в частности, ЛСМ;

2. Предложен способ задания интенсивности сейсмического воздействия для расчетов по ЛСМ;
3. Пересмотрены и теоретически обоснованы коэффициенты, входящие в ЛСМ;
4. Разработано предложение по учету неоднородного распределения повреждений и проведено сопоставление полученных результатов по ЛСМ с результатами расчета прямым динамическим методом;
5. Выполнены расчеты сооружений, иллюстрирующие применение предложенного метода оценки сейсмостойкости.

Публикации

Результаты основных исследований по теме диссертации были опубликованы в 7 научных статьях, среди которых 5 – в рецензируемых изданиях из перечня журналов ВАК.

Внедрение научных результатов диссертации:

Результаты исследования внедрены в проектную деятельность ООО «ГРАМОС» (г. Санкт-Петербург) при разработке технических решений сейсмозащиты мостов на автомобильной дороге А289 Краснодар – Славянск-на-Кубани – Темрюк – автомобильная дорога А290 Новороссийск – Керчь в условиях ограниченных исходных данных о сейсмичности площадки строительства, о чем получен Акт о внедрении.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 163 страницах печатного текста, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 145 источников, в том числе 61 на иностранном языке. В работе представлено 62 рисунка, 18 таблиц и 76 формул.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Новый вариант линейно-спектрального метода расчета сейсмостойкости, в котором спектральная кривая формируется как произведение независимо определяемых функций коэффициента динамичности $\beta(\xi)$ и формирующей функции $PGA(T)$.

Разработан новый вариант линейно-спектрального метода (ЛСМ) расчета сейсмостойкости, основанный на принципиальном разделении спектра ответа на две независимые составляющие: формирующую функцию $PGA(T)$, описывающую частотные характеристики воздействия, и коэффициент динамичности $\beta(\xi)$, определяющий динамический отклик конструкции. Необходимость такого разделения подтверждается анализом разрушительных землетрясений, таких как землетрясение в Мехико (1985 г.) и Бухарестское землетрясение (1977 г.), где относительно низкие значения пикового ускорения грунта (PGA) сопровождалось катастрофическими последствиями из-за резонансных явлений. Особенностью этих воздействий

являлось наличие преобладающих периодов в нестандартном низкочастотном диапазоне (1.5–2.5 с), что вызывало резонанс с гибкими сооружениями повышенной этажности. Это доказывает, что сейсмическая опасность не может характеризоваться исключительно балльностью, связанной с PGA , а требует обязательного учета спектрального состава воздействия. В отличие от традиционного ЛСМ, где коэффициент динамичности является переменным и зависит от периода колебаний, в предлагаемом методе коэффициент β принимается постоянным для сооружения и зависит только от демпфирования ξ , что соответствует физическому смыслу динамического отклика конструкции и согласуется с подходом, применяемым для простых гармонических воздействий. Такой подход обеспечивает более точную оценку сейсмического отклика конструкций и устраняет системные противоречия, присущие традиционной методике расчета.

Расчетная сейсмическая нагрузка по предлагаемому варианту ЛСМ определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} S_{ik} &= A \cdot m_k \cdot \beta_i(\xi_i) \cdot \eta_{ik} = \\ &= PGA_0 \cdot K_{PGA}(T_{eq}) \cdot m_k \cdot \beta_i(\xi_i) \cdot \eta_{ik}, \end{aligned} \quad (1)$$

где S_{ik} – сейсмическая нагрузка по i -той форме в k -том узле расчетной схемы, A – сейсмическое ускорение, m_k – масса в k -том узле схемы, $\beta(\xi_i)$ – коэффициент динамичности, определенный в зависимости от затухания ξ по i -той форме колебаний, η_{ik} – коэффициент влияния формы колебаний, PGA_0 – базовое значение ускорения, определяемое для заданной повторяемости воздействия, $K_{PGA}(T_{eq})$ – коэффициент, учитывающий изменение пиковых ускорений в зависимости от преобладающего периода воздействия T_{eq} .

Спектральная кривая SA в данном случае определяется зависимостью (2). Учитывается, что спектральная кривая зависит от затухания в системе через коэффициент динамичности β , а неравномерное распределение пиковых ускорений основания PGA от периода определяет форму спектральной кривой.

$$SA = PGA(T) \cdot \beta(\xi), \quad (2)$$

где T – период колебаний.

Оба параметра, характеризующие спектральную кривую, определяются на основании обработки записей более 200 сильных землетрясений.

2. Аппроксимирующая зависимость пиковых ускорений основания от периода $PGA(T)$, полученная на основе обработки базы акселерограмм и обеспечивающая соответствие кинематических параметров требованиям шкалы ШСИ-17.

Ввиду того, что зависимость $PGA(T)$ предполагается формообразующей для спектральной кривой, при ее задании учтены дополнительные критерии, связанные с формами спектра ответа ускорений SA и псевдоспектром смещений PSD .

На основании исследований формы спектральных кривых Дж. Боммера и А. Эльнашай определена взаимосвязь между спектрами ответа ускорений SA , псевдоспектром скоростей PSV и псевдоспектром смещений PSD по формуле (3)

$$PSD = SA \cdot \left(\frac{T}{2 \cdot \pi}\right)^2 = PSV \cdot \frac{T}{2 \cdot \pi} \quad (3)$$

В то же время имеются ожидания, что при $T \rightarrow \infty$, спектр ответа смещений должен приходить к величине, равной значению пикового смещения основания PGD , предполагая, что система в таком случае является абсолютно сейсмоизолированной. Данное условие показано в выражении (4).

$$PSD(T) \underset{T \rightarrow \infty}{=} -PGD = \text{const} \quad (4)$$

Определено, что полученные ранее зависимости $PGA(T)$ в работах А. А. Долгой, А. М. Уздина, С. В. Прокоповича, М. А. Богдановой, О. П. Нестеровой и др. не могут быть использованы в качестве формообразующей для спектра из-за невыполнения описанного критерия для спектральной кривой SA и отсутствия связи $PGA(T)$ с пиковой скоростью грунта PGV и пиковым смещением основания PGD , значения которых регламентированы в ШСИ-17.

Все это привело к тому, что для задания аппроксимирующей функции $PGA(T)$ в работе принята зависимость, включающая член, обратно пропорциональный квадрату T для выполнения условия (4). Предложенная зависимость показана ниже:

$$PGA(T) = A \cdot e^{-\left(\frac{T+a}{b}\right)^v} + \frac{C}{(T+d)^2}, \quad (5)$$

где A, a, b, C, d, v – параметры, подбираемые по методу наименьших квадратов

Подобранные по методу наименьших квадратов коэффициенты показаны в таблице 1.

Таблица 1. Подобранные коэффициенты к формуле (5)

A	a	b	v	C	d
12,64	7,73	4,16	1,00	29,76	2,52

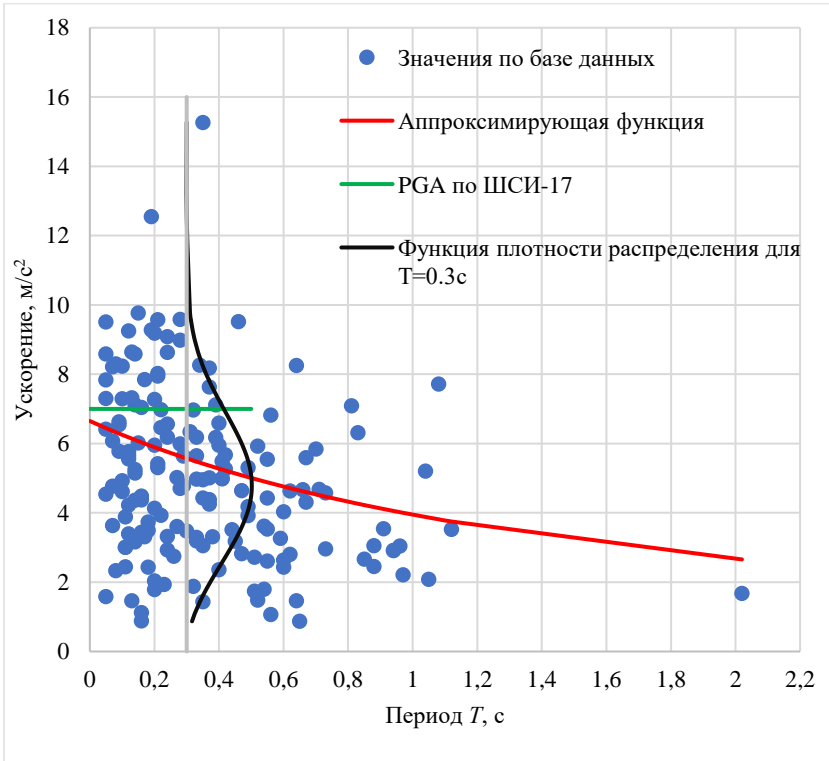


Рисунок 1 – Полученная аппроксимация пиковых ускорений основания PGA (по оси ординат) от преобладающего периода воздействия на спектре ответа акселерограмм T_{eq} (по оси абсцисс), m/s^2

В качестве упрощенной зависимости для удобства конструирования спектра для различных грунтовых условий и интенсивности также предложена зависимость $PGA(T)$, представленная в выражении (6), применяемая при оценке распределения Вейбулла. Явным достоинством формулы (6) является однозначность влияния заданных коэффициентов. Параметр A характеризует максимальную ординату спектра, а параметр b связывает длину области постоянных значений, а также влияет на значения получаемых в конечном итоге пиковых смещений оснований PGD . Значение $c = -2$ следует принять зафиксированным для сохранности концептуальных переходов между спектрами.

$$PGA(T) = A \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{T}{b}\right)^c}\right), \quad (6)$$

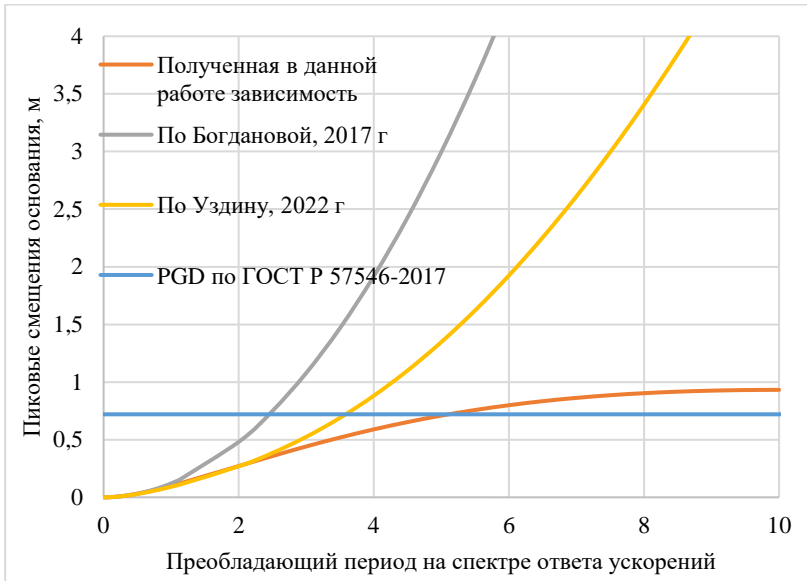


Рисунок 2 – Сопоставление полученной зависимости PGD(T_{eq}) с результатами предыдущих исследований и ШСИ-17

3. Зависимость коэффициента динамичности от затухания $\beta(\xi)$ для сейсмического воздействия, устраняющая необходимость в применении условного коэффициента K_{ψ} и позволяющая учитывать демпфирование по формам колебаний.

Для определения спектральной кривой по формуле (2) требовалось также определить второй параметр $\beta(\xi)$, который представляет собой коэффициент усиления (коэффициент динамичности) нагрузки на сооружение при воздействии землетрясения в случае резонанса. Как известно, для случая резонанса следует учитывать демпфирование, чтобы получать конечное значение динамического коэффициента.

При проработке параметра учета затухания учтено, что целесообразно избавиться от недостатков учета демпфирования, присущих СП 14.13330.2018 через применение коэффициента отклонения затухания от базового K_{ψ} :

- Понятие «высокие сооружения с небольшими размерами в плане» достаточно размыто
- Нет зависимости от материала сооружения, при том, что известен факт, что разные материалы обладают специфическими характеристиками затухания

- Полученные значения множителя к нагрузке могут быть только 1.3 или 1.5. Есть ожидания, что это консервативная оценка
- Нет методики учета демпфирующих устройств
- Нет возможности учета демпфирования по формам колебаний

Предполагается, что воздействие землетрясения является промежуточным между «белым шумом» и гармоническим воздействием, для которых известны аналитические значения коэффициентов динамичности соответственно по формулам (7) и (8). По этой причине ожидается определять коэффициент динамичности по формуле (9), предполагая значение степени ν в диапазоне от 0.5 до 1.

$$\beta_{\infty}(\xi) = \frac{1}{2 \cdot \xi} \quad (7)$$

$$\beta_{\infty}(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \xi}} \quad (8)$$

$$\beta_{\infty}(\xi) = \frac{a}{(2 \cdot \xi)^{\nu}}, \quad (9)$$

где β_{∞} - максимальный динамический коэффициент.

Величина данного параметра также определена по базе из более 200 сильных землетрясений. Коэффициент динамичности определялся через рассмотрение огибающей спектров ответа воздействий, нормированных на $PGA = 1 \text{ м/с}^2$. Огибающая спектров ответа показана на рисунке 3. Экстремум на огибающей определен акселерограммой Мехико, с преобладающим периодом в 2 с и эти значения приняты за целевые значения ускорений, для которых следует подобрать аппроксимирующую функцию. Полученные результаты представлены в таблицах 2 и 3. Важная специфика получаемых результатов показательна тем, что база данных содержит акселерограммы с преобладающим периодом воздействия до 3 с, что отличается от большинства современных нормативных документов.

Таблица 2. Подобранные коэффициенты аппроксимации и соответствующая достоверность аппроксимации R^2

Коэффициенты	a	ν	R^2
Вариант 1.	1.000	0.747	0.996
Вариант 2.	1.322	0.644	0.999

Таблица 3. Сопоставление аппроксимации с результатами

Коэффициент затухания в долях от критического ξ	0.025	0.05	0.075	0.1
Максимумы огибающей спектров ответа ускорений, м/с ²	9.080	5.871	4.494	3.713
Вариант 1	9.383	5.590	4.128	3.330
Вариант 2	9.100	5.823	4.485	3.727

Ввиду того, что сейсмическое воздействие характеризуется ограниченной длиной воздействия и раскачиванием из начальных условий, предполагается при определении коэффициента динамичности учитывать зависимость получаемой нагрузки от длительности интенсивного воздействия. Учет длительности воздействия реализуется при помощи введения коэффициента K_τ , как это показано в формуле (10). Сама поправка принята по известным формулам рассмотрения резонанса гармонического воздействия по формуле (11).

$$\beta(T, \xi) = \beta_\infty(\xi) \cdot K_\tau(T, \xi), \quad (10)$$

$$K_\tau(T, \tau, \xi) = 1 - e^{-\frac{2\pi\xi\tau}{T}} = 1 - e^{-\frac{\delta\tau}{T}}, \quad (11)$$

где τ – длительность резонансного воздействия, δ – логарифмический декремент колебаний.

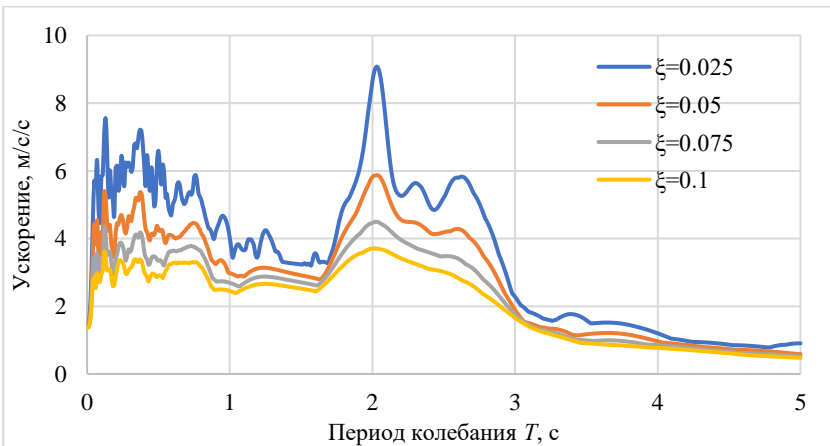


Рисунок 3 – Огибающая спектров ответа ускорений по базе акселерограмм в зависимости от периода колебаний T для соответствующих коэффициентов затухания ξ

В развитие предлагаемого метода предложено учитывать специфику низкочастотного воздействия, заключающаяся в ожидаемой узкополосности спектра ответа ускорений, выявленной по имеющейся базе данных акселерограмм. Данное условия принимается по формуле (12).

$$v(T) = 1 - 0.5 \cdot e^{-0.1T} \quad (12)$$

Ввиду того, что продолжительность воздействия не является однозначно определенной величиной, имеются различные варианты оценки этой величины. По анализу имеющейся базы данных акселерограмм автором предложено учитывать продолжительность воздействия по формуле (13).

$$\tau = 10 + 2.5 \cdot T \quad (13)$$

Итоговое выражение для коэффициента динамичности с учетом вышеперечисленных факторов показано в формуле (14).

$$\beta(T, \xi) = \beta_{\infty}(\xi) \cdot K_{\tau}(T, \xi) = \frac{1 - e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot (10 + 2.5 \cdot T)}{T}}}{(2 \cdot \xi)^{1 - 0.5 \cdot e^{-0.1T}}} \quad (14)$$

В работе проиллюстрировано, что полученные результаты в виде коэффициентов коррекции спектров относительно базового, которое соответствует затуханию 5% от критического, в целом согласуются с существующими зависимостями, что проиллюстрировано на рисунке 4.

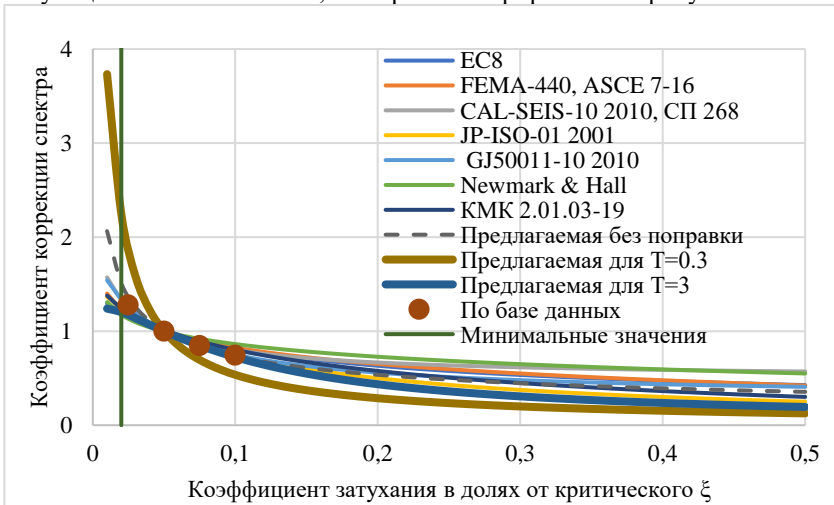


Рисунок 4 – Сопоставление полученных результатов с существующими

В качестве альтернативного упрощенного подхода предложена аппроксимация осреднённых значений динамического коэффициента для диапазона периодов строительных конструкций от 0 до 3 с. Этой области соответствуют большинство упругих периодов строительных конструкций. Рассмотренные значения коэффициентов динамичности показаны на рисунке 5.

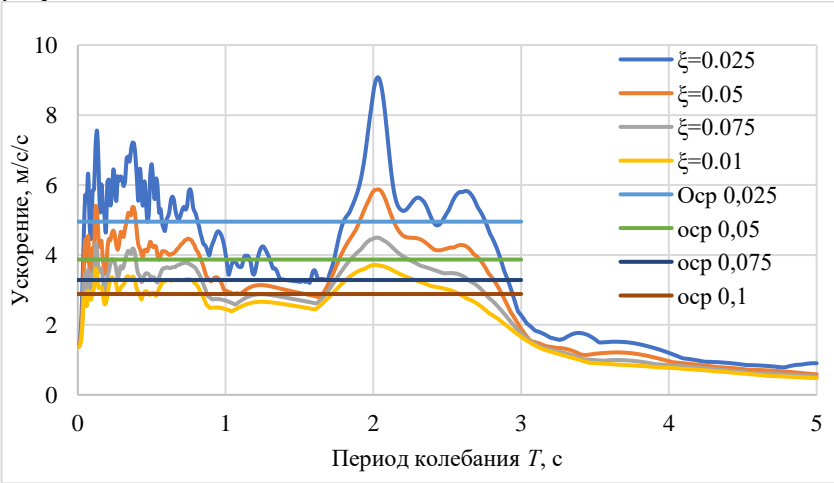


Рисунок 5 – Огибающая спектров ответа ускорений по базе акселерограмм в зависимости от периода колебаний T для соответствующих коэффициентов затухания ξ с учетом осреднения в интервале периодов от 0 до 3 с

Полученные результаты лучше всего аппроксимируются выражением (15), полученные результаты приведены в таблице 4.

$$\beta(\xi) = \frac{1}{\xi^{0.45}} \quad (15)$$

Таблица 4. Сопоставление аппроксимации с результатами

Коэффициент затухания в долях от критического ξ	0.025	0.05	0.075	0.1
Средние значения огибающей спектров ответа ускорений, m/c^2	4.95	3.87	3.28	2.88
Результаты по осредненной аппроксимации	5.20	3.81	3.18	2.80
K_{ψ} по средним значениям огибающей для базового 0.05	1.28	1.00	0.85	0.75
K_{ψ} по СП 268.1325800.2016	1.25	1	0.875	0.8

4. Методика дифференцированного учета повреждений в ЛСМ на основе задания коэффициентов пластичности μ для отдельных элементов, позволяющая моделировать сценарии разрушения и комплексно учитывать различные механизмы демпфирования.

Известным фактом является то, что учет повреждений не может характеризоваться единым коэффициентом K_1 . Основными недостатками учета интегрального коэффициента является:

- Во многих работах показано, что повреждения в конструкции не происходят однородно во всех элементах. Следовательно, нужно учитывать неравномерность распределения повреждений, а еще лучше – контролировать их распределение.
- Единый коэффициент повреждений не позволяет оценить затраты на ремонт конструкции, а следовательно, не может быть использован для многоуровневого проектирования сооружений.
- Нет возможности задания реализации механизма накопления повреждений, который может быть индивидуальным для различных конструктивных схем и геометрии сооружений.

Для решения описанных задач по ЛСМ предлагается учитывать неравномерное распределение повреждений путем линеаризации схемы в окрестности ожидаемого уровня повреждений. Данная концепция строится на применении разработанной П. Гюлканом, А. Шибатой, М. Созе-ном методом заменяемой конструкции (англ. Substitute-structure method), известный также как эквивалентный линейный метод расчета на сейсмостойкость. Он основывается на том, что учет повреждений моделируется через замену линейной жесткости конструктивного элемента на секущую жесткость в окрестности ожидаемого уровня повреждений и увеличением демпфирования повреждаемого элемента за счет образования гистерезисной петли на диаграмме «усилие-деформация» элемента. Общий принцип эквивалентной линейной модели показан на рисунке 6.

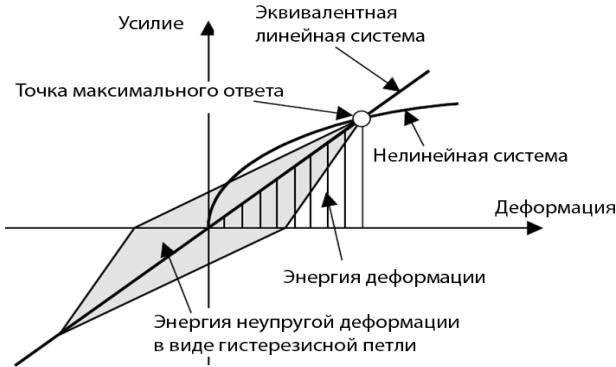


Рисунок 6 – Учет эквивалентного демпфирования для упругопластической системы

Уровень повреждений в данном случае характеризуется коэффициентом пластичности μ , а модель поведения конструктивного элемента рассматривается как упругопластическая.

Значение затухания от уровня повреждений в настоящей работе принято по исследованиям М. Огузмерта и Э. М. Лиу. Выражения для зависимости затухания в зависимости от уровня повреждений показаны в формулах (16) и (17).

$$\xi_{eff} = \xi_0 + \xi_h(\mu) \quad (16)$$

$$\xi_h = 0.1 \cdot \ln(\mu) \quad (17)$$

$$dK = \frac{K_e}{K_{eff}} = \mu^{0.57}, \quad (18)$$

где ξ_{eff} – эффективное затухание в долях от критического, ξ_0 – начальное значение затухания в материале в долях от критического, ξ_h – эквивалентное гистерезисное демпфирование в долях от критического, μ – коэффициент пластичности, dK – отношение упругой жесткости системы K_e к жесткости линейризованной упругопластической схемы K_{eq} .

В настоящей работе предложено развитие метода замещенной конструкции, позволяющее учитывать нелинейное поведение конструкций в линейной постановке задачи. Ключевым преимуществом подхода является совместный учет различных механизмов демпфирования, включая гистерезисное затухание от пластических деформаций, демпфирование в сейсмоизолированных системах, энергопоглощение в грунтовых основаниях и другие составляющие рассеивания энергии, а также применение уточнен-

ного коэффициента динамичности — все это реализовано в рамках системной доработки ЛСМ. В отличие от традиционного подхода, используются более современные соотношения между жесткостью и пластичностью элементов. Такой комплексный подход обеспечивает более обоснованное распределение расчетных усилий и позволяет качественно моделировать распределение повреждений по конструкции, что с большей вероятностью будет соответствовать результатам ресурсоемкого нелинейного анализа. При этом разработанная методика не требует итерационного назначения начальной жесткости, что исключает соответствующий источник неопределенности и существенно упрощает процесс проектирования.

5. Сбалансированная система расчетных коэффициентов для практического применения усовершенствованного ЛСМ.

В рамках реализации усовершенствованного линейно-спектрального метода разработана сбалансированная система расчетных коэффициентов, обеспечивающая практическое применение ЛСМ для широкого класса строительных конструкций. Система включает два взаимодополняющих набора коэффициентов - расширенный и упрощенный, позволяющие адаптировать точность расчетов к требованиям конкретных проектных задач. Расширенный набор, содержащий большее число параметров, обеспечивает детальный учет специфики сейсмического воздействия, в то время как упрощенный вариант, содержащий меньшее число параметров, предлагает инженерно-практический подход с возможностью гибкого конструирования спектра ответа для различных грунтовых условий и местных сейсмологических особенностей. Особенностью системы является сохранение преимущественности с традиционными нормативными подходами для объектов массового строительства при одновременном обеспечении повышенной точности расчетов для специальных сооружений, включая конструкции с нерегулярной динамической схемой, системы с сейсмоизоляцией и демпфированием. Разработанные коэффициенты демонстрируют физическую корректность и устойчивость результатов при варьировании исходных параметров, что создает теоретические предпосылки для их успешного практического применения.

Сейсмическая нагрузка определяется по выражениям (19) и (20).

$$S_{ik} = PGA_0(T_n) \cdot SA(T, \xi_i, \mu) \cdot m_k \cdot \eta_{ik} \quad (19)$$

$$SA(T, \xi_i, \mu) = K_{PGA}(T) \cdot \beta_i(\xi_i, T, \mu) \quad (20)$$

Расширенный набор коэффициентов учитывает зависимость (22) для задания $PGA(T)$ и зависимость (21) для задания $\beta(\xi)$. Полученная нагрузка на единицу массы сооружения для $PGA_0=1$ м/с² показана на рисунке 7.

$$\beta(T, \xi) = \frac{1 - e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot (10 + 2.5 \cdot T)}{T}}}{(2 \cdot \xi)^{1 - 0.5 \cdot e^{-0.1 \cdot T}}} \quad (21)$$

$$PGA(T) = 12.64 \cdot e^{-\left(\frac{T+7.73}{4.16}\right)} + \frac{29.76}{(T+2.52)^2} \quad (22)$$

$$K_{PGA}(T) = \frac{PGA(T)}{PGA(0.4)} \quad (23)$$

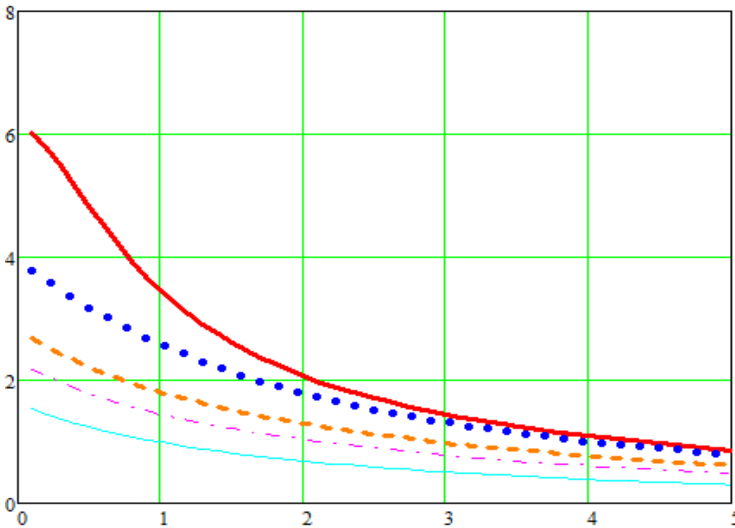


Рисунок 7 – Полученные значения нагрузки с учетом расширенной системы коэффициентов на единицу массы для $PGA_0 = 1 \text{ м/с}^2$ в зависимости от периода колебаний. Сверху вниз для $\xi = 0.02; 0.05; 0.1; 0.15; 0.3$

Упрощенный набор коэффициентов учитывает зависимость (25) для задания $PGA(T)$ и зависимость (24) для задания $\beta(\xi)$. Полученная нагрузка на единицу массы сооружения для $PGA_0 = 1 \text{ м/с}^2$ показана на рисунке 8.

$$\beta(\xi) = \frac{1}{\xi^{0.45}} \quad (24)$$

$$K_{PGA}(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{1.4}\right)^2} \quad (25)$$

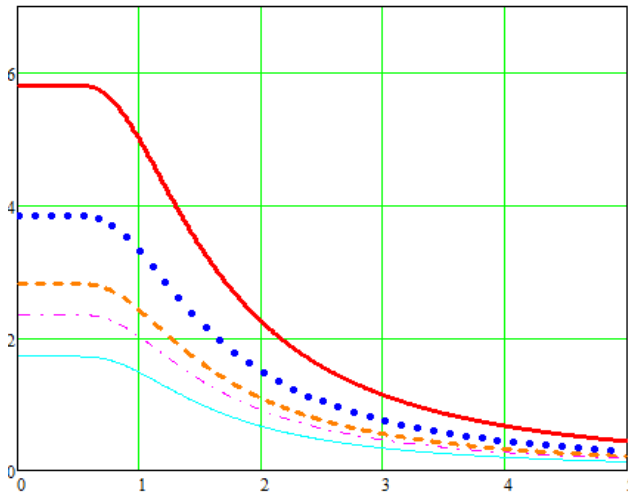


Рисунок 8 – Полученные значения нагрузки с учетом упрощенной системы коэффициентов на единицу массы для $PGA_0 = 1\text{ м/с}^2$ в зависимости от периода колебаний. Сверху вниз для $\xi = 0.02; 0.05; 0.1; 0.15; 0.3$

Верификация разработанного усовершенствованного линейно-спектрального метода выполнена на основе комплекса аналитических и численных расчетов с применением современных программно-вычислительных комплексов. Проведено сравнительное моделирование динамического поведения разнотипных сооружений с использованием традиционных нормативных методик и предлагаемого подхода. Анализ результатов подтвердил корректность и практическую эффективность разработанных решений:

Объекты массового строительства (4-этажное кирпичное и 9-этажное крупнопанельное здания): показано соответствие результатов предлагаемого метода нормативным значениям при периодах колебаний около 0.5 с. с одновременным устранением существующих противоречий в оценке влияния грунтовых условий

Системы с неоднородным демпфированием (водонапорная башня): проиллюстрирован учет влияния различных параметров демпфирования на динамический отклик сооружения, показана возможность варьирования коэффициента затухания в широком диапазоне в зависимости от конструктивных особенностей.

Конструкции с прогнозируемым распределением повреждений (мостовое сооружение, расчетная схема сформирована в Midas Civil и показана на рисунке 9):

- Однородное распределение повреждений: показано, что существующий нормативный подход с единым коэффициентом может быть реализован в рамках предлагаемой методики;
- Неоднородное распределение: реализована методика контролируемого повреждения с выборочным ограничением зон неупругих деформаций;
- Сейсмоизолированные системы: продемонстрирована возможность реализации методики контролируемого повреждения для конструкций с устройствами сейсмозащиты;
- Сравнительный анализ с результатами нелинейного динамического расчета подтвердил корректность математического аппарата и физическую обоснованность предлагаемой методики.

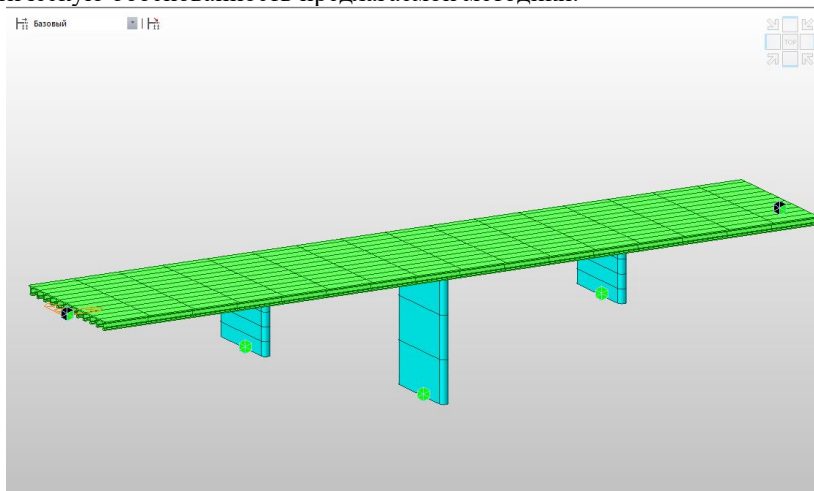


Рисунок 9 – Общий вид расчетной схемы в Midas Civil

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Действующий линейно-спектральный метод (ЛСМ) устарел и не соответствует современным данным о сейсмических воздействиях (ШСИ-17) и задачам многоуровневого проектирования (*PBSD*). Разработан новый, усовершенствованный вариант ЛСМ.

2. Интенсивность сейсмического воздействия (*PGA*) зависит не только от балльности, но и от спектрального состава воздействия. Предложена новая зависимость $PGA(T)$, которая устраняет противоречие со шкалой ШСИ-17 и корректно описывает связь между ускорениями, скоростями и смещениями грунта.

3. Вместо использования нормативного спектра с поправочным коэффициентом K_v , предложен принципиально иной подход. В нем коэффициент динамичности β определяется непосредственно через демпфирование ξ в системе. На основе обработки базы из 200 акселерограмм сильных землетрясений получены новые зависимости $\beta(\xi)$, более точно отражающие реакцию конструкций.

4. Единый коэффициент K_1 , учитывающий допустимые повреждения, не отражает реальной картины. Вместо него предложена методика дифференцированного учета повреждений через задание коэффициентов пластичности μ для отдельных элементов. Это позволяет моделировать сценарии разрушения и перераспределение усилий.

5. Метод адаптирован для:

- Многоуровневого проектирования (PBSD): Предложены три уровня воздействия (ПЗ, УЗ, МРЗ) с соответствующими критериями.
- Расчета сложных систем: Показана возможность применения метода к системам с неоднородным демпфированием, сейсмоизоляцией, устройствами гашения колебаний, а также к сложным конструктивным схемам.

6. На примерах зданий массовой застройки показано, что предложенный метод дает сопоставимые с нормами результаты для типовых случаев, обеспечивая преемственность. Для нетиповых случаев (разные грунты или затухание) метод дает более обоснованные и точные результаты.

7. Для дальнейшего развития метода требуются:

- Накопление и анализ новых записей сильных землетрясений.
- Уточнение влияния длительности воздействия.
- Исследование поведения материалов при высоких уровнях демпфирования ($\xi > 0.15$) и пластичности ($\mu > 5$).
- Уточнение предлагаемой методики учета повреждений для различных конструктивных схем.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним

1. Развитие нормативной базы сейсмостойкого строительства в России / А. М. Уздин, Г. В. Сорокина, Д. М. Жемчугов-Гитман [и др.] // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2023. – № 3(64). – С. 18-25. – EDN XRTRMO.

2. Жемчугов-Гитман, Д. М. Аппроксимация зависимости пиковых ускорений от преобладающего периода на акселерограмме для расчетов сооружений по линейно-спектральной методике / Д. М. Жемчугов-Гитман, Г. В. Сорокина, А. М. Уздин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2023. – № 4(65). – С. 24-28. – EDN KXPXSB.

3. Жемчугов-Гитман, Д. М. Введение поправки на демпфирование в расчетах по линейно-спектральной теории сейсмостойкости / Д. М. Жемчугов-Гитман // Вестник гражданских инженеров. – 2024. – № 2(103). – С. 51-61. – DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-2-51-61. – EDN STAUNHV.

4. Жемчугов-Гитман, Д. М. Неоднородное распределение повреждений при расчете по линейно-спектральной теории сейсмостойкости вместо единого коэффициента допускаемых повреждений / Д. М. Жемчугов-Гитман // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2024. – № 2(69). – С. 27-33. – DOI 10.55341/ptrbs.2024.69.2.002. – EDN WTIIYVS.

5. Жемчугов-Гитман, Д. М. Учет демпфирования в рамках сбалансированной системы расчетных коэффициентов линейно-спектральной методики для оценки сейсмостойкости сооружений / Д. М. Жемчугов-Гитман, Г. В. Сорокина, А. М. Уздин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2024. – № 5(316). – С. 28-41. – DOI 10.37538/0039-2383.2024.5.28.41. – EDN MDWCCA.

Статьи в других изданиях

1. Жемчугов-Гитман, Д. М. К вопросу задания уровня расчетного воздействия и надежности высотного строительства / Д. М. Жемчугов-Гитман, Л. В. Мозжухина, А. М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2021. – № 1. – С. 43-56. – DOI 10.37153/2618-9283-2021-1-43-56. – EDN EEMXDI.

2. Response-spectra method for assessing seismic resistance of structures possibilities and prospects of usage / A. V. Benin, D. Zhemchugov-Gitman, Kh. Kurbanov [et al.] // E3S Web of Conferences, St. Petersburg, 19–21 сентября 2023 года. Vol. 460. – St. Petersburg: EDP Sciences, 2023. – P. 07028. – DOI 10.1051/e3sconf/202346007028. – EDN CBNGJH.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 03.12.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 143.

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

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