

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

На правах рукописи

Прокопович Сергей Владимирович

Моделирование воздействий для оценки сейсмостойкости сооружений

Специальность: 05.23.17 Строительная механика

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук,
профессор Уздин А.М.

Санкт-Петербург - 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Анализ состояния исследуемого вопроса	12
1.1. Краткий обзор развития сейсмостойкого строительства.....	12
1.2. Развитие методов расчета сейсмостойкости зданий и сооружений	16
1.2.1. Статический метод.....	17
1.2.2. Спектральный метод.....	18
1.2.3. Расчет сооружений по акселерограммам землетрясений.....	21
1.2.4. Энергетический метод.....	25
1.2.5. Статистический метод.....	26
1.3. Цель и методы исследования	27
Глава 2. Основные характеристики сейсмических воздействий	30
2.1. Основные характеристики сейсмических воздействий и их анализ ..	30
2.2. Исследование кинематических характеристик сейсмического воздействия	34
2.3. Спектральные характеристики сейсмического воздействия.....	38
2.4. Исследование энергетических характеристик сейсмического воздействия	42
2.5. Спектральные энергетические характеристики землетрясений	51
2.5.1. Спектр работ сил пластического деформирования.....	51
2.5.2. Спектры повреждаемости сейсмического воздействия.....	55
2.6. Выводы по главе 2	57
Глава 3. Задание параметров сейсмического воздействия в зависимости от сейсмичности площадки и ответственности сооружения.....	59
3.1. Задание величины PGA в зависимости от повторяемости воздействия и сейсмической опасности на площадке строительства и срока службы сооружения	60

3.2.	Оценка доверительных границ для кинематических характеристик .	64
3.3.	Оценка доверительных границ для энергетических характеристик сейсмического воздействия.....	69
3.4.	Выводы по главе 3. Рекомендации по заданию параметров воздействия	74
Глава 4.	Модели сейсмического воздействия для ПЗ и МРЗ	77
4.1.	Задача моделирования воздействия для расчета на действие ПЗ и МРЗ	77
4.2.	Развитие методики А.А.Долгой для моделирования сейсмического воздействия	90
4.2.1.	Модернизация модели Долгой А.А.	98
4.3.	Модель Л.Н. Дмитривской	100
4.3.1.	Импульс скорости	100
4.3.2.	Реализация модели с достоверным включением импульса скорости	103
4.3.3.	Основные технические принципы, заложенные в реализацию модели Дмитривской	103
4.3.4.	Описание программы для моделирования воздействия Дмитревской Л.Н.	104
4.4.	Результаты расчёта	106
4.5.	Выводы по главе IV	114
Заключение		119
Список работ, опубликованных автором по теме диссертации		123
Библиографический список.....		125

Введение

Актуальность темы исследования. В настоящее время в мировой практике сейсмостойкого строительства остро стоит вопрос проведения динамических расчетов сооружений по акселерограммам землетрясений. Такого рода расчеты необходимы при проектировании систем сейсмогашения и сейсмоизоляции, при расчете высотных зданий, больших мостов и других ответственных объектов, при оценке повреждаемости сооружений и т.д. Особенно важными становятся динамические расчеты при переходе к многоуровневому проектированию, требующему проведения расчетов на действие землетрясений различной силы и повторяемости. Между тем, основная задача динамического расчета – задание расчетного воздействия не имеет пока приемлемого решения, а сложившиеся в настоящее время подходы к проблеме могут приводить к принятию ошибочных, в ряде случаев опасных решений. Следует отметить, что хорошо известные принципы моделирования воздействий, сформулированные в бывшем СССР классиками отечественной строительной механики, зачастую нарушаются даже при составлении нормативных документов. Сказанное делает задачу обоснования и построения расчетных моделей сейсмического воздействия исключительно актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Общие принципы моделирования воздействий для расчета сооружений сформулированы в классических работах Н.М. Герсегонова, Н.С. Стрелецкого, А.А. Гвоздева, О.А. Савинова, В.И. Сливкера, А.В. Перельмутера, И.И. Гольденבלата и других выдающихся специалистов в области расчета сооружений. Эти принципы включают

- задание воздействия, обеспечивающего определенный запас прочности проектируемого сооружения;
- ориентирование воздействия на предельное состояние сооружения;
- обеспечение экономичности принимаемых решений;
- возможность проведения инженерных расчетов сооружения на расчетное воздействие.

К сожалению, в настоящее время при создании расчетных моделей воздействия эти требования часто нарушаются. При моделировании расчетных акселерограмм в настоящее время сложилось два противоположных подхода: моделирование воздействия для площадки строительства и моделирование воздействия для сооружения.

Моделирование воздействия для площадки строительства осуществляется сейсмологами. Они пытаются учесть при этом особенности очагов землетрясения, геологию и рельеф площадки строительства, характер распространения волн от очага к площадке. При этом получается воздействие, которое должно походить на реальные воздействия на таких площадках. Исследования в этой области выполнены Ф.Ф. Аптикаевым, О.О. Эртелевой, О.В. Павленко, В.Б. Заалишвили, Тетевосяном Р.Э., В.И. Смирновым, Г.Н. Вахриной, Р. Флешем и многими другими специалистами. Эти исследования весьма полезны и проектировщику, поскольку дают представление о характере сейсмических воздействий на площадке строительства, но они совершенно не пригодны в качестве расчетных, поскольку не отвечают ни одному из целеполагающих принципов формирования расчетных моделей.

В сейсмостойком строительстве расчетные модели ориентировались на их опасность для рассчитываемого сооружения и возможность проведения анализа поведения конструкции. Первые модели, использованные основоположниками сейсмостойкого строительства Ф. Омори, С. Суэхиро К.С. Завриевым представляли собой гармоническое воздействие. С середины 50-х годов прошлого века в связи с развитием вычислительной техники Г. Хаузнер, М. Био и другие специалисты начали использовать расчеты по акселерограммам прошлых землетрясений. При этом быстро появилось понимание того, что расчет на единственную акселерограмму представляет собой единичную реализацию случайного процесса и может дезориентировать проектировщика при принятии инженерных решений. Работы А.Д. Абакарова, И.Л. Корчинского, М.Ф. Барштейна, В.В. Болотина, А.А. Петрова, Ш.Г. Напетваридзе, О.А. Савинова, Т.А. Белаш, И.У. Альберта, С.В. Елизарова, Г.В. Давыдовой и других специалистов привели к необходимости

рассматривать пакеты из десятков акселерограмм, принимая каждый расчет как реализацию случайного процесса, и затем усреднять полученные результаты по выборке. Процесс оказался достаточно трудоемким и неудобным для инженерных расчетов. В связи с этим появились предложения генерации одного короткого временного процесса, удовлетворяющего названным принципам моделирования воздействий. Такого рода процессы предлагались Х. Эпштейном, Г.П. Джонсоном, В.В. Костаревым, А.Т. Аубакировым, Р.Н. Гузеевым, Г.Б. Аннаевым, А.А. Долгой и другими специалистами. Критерий опасности воздействия обеспечивался в них наличием в процессе резонансной частоты воздействия. В частности, А.А.Долгая предложила процесс из 3 затухающих синусоид с 6 неопределенными параметрами, которые должны обеспечить близость модельного и реальных процессов. С реальными воздействиями у рассматриваемых процессов совпадало пиковое значение ускорений (PGA).. Вопрос корректного задания других характеристик воздействия обсуждался в литературе. Прежде всего, О.А. Савиновым, Т.А. Белаш, А.М. Уздиным, В.М. Грайзером и другими специалистами было установлено, что ряд характеристик сейсмического воздействия зависит от его спектрального состава. В частности, в работе А.А.Долгой была установлена зависимость пиковых ускорений от преобладающего периода на акселерограмме землетрясения.

А.А.Долгая, А.В.Индейкин предложили помимо PGA учитывать интенсивность воздействия по Ариасу. К настоящему времени А.А. Петровым, Ю.Л. Рутманом, А.М. Уздиным, А.Дж Шивуа, К. Кэмпбеллом, Y. Vozorgnia было предложено использовать такие характеристики как плотность сейсмической энергии SED, кумулятивная абсолютная скорость CAV, интенсивность по Ариасу, которые в купе со спектральными и кинематическими характеристиками достаточно полно могли использоваться для описания сейсмического воздействия. Однако количественные значения рассматриваемых параметров, которые можно было бы использовать при создании расчетной модели воздействия, до сих пор отсутствуют.

Для учета широкого класса параметров сейсмического воздействия А.М. Уздин и Л.С. Дмитриевская предложили дополнить модель А.А.Долгой импульсом скорости. Эта модель имела уже 13 неопределенных параметров. Попытки реализации такой модели предпринимались О.П.Нестеровой и Н.В. Никоновой, однако используемые ими ресурсы ЭВМ не позволили решить задачу.

Цель исследования – установить характеристики сейсмических воздействий, определяющих их опасность для разных предельных состояний сооружения и разработать методику моделирования расчетных сейсмических воздействий при многоуровневом проектировании конструкций с заданными предельными состояниями.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Изучить основные характеристики сейсмических воздействий
2. Разработать рекомендации по заданию параметров сейсмического воздействия при многоуровневом проектировании;
3. Разработать методику задания уровня сейсмического воздействия в зависимости от сейсмичности площадки строительства, ответственности сооружения и его динамических характеристик;
4. Предложить и реализовать расчетную модель сейсмического воздействия, удовлетворяющую основополагающим принципам моделирования воздействий, и учитывающую наиболее существенные характеристики прошлых землетрясений

Новизна результатов исследований:

1. Установлены основные характеристики землетрясений и получены оценки этих характеристик для моделирования сейсмических воздействий; предложены новые характеристики для оценки степени опасности сейсмического воздействия
2. Разработана методика задания расчетного уровня сейсмического воздействия с учетом сейсмической опасности территории и срока службы сооружения для проведения расчетов на действие ПЗ и МРЗ

3. Реализована новая модель расчетной акселерограммы, соответствующая по характеристикам реальным сейсмическим воздействиям и учитывающая ожидаемые предельные состояния рассчитываемой конструкции.

Методология и методы исследования

Для достижения поставленных задач в диссертационной работе использовались методы строительной механики, динамики сооружений, математической статистики, а также методы математического моделирования сейсмических колебаний на ЭВМ. Результаты исследований сопоставлялись с опубликованными результатами расчетов других авторов.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в том, что выполнены анализ и оценка характеристик сейсмического воздействия с точки зрения задач сейсмостойкого строительства, а также выполнен подробный сравнительный анализ существующих моделей сейсмического воздействия.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в возможности выполнять оценку сейсмостойкости сооружений, когда сейсмологическая информация на площадке строительства ограничена или отсутствует. Таким образом, предложенная методика необходима при оценке сейсмостойкости сооружения в условиях ограниченной информации о сейсмическом воздействии на площадке строительства, а также при разработке типовых проектов, когда площадка строительства не определена.

Объект исследования: сейсмическое воздействие.

Предмет исследования: опасность сейсмического воздействия для проектируемого сооружения при заданном уровне предельного состояния.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 05.23.17 – Строительная механика, направление соответствует п. 7 паспорта специальности: «Теория и методы расчета сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы и так далее)».

Достоверность основных положений диссертационной работы подтверждается сопоставлением полученных результатов с имеющимся опытом

прошлых землетрясений и данными других исследований, выполненных по отдельным вопросам, рассмотренным в диссертации.

Положения, выносимые на защиту

Сейсмическое воздействие определяется кинематическими, спектральными и энергетическими характеристиками. Причем кинематические характеристики существенно зависят от преобладающего периода колебаний, а энергетические характеристики не зависят от преобладающего периода воздействия.

При задании расчетного уровня сейсмического воздействия следует исходить из натурных данных, представленных в инструментальной части шкалы балльности Ф.Ф. Аптикаева, но учитывать дополнительно зависимость пиковых ускорений от преобладающего периода воздействия, а также необходимость обеспечения его энергетических параметров

В расчетах на ПЗ определяющими параметрами воздействия являются кинематические, а для расчета на МРЗ – энергетические. В работе даны оценки этих параметров на основе статистической обработки около 100 записей сильных землетрясений

Для учета всех параметров сейсмического воздействия при его моделировании целесообразно представить воздействие в виде суммы импульса скорости и колебательного процесса с нулевыми остаточными смещениями, что позволяет достичь требуемых величин характеристик. Степень учёта характеристик воздействия регулируется весовыми коэффициентами, которые должны существенно различаться при моделировании на ПЗ и МРЗ и отличаться при проектировании пластичных и хрупких сооружений.

В процессе исследований разработана программа генерации расчетных акселерограмм, позволяющая более полно учесть кинематические, спектральные и энергетические характеристики сейсмических воздействий. Реализация программы оказалась возможной за счет распараллеливания процессов вычислений на видеокарте.

Апробация результатов

Результаты исследований докладывались на конференциях

- XXVII International Conference «Mathematical and Computer Simulation in Mechanics of Solids and Structures» MCM-2017. Fundamentals of static and dynamic fracture. Санкт-Петербург, 25-27 сентября 2017;
- X международная конференция по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте, Санкт-Петербург, 2017 г.;
- 16th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Regulation of Dynamic Characteristics of Structures, г. Санкт-Петербург, 01-06 июля 2019 г.;
- IX Савиновские чтения, Санкт-Петербурге в 2020 г.;
- на научных конференциях ПГУПС в 2017-2020 гг.

Публикации

Результаты основных исследований по теме диссертации были опубликованы в 14 научных статьях, среди которых 6 – в рецензируемых изданиях из перечня журналов ВАК, 1 статья – в журнале, который входит в базы цитирования Web of Science и Scopus, и 6 – в журналах, входящих в базу данных РИНЦ. Также была зарегистрирована программа в базе данных РОСПАТЕНТ.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 137 страницах печатного текста, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 174 источника, в том числе 44 на иностранном языке. В работе представлено 54 рисунка, 15 таблиц и 75 формул.

Первая глава работы – анализ состояния исследуемого вопроса. Изучены основные этапы становления теории сейсмостойкости. Для реализации системного подхода, а именно учёта недостатков и достоинств существующих методов при разработке нового метода моделирования воздействия рассмотрены статьи и работы, посвящённые данному вопросу. Проанализированы требования существующих норм разных стран мира к заданию расчётного сейсмического воздействия.

Вторая глава работы - оценка характеристик сейсмического воздействия. В работе выделено три типа характеристик: кинематические, спектральные и

энергетические. При их анализе используется база 9-балльных воздействий из 93 акселерограмм, собранная российскими и китайскими специалистами.

Третья глава диссертации - разработка методики задания уровня сейсмического воздействия в зависимости от сейсмичности площадки строительства и ответственности сооружения и его динамических характеристик. Уровень воздействия задается исходя из вероятности его возможного превышения на площадке строительства за расчетный срок службы сооружения. Сейсмическая опасность территории задается картами ОСР. Пиковое ускорения связывается с расчетной балльностью в соответствии с данными ГОСТ Р 57546-2017 «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности». Дополнительно к величине расчетного ускорения вводится поправка, учитывающая спектральный состав воздействия. Для реализации методики разработано программное обеспечение, зарегистрированное в базе данных ФИПС «Программы для ЭВМ с 2013 года».

Четвёртая глава посвящена разработке рекомендаций по моделированию сейсмических воздействий для многоуровневого проектирования конструкций. Предложено моделирование воздействия в виде суммы осциллирующего процесса и импульса скорости. Процесс описывается с помощью 13 неопределенных параметров, которые назначаются так, чтобы обеспечить соответствие основных параметров расчетного воздействия и аналогичных параметрами реальных акселерограмм. Соответствие параметров определяется с некоторыми заданными весовыми коэффициентами. Задание этих коэффициентов позволяет увязать воздействие с соответствующим предельным состоянием. При расчёте на ПЗ более значимыми являются кинематические характеристики сейсмического воздействия, при МРЗ – энергетические.

Глава 1. Анализ состояния исследуемого вопроса

1.1. Краткий обзор развития сейсмостойкого строительства

Первое описанное землетрясение, вызвавшее человеческие жертвы, случилось в Китае в 780 г до н.э. Также землетрясения упоминаются в библейских сказаниях о Моисее, жизнь которого датируется XIII-XII вв до н.э. Рациональных методов борьбы до IV в. до н.э. с сейсмическими воздействиями не существовало. В период античности (IV в до н.э. – VI в н.э.) зодчие, опираясь на опыт разрушений, которые были вызваны сейсмическими воздействиями, начали пытаться снижать ущерб от последствий сильных землетрясений, принимая на интуитивном уровне различные инженерные решения.

Инки стали первой цивилизацией, обратившей внимание на сейсмостойкость капитальных сооружений и разработавшей первые меры по увеличению сейсмостойкости сооружений [61]. Принцип строительства сейсмостойких сооружений заключался в

- Обеспечении независимых перемещений элементов конструкции относительно друг друга без их обрушения (строительные растворы не использовались, элементы плотно подгонялись друг к другу (приполировывались), имея при этом возможность подвижки по поверхности контакта);
- Намеренном увеличении пространственной жёсткости сооружения (наклон к оси сооружения стен, что позволяло образовывать жёсткие своды);
- Облегчении потенциально опасных для обрушения элементов (соломенные крыши).



Рисунок 1.1 — Сохранившееся строение инков

Вторыми были японцы, которые в ходе реставрационных работ начали делать выводы по поводу факторов, влияющих на сейсмостойкость сооружений, основным из которых является вывод о влиянии веса элементов на разрушающие усилия [46, 64].

Наряду с конструктивными мерами по антисейсмическому усилению надземной части, развивались сейсмозащитные устройства. В их числе были фундаменты со скользящим основанием. Первыми среди них появились подушки из чистой гончарной глины, которая при поддержке естественной влажности сохраняет свои упругопластические свойства [59,117]. Принцип работы таких устройств заключался в поглощении части сейсмической энергии за счет пластического деформирования основания.

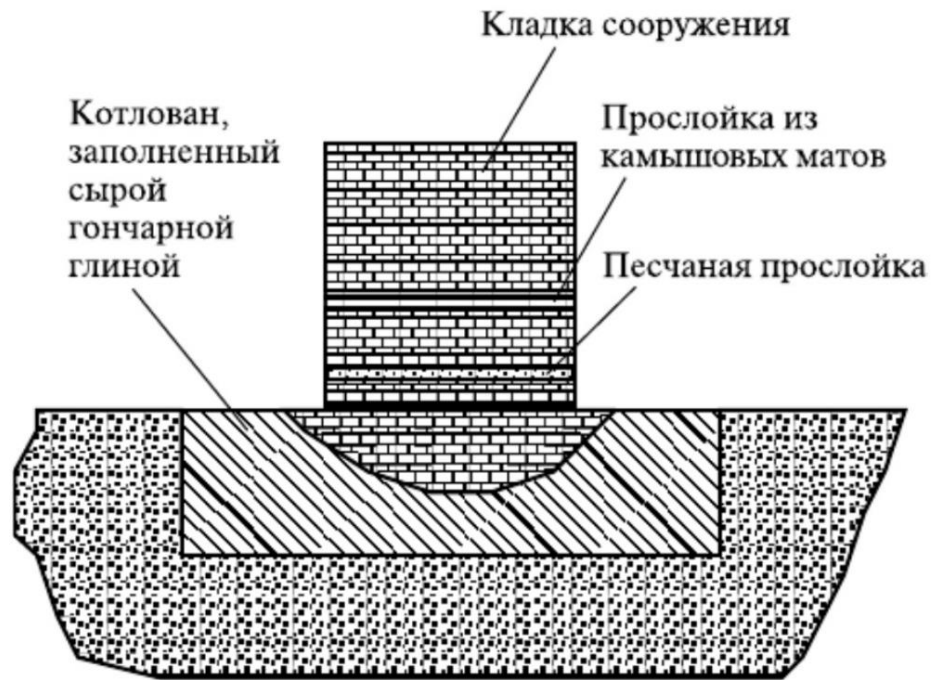


Рисунок 1.2 — Принципиальная модель фундамента, гасящего сейсмические колебания

Немногим позже стали появляться устройства, которые позволяли передавать сооружению лишь часть энергии землетрясения за счёт проскальзывания соединяемых частей сооружения относительно друг друга. К ним относятся [59, 64, 88]:

1. Устройство на стыке фундамента и цоколя горизонтального шва под всем зданием на тощем лессовом растворе с песком;
2. «Камышовые пояса»;
3. Сооружения на шарах.

Таким образом, сейсмозащитные устройства разделились на сейсмогасители и сейсмоизоляторы, которые, соответственно, в идеале, снижали сейсмическую нагрузку и вовсе исключали передачу колебаний земной коры на конструкцию сооружения.

Колебания поверхности земли удалось зафиксировать ещё во II в. китайскому учёному Чжану Хэну [61], однако только начиная с XX века, благодаря развитию электрических приборов, начинаются успешные попытки зафиксировать инструментальные параметры сейсмического воздействия.

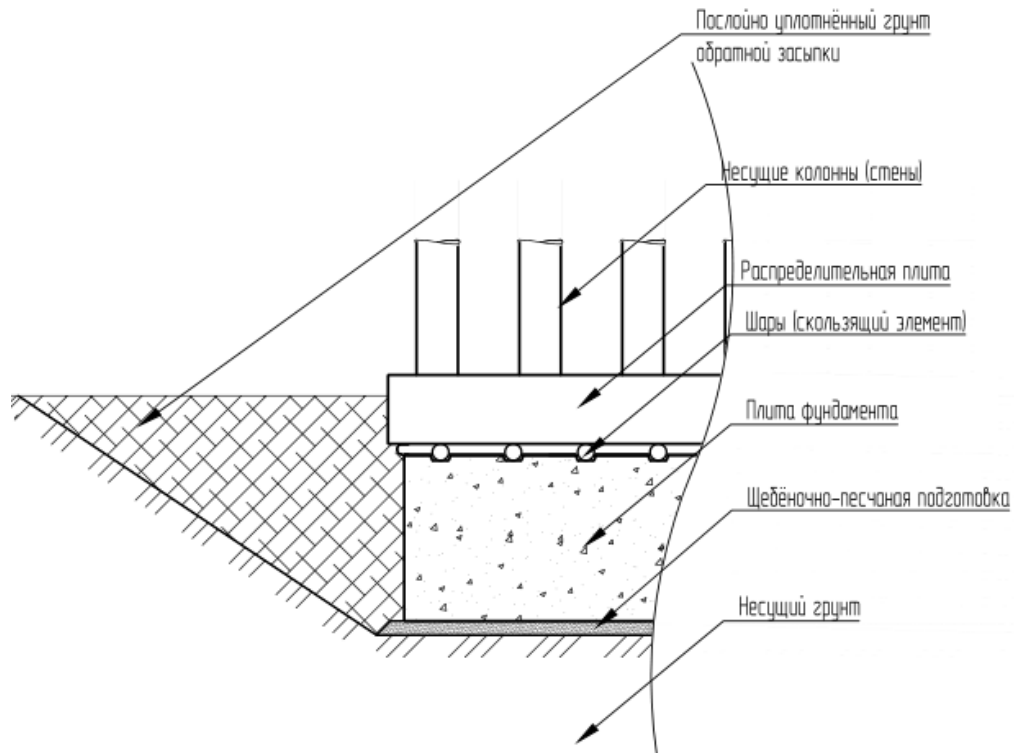


Рисунок 1.3 — Принципиальная модель сейсмоизолятора

Вплоть до этого момента эти данные были неточными, а сила землетрясения оценивалась зачастую субъективно. Поэтому первой более-менее достоверной оценкой силы землетрясения разумно считать балл. Балл позволял оценить интенсивность землетрясения не только на основании ощущений обывателей, но и на основе поведения окружающих конструкций и предметов. В настоящее время существует и используется целый ряд сейсмических шкал:

- Шкала Медведева — Шпонхойера — Карника (MSK-64)[46, 68].
- Европейская макросейсмическая шкала [154].
- Шкала Меркалли [46, 68].
- Шкала Японского метеорологического агентства [46, 68].
- Шкала Аптикаева Ф.Ф. [8]

Основные достоинства балла, как характеристики сейсмического воздействия — отсутствие необходимости наличия специальных приборов, и, как следствие, возможность получить данные о сейсмической активности практически в любом населённом пункте мира. Недостаток заключается в том, что балл не

характеризует воздействие с точки зрения расчета сооружений и не позволяет дать прогноз повреждений для сооружений, не описанных в шкале балльности.

Для того, чтобы иметь возможность использовать балл для проектирования сейсмостойких конструкций, учёные начали с поиска и задания величин характеристик сейсмических воздействий, соответствующих определённой интенсивности. Первой работой этого направления является исследование японского ученого Омори, выполненное в 1900 г [166], который предлагал использовать ускорения основания при расчётах. Он не имел возможности непосредственно замерить ускорение, а получил сейсмограмму землетрясения. Дифференцируя эту запись, он получил расчетное ускорение $PGA = 1 \text{ м/с}^2$. Полученное им ускорение стало использоваться в инженерной практике.

До появления численных характеристик сейсмического воздействия сейсмостойкое строительство опиралось на общие правила строительства, которые были основаны на опыте прошлых землетрясений. С появлением числовых значений можно говорить о сейсмостойком строительстве, как научном направлении, а обеспечение сейсмостойкости становится инженерной задачей. Для ее решения начали разрабатываться соответствующие методы расчета, рассмотренные ниже.

1.2. Развитие методов расчета сейсмостойкости зданий и сооружений

В настоящий момент можно выделить следующие методы расчёта сооружений на сейсмические воздействия:

- Статический метод;
- Спектральный метод;
- Динамический метод;
- Энергетический метод;
- Статистический метод.

1.2.1. Статический метод

В 1900 году японский ученый Омори разработал методику [166], в которой пренебрегалось возникновением усилий от колебаний конструкции, а сейсмические силы определялись по формуле

$$S = k_C \cdot Q, \quad (1.1)$$

где $k_C = w_0 / g_C$. Здесь w_0 - максимальное сейсмическое ускорение основания, а $Q = mg$. Точка приложения сейсмической силы находилась в центре тяжести конструкции. Такая методика расчета получила название статической.

При этом в качестве расчётного ускорения w_0 Омори принимал полученные им значения пиковых ускорений (peak ground acceleration) $PGA=1 \text{ м/с}^2$. С использованием статической теории было построено много зданий и сооружений и большинство из них удовлетворительно перенесло сильные землетрясения.

В 1923-25 гг. Мононобэ [163] и К.С.Завриев [45] предложили рассматривать колебания системы при гармоническом возмущении. При этом Мононобе рассматривал установившиеся вынужденные колебания, а К.С.Завриев рассматривал движение системы, как сумму вынужденных и собственных колебаний. Они, на основании расчёта колебательной системы на одночастотный гармонический процесс, предложили ввести в формулу Омори (1.1) для определения сейсмической силы коэффициент динамичности β :

$$S = k_C \cdot \beta \cdot Q, \quad (1.2)$$

$$\beta = \frac{\cos \omega_0 t - \cos \omega t}{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}}, \quad (1.3)$$

где ω_0 - собственная частота колебаний системы, ω - частота сейсмического воздействия.

В 1923 г японский ученый Сюэхиро создал первый акселерограф, и замерил ускорения при землетрясении Мино-Овори. Оно оказалось равным примерно 4 м/с^2 . Таким образом возник первый парадокс теории сейсмостойкости: как сооружения, запроектированные на ускорения 1 м/с^2 переносят землетрясения с ускорениями в несколько раз превышающими расчетные? При этом оказалось, что

сооружения, запроектированные на ускорение 1 м/с^2 , удовлетворительно переносили реальные землетрясения.

Развитию динамического метода расчета в то время препятствовало отсутствие записей реальных воздействий. Поэтому до конца 40-х годов прошлого века во всем мире господствовала статическая теория сейсмостойкости.

Попытки уточнить расчет сооружений на сейсмические воздействия привели к созданию спектрального метода расчета, обобщающего формулы (1.2) и (1.3).

1.2.2. Спектральный метод

С 1923 года пополнялась база записей сильных землетрясений. К концу 40-х годов прошлого века береговая служба США имела записи около семисот сильных землетрясений. Анализ этих записей и реакции на них сооружений показал наличие зависимости сейсмических нагрузок от периода колебаний сооружения. Эта зависимость была представлена в форме спектров ответа, представляющего собой функцию смещений, ускорений и других факторов, описывающих колебания маятника, от его периода колебаний. Это позволило в 1950-х годах положить начало развитию спектрального метода расчета сейсмостойкости сооружений. Основы спектрального метода были заложены в США Хаузером и Био. Спектральный метод подразумевает оценку откликов по формам колебаний. Когда отклики найдены, определяется сейсмическая нагрузка по каждой форме. Далее сейсмические нагрузки суммируются и прикладываются в центре тяжести сооружения.

В СССР основы спектральной методики заложены и внедрены в практику расчетов И.Л.Корчинским. Им предложена вошедшая в сейсмические нормы спектральная кривая коэффициента динамичности β и разработаны формулы практического определения действующих на здания и сооружения сейсмических нагрузок. Основная формула, по которой вычисляется усилие в j -ой массе при колебании по i -ой форме

$$F_{i,j} = m_j \cdot g \cdot \kappa_c \cdot S(k, \zeta), \quad (1.4)$$

где $S(k, \zeta)$ – спектр отклика, зависящий от частоты k и затухания в долях критического ζ . Стоит отметить, что И.Л. Корчинский не смог задать реальное

значение пиковых ускорений, сохранив старый коэффициент сейсмичности K_c . Позже, в СНиП – II -7-81 вместо коэффициента сейсмичности было введено произведение $A_{max} \cdot k_1$ и формула (1.3) приняла вид

$$F_{i,j} = m_j \cdot g \cdot A_{max} \cdot K_1 \cdot \beta(k, \zeta), \quad (1.5)$$

где A_{max} – ускорение основания в долях g , K_1 – коэффициент предельных состояний. Вид кривой динамичности изображён на рисунке 1.4

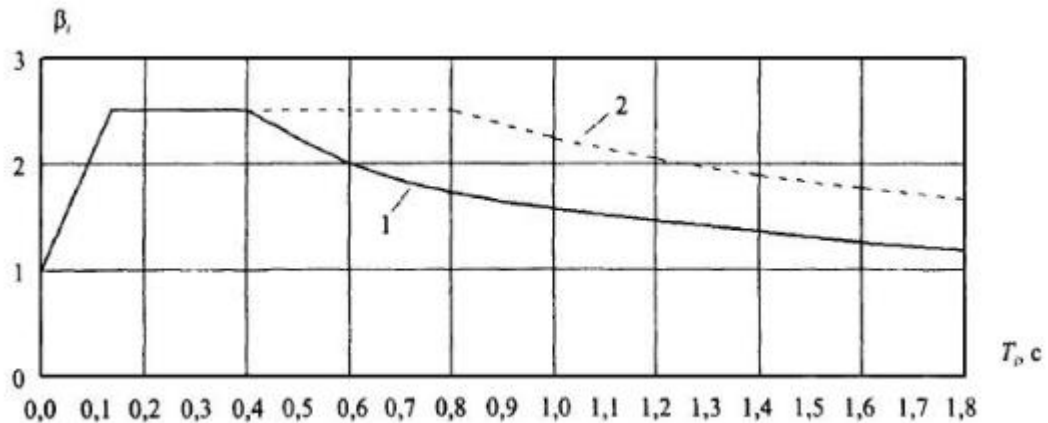


Рисунок 1.4 — Кривые динамичности из [108, 109] для 1 - грунтов I и II категории; 2 – грунтов III категории

В действующих российских нормах спектр отклика регламентирован применительно к сооружениям массовой застройки (зданиям 4-5 этажей на плотных грунтах), и $\beta(k, \zeta) = \beta(k)$, так как оценивались сооружения массовой застройки на плотном нескальном основании с $\zeta = 0,0075$ [100, 117]. Обоснование величины K_1 вызывало у специалистов разногласия [32, 79, 89, 107 и др.]. Одни считали, что этот коэффициент обеспечивает переход от редкого сильного землетрясения к частому, относительно слабому, являющемуся расчетным [32, 89]. Другие считали, что это переход от пиковых ускорений к средним [63], наконец, K_1 рассматривался, как коэффициент предельных состояний, показывающий, насколько можно перегрузить конструкцию [69, 78, 79].

До последнего времени трактовка коэффициента K_1 не влияла на результаты расчета. Коэффициент K_1 позволял корректно выполнить расчёт при оценке сейсмостойкости массовых сооружений, так как с помощью этого коэффициента учитывался накопленный опыт по восприятию этими сооружениями расчётных

сейсмических нагрузок. Однако для сооружений, динамические характеристики которых отличаются от аналогичных характеристик массовой застройки, данный подход не позволяет корректно оценить уровень сейсмической нагрузки.

Следует также отметить, что согласно первым двум трактовкам коэффициент K_1 зависит от сейсмогеологических условий площадки строительства и не зависит от свойств сооружений, а согласно третьей трактовки – наоборот – не зависит от условий площадки строительства, а только от свойств сооружения. В отечественных нормах реализована третья трактовка, т.е. регламентируется расчет на сильное воздействие, а коэффициент K_1 зависит от свойства сооружения

Однозначное понимание сложившейся ситуации стало приходить только в конце 20-го столетия. Решение этой проблемы заключалось во введении несколько предельных состояний и соответствующих им уровней воздействия. Первыми зарубежными специалистами, предложившими в середине 1970-х годов ввести несколько уровней предельных состояний, были Парк [167] и Доврик [146], а в СССР - Килимник Л.С. [67, 58]. В Европе переход на многоуровневое проектирование состоялся в 2000-2004 гг, в Китае – в 2006 г, несколько позже многоуровневое проектирование начали регламентировать в Японии. В постсоветском пространстве этот переход начинается в настоящее время. В 2020 г. на Еврокод-8 перешла республика Казахстан.

Благодаря введению различных предельных состояний состоялось введение соответствующих им уровней воздействия. В мировых нормах рассматривают от 2 до 4 предельных состояний и соответствующих им уровней расчётного сейсмического воздействия. Как минимум рассматривается два предельных состояния SLS (Serviceability limit state) – состояние нарушения нормальной эксплуатации и ULS (Ultimate limit state) – разрушение сооружения. Этим состояниям соответствуют проектное (ПЗ) и максимальное расчетное (МРЗ) землетрясения.

Особенности ЛСМ, особенно в ее нормативном варианте не позволяют его широкое использование в рамках МУП. Такая ситуация возникает из-за нескольких причин

во-первых, ЛСМ основывается на разложении движения по формам колебаний, что допустимо только для линейных систем; при действии МРЗ сооружение получает повреждения и работает нелинейно

во-вторых, что кривая динамичности описывает поведение объектов массовой застройки с фиксированным коэффициентом затухания $\zeta = 0.0075$, характерным для зданий 4-5 этажей на плотных нескальных грунтах; по этой причине не представляется возможным расчёт по данной методике высотных зданий, а также внедрение демпферов и сейсмогасителей.

в-третьих, даже в упругой стадии работы возникает необходимость учета нелинейности, например, для зданий на опорах А.В. Курзанова или Ю.Д. Черепинского [116, 117]

в-четвертых, в рамках линейных расчетов на действие ПЗ возникают специфические предельные состояния [75], например, ограничение скоростей в определенном частотном диапазоне; для этого требуется больше информации о колебаниях сооружения, чем может дать ЛСМ.

Таким образом, возникает необходимость расчёта конструкций по акселерограммам землетрясений.

1.2.3. Расчет сооружений по акселерограммам землетрясений

С точки зрения технической реализации расчёт конструкций по акселерограммам не вызывает трудностей. Методы интегрирования уравнений сейсмических колебаний описаны в литературе [116, 117] и реализованы в большинстве программных комплексов. Наиболее известными методами являются метод Рунге-Куты, метод Вильсона, интегрирование с использованием интеграла Дюамеля, а также методы, основанные на быстром преобразовании Фурье.

Вся сложность расчёта по акселерограммам заключается в отсутствии чётких критериев выбора расчётных воздействий. Во-первых, в большинстве норм регламентируются лишь величины PGA. Однако, как показывает практика, далеко не всегда величина кинематических характеристик описывает разрушительность воздействия [119], а сами значения PGA в рамках одного балла могут отличаться в 3-4 раза.

Во-вторых, под вопросом оказывается достоверность оценки при единичном расчете. Как известно, небольшие изменения спектра воздействия, вполне возможные с позиций сейсмологии, могут приводить к большим изменениям спектров ответа сооружения [117, 122]. Это связано с полиэкстремальным характером спектров ответа, особенно при низком демпфировании. На рисунке 1.5 показан пример спектра. Для двух близких точек T_1 и T_2 ответы кардинально различаются.

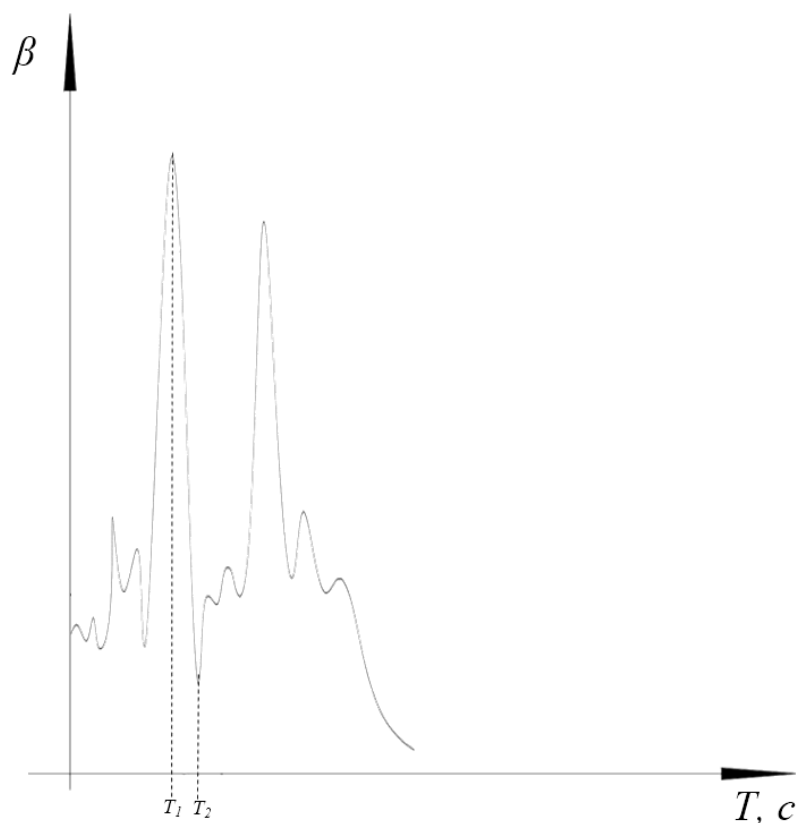


Рисунок 1.5 — Вид спектральной кривой с характерными пиками [117]

В связи с этим в литературе отмечено, что «единичный динамический расчёт сооружения не только не даёт достоверную информацию о сейсмостойкости сооружения, но, скорее, дезориентирует проектировщика» [111]. Поэтому переходят на расчёт по пакету расчётных акселерограмм (ПРА).

Однако ПРА далеко не всегда позволяет гарантировать надёжность прогноза сейсмостойкости сооружения. Первым недостатком использования ПРА является недостаточная представительность используемых пакетов – записи набираются на основе землетрясений, записанных в сходных сейсмогеологических условиях, но обычно необходимая сейсмогеологическая информация недостаточна, чтобы

сейсмологические изыскания были достоверными. Кроме того, природа и место очага землетрясения всегда случайны. Наиболее ярким является пример землетрясений в Эль-Центро [111, 117], где записи землетрясений 1941 и 1978 гг совершенно не похожи несмотря на то, что сейсмографы были расположены в одних и тех же точках.

Кроме того, большой недостаток использования ПРА – трудоёмкость и большое время реализации расчётов. Для достоверных прогнозов используют 60-80 записей, по данным исследований [37] следует использовать не менее 300 записей. При этом из расчётного набора опасными являются 2-3 записи. Остальные расчёты делаются «впустую». В связи с этим инженеры постоянно пытались создать простую расчётную модель или несколько моделей, которые с некоторым запасом позволяли бы оценить сейсмостойкость сооружений. В теории сейсмостойкости известны модели Аубакирова [13], Костарева-Ветошкина [22, 24], Эпштейна [158]. Эти модели представляют расчётную акселерограмму в виде синусоиды с переменной частотой. Авторы предполагали, что их модели за счёт переменности частоты возмущения являются широкополосными и будут опасны для широкого класса сооружений. Однако область применения таких моделей воздействия оказалась ограниченной. Во-первых, известные модели оказались неуравновешенными, т.е. в конце процесса скорость основания не превращалась в 0. Во-вторых, несмотря на желания авторов, указанные модели были узкополосными, что показано в [51]. Г.Аннаев и А.М.Уздин предложили использовать представления Дж.Эпштейна [158] и В.В.Костарева [24] для велосиграм. Это исключило проблему неуравновешенности воздействия, но процесс остался узкополосным.

По мнению автора, попытки создать универсальное воздействие для любого сооружения в любом месте обречены на неудачу. Сооружение выбирает из воздействия резонансные частоты. Значит, опасное воздействие должно содержать опасную для сооружения частоту. Если воздействие будет резонансным для всех сооружений, его спектр будет представлять сплошную линию, т.е. воздействие будет «белым шумом». Но для возбуждения опасных колебаний каждая частота

должна характеризоваться конечной энергией, а суммарная энергия воздействия на всех частотах будет неограниченно возрастать. Это обстоятельство не учитывалось при генерации воздействий. Все известные простые модели воздействий оперировали только PGA и не принимали во внимание даже смещения и скорости воздействия, не говоря о других известных характеристиках акселерограмм реальных землетрясений. К числу характеристик такого типа можно отнести интенсивность по Ариасу [132], абсолютную кумулятивную скорость CAV [97, 159], плотность сейсмической энергии SED [96], среднеквадратичные ускорения [63], среднеквадратичные скорости [157] и др.

Ни одна современная модель воздействия не учитывает всех характеристик реальных воздействий, а инженеры не знают, какие характеристики им нужны. Очевидно, что в расчётах прочности сооружений при ПЗ определяющим будет PGA. Но и его-то задать пока не просто. В Европе, после 15-летних дискуссий, сейсмологи не смогли регламентировать величину PGA, и выпустили последнюю редакцию шкалы балльности без инструментальной части [154]. В России, благодаря работам Ф.Ф.Аптикаева, удалось привести значения PGA в ГОСТ [33]. Однако эти значения не соответствуют нормам проектирования [108, 109]. В ряде работ, например в [159], вообще предлагают отказаться от нормирования PGA и перейти к нормированию CAV.

Другой важнейшей проблемой расчета сооружений по акселерограммам является критерий сейсмостойкости.

При ПЗ это нарушение прочности элементов конструкции. Но в ряде случаев критерии могут быть более сложными. Например, в зрелищных и культовых сооружениях следует ограничивать скорости в определенных октавных диапазонах [75], в медицинских учреждениях следует обеспечивать работоспособность оборудования жизнеобеспечения и т.п.

При расчёте на МРЗ проверка прочности не имеет смысла. Прочность может нарушаться. Для исключения обрушения сооружения необходимо проверять возможность прогрессивного обрушения или малоциклового усталости. На

возникновение таких ситуаций PGA не влияет. Важными становятся другие характеристики воздействия, такие, как интенсивность по Ариасу, SED и т.п.

Сказанное усложняет реализацию расчётов по акселерограммам, и они, не смотря на их регламентацию в СП [108], применяются пока достаточно редко, обычно для кинематических расчётов, например, для расчета хода опорных частей в мостостроении [118] или для расчета опор в системах сейсмоизоляции [116].

1.2.4. Энергетический метод

Как было замечено выше, при оценке сооружений в расчетах на действие МРЗ основную роль играют энергетические характеристики. Такой вывод исходит из того, что для разрушения сооружения землетрясение должно совершить некоторую работу, а для этого оно должно обладать определенной энергией. Для анализа поведения сооружения в процессе накопления повреждений обычно используют энергетическое представление уравнения сейсмических колебаний.

Основное дифференциальное уравнение теории колебаний имеет, как известно, вид:

$$m \cdot \ddot{y} + b \cdot \dot{y} + c \cdot y = -m \cdot \ddot{y}_0 \quad (1.6)$$

Домножив (1.6) на $dy = \dot{y} \cdot dt$ получим

$$m \cdot \ddot{y} + b \cdot \dot{y} + c \cdot y = -m \cdot \ddot{y}_0 \mid \cdot (\dot{y} \cdot dt) \quad (1.7)$$

Проинтегриров (1.7) по времени получаем

$$\int_0^{\tau} m \cdot \ddot{y} \cdot \dot{y} \cdot dt + \int_0^{\tau} b \cdot \dot{y}^2 \cdot dt + \int_0^{\tau} c \cdot y \cdot \dot{y} \cdot dt = - \int_0^{\tau} m \cdot \ddot{y}_0 \cdot \dot{y} \cdot dt, \quad (1.8)$$

где τ - продолжительность воздействия.

В получившемся уравнении первый член представляет собой работу сил инерции, второй – работу сил сопротивления, а третий – работу силы упругости.

Ввиду того, что функция и ее производная ортогональны, первый $A = \int_0^{\tau} m \cdot \ddot{y} \cdot \dot{y} \cdot dt$ и третий $C = \int_0^{\tau} c \cdot y \cdot \dot{y} \cdot dt$ члены малы и их можно отбросить. Член уравнения $B = \int_0^{\tau} b \cdot \dot{y}^2 \cdot dt$ связан с работой сил сопротивления, а член $\int_0^{\tau} m \cdot \ddot{y}_0 \cdot \dot{y} \cdot dt$ представляет собой работу переносных сил инерции, обусловленную ускорениями основания. Ее можно выразить через энергетические

характеристики воздействия, в частности через интенсивность по Ариасу I_A [94, 96] и через величину SED [96, 128, 129]. Поэтому именно энергетические характеристики дают возможность оценить сейсмостойкость будущего сооружения при расчётах на МРЗ. Возможную работу сил пластического деформирования называют энергоёмкостью сооружения, а расчёт сейсмостойкости сводится к сопоставлению энергоёмкости с работой переносных сил инерции. Другой подход к оценке сейсмостойкости опирается на теорему Прагера-Чаррудини, которая утверждает, что упругопластическая система приспособится к программе нагружения, если работа сил пластического деформирования будет меньше, чем работа монотонного разрушения сооружения [32, 70].

Энергетические методы оценки сейсмостойкости представляются весьма перспективными, однако они только начинают развиваться. Важными данными для их применения являются энергетические характеристики воздействия. Это накладывает дополнительные требования к моделям воздействий для расчетов на действие МРЗ. К сожалению, такие требования отсутствуют в литературе.

1.2.5. Статистический метод

Поскольку сейсмическое воздействие является случайным, то и моделирование сейсмических воздействий случайными процессами вполне допустимо. При этом осуществляется генерация набора акселерограмм и для каждой акселерограммы находят реакцию элементов сооружения. Далее производится статистический анализ полученных величин – поиск мат ожидания, дисперсии и функции распределения. По ним с заданной допустимой вероятностью принимаются значения рассматриваемой величины.

Проблема, как и при задании расчётных воздействий для детерминированных расчётов состоит в определении приемлемого способа генерации акселерограммы.

До настоящего времени в полном объёме эти требования обеспечить не удаётся.

Первые работы, выполненные в СССР, принадлежат академику В.В. Болотину [17], Я.М. Айзенбергу [3], М.П. Салганику [101]. В них расчётная акселерограмма принималась в виде произведения огибающей на стационарный

случайный процесс. Спектральная плотность процесса принималась по известным законам с одной преобладающей частотой, которая определяла преобладающую частоту воздействия. Использование такого рода моделей нашло отражения в работах К.Ю. Залилова [3], Д.Д.Абакарова [1], С.В.Елизарова [117]. Анализ указанных моделей показал наличие в них серьёзных дефектов. В литературе отмечается, что автокорреляционная функция в нуле для рассматриваемых процессов равняется среднеквадратическому ускорению. Авторы приравнивали это значение к значению PGA, приведённому в нормах. При этом они на 30-40 % завышали PGA своих воздействий по сравнению с нормами. В принципе, принимаемая модель воздействия позволяет корректировать величину PGA, однако смещение, получаемое интегрированием расчётных акселерограмм, оказываются в 10-20 раз меньше реальных. Это значит, что сгенерированные таким образом воздействия совершенно непригодны для кинематических расчётов. Этот факт был отмечен в работах Г.В. Давыдовой [37, 38], которая предложила в качестве спектральной плотности использовать сумму двух функций, одна из которых определяет преобладающий период на акселерограмме, вторая – на сейсмограмме. Этот метод описан в [117]. Он позволяет задать Ускорения и смещения Расчётного процесса. Но при этом вовсе не рассматриваются другие характеристики воздействий, в частности, энергетические. Поэтому вовсе не ясно, можно ли применять указанные методы для расчёта системы в неупругой стадии. К числу ограничений применения статистических методов следует привести их большую трудоёмкость, требующую проведения большого количества расчётов по акселерограммам землетрясений. В связи с изложенным статистические методы используются пока в научных целях и должны развиваться в направлении учёта различных характеристик реальных сейсмических воздействий.

1.3. Цель и методы исследования

Изложенный выше обзор исследований в области сейсмостойкого строительства демонстрирует, что расчёт сооружений на сейсмические воздействия развивался от простейшего статического метода к учёту динамических характеристик сооружения (спектральный метод) к динамическому расчёту

сооружений по акселерограммам землетрясений. Расчёты по акселерограммам позволяют развивать далее энергетические методы оценки сейсмостойкости и статистические методы анализа работы сооружений. Основной проблемой в современной теории сейсмостойкости является отсутствие обоснованной модели сейсмического воздействия. Классики современной механики отмечали [29, 83], что расчётная модель воздействия должна быть консервативной, соответствовать предельному состоянию сооружения и допускать проведение расчётов в рамках существующих методов и программных средств. К сожалению, для модели сейсмического воздействия эти требования пока не удаётся выполнить.

Обобщая выводы обзорной части (п 1.1 - 1.3), можно сказать, что на данный момент

- 1) Остаётся открытым вопрос о наиболее значимых характеристиках сейсмического воздействия с точки зрения опасности для проектируемого сооружения;
- 2) Отсутствуют методика выбора расчётной модели воздействия;
- 3) Существующие методы задания расчётного воздействия либо не регламентирует процесс генерации воздействий при многоуровневом проектировании вовсе, либо подразумевает метод расчёта по ЛСМ.

Такая ситуация приводит к тому, что используемые модели далеко не всегда консервативны. Использование в качестве основной характеристики воздействия значения PGA позволяет проектировщику брать для расчета акселерограммы с большим PGA, но с малой интенсивностью по Ариасу и не резонансными для сооружения. Такие воздействия будут безопасными для сооружения, но соответствовать нормам расчета. Кроме того, применяемые модели не учитывают возможных предельных состояний, которые различаются при многоуровневом проектировании. Более того, совершенно очевидно, что для разных предельных состояний должны приниматься и разные модели воздействия. Такого рода рекомендации пока отсутствуют.

Таким образом, **цель работы** – установить характеристики сейсмических воздействий, определяющих опасность сейсмического воздействия для разных предельных состояний сооружения и разработать методику моделирования

расчётных сейсмических воздействий при многоуровневом проектировании конструкций с заданными предельными состояниями.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи.

5. Изучить основные характеристики сейсмических воздействий
6. Разработать методику задания уровня сейсмического воздействия в зависимости от сейсмичности площадки строительства и ответственности сооружения и его динамических характеристик;
7. Разработать рекомендации по заданию параметров сейсмического воздействия при многоуровневом проектировании;
8. Разработать методику статистического моделирования сейсмического воздействия с учётом различных характеристик реальных акселерограмм
9. Апробировать предлагаемые модели сейсмического воздействия на сооружениях с различными динамическими параметрами.

Для решения поставленных задач в диссертационной работе использовались методы строительной механики, динамики сооружений, а также методы математической моделирования сейсмических колебаний на ЭВМ. Результаты исследований сопоставлялись с опубликованными результатами расчётов других авторов.

Глава 2. Основные характеристики сейсмических воздействий

2.1. Основные характеристики сейсмических воздействий и их анализ

Как отмечено в обзорной части диссертации, для описания сейсмического воздействия используют три вида характеристик: кинематические, спектральные и энергетические.

Кинематические характеристики наиболее широко применяются для оценки воздействия землетрясения на сооружения. Они включают:

- Пиковые ускорения основания PGA ;
- Пиковые скорости основания PGV ;
- Пиковые перемещения основания PGD ;
- Коэффициент гармоничности воздействия κ

$$\kappa = \frac{y_0^{(\max)} \cdot \ddot{y}_0^{(\max)}}{\left(\dot{y}_0^{(\max)}\right)^2}, \quad (2.1)$$

где $\ddot{y}_0^{(\max)}$, $\dot{y}_0^{(\max)}$, $y_0^{(\max)}$ – пиковые значения ускорения, скорости и перемещения основания, соответственно (PGA , PGV и PGD)

Энергетические характеристики должны определять степень повреждаемости сооружений при землетрясении.

Сила землетрясения, как известно, определяется степенью повреждения застройки. Как отмечается в литературе [113], «чтобы повредить сооружение надо поработать», а для этого землетрясение должно обладать энергией. В результате передачи энергии воздействию сооружению в сооружениях с пластической диаграммой деформирования происходит образование пластических шарниров, а в сооружениях с хрупкой диаграммой деформирования - образование трещин. Поэтому для исследования опасности воздействия нужно исходить из энергии воздействия, которая связана с работой разрушающих сил. Работа этих сил определяется не пиковыми значениями кинематических характеристик, а их средними значениями, а также на работу сил влияет продолжительность их действия. Поэтому вводятся интегральные усредняющие величины,

характеризующие сейсмическое воздействие (энергетические характеристики воздействия). К числу этих характеристик относятся:

- Интенсивность по Ариасу

$$I_A = \int_0^T \dot{y}(t)^2 dt; \quad (2.2)$$

- Плотность сейсмической энергии

$$SED = \int_0^T \dot{y}(t)^2 dt; \quad (2.3)$$

- Абсолютная кумулятивная скорость

$$CAV = \int_0^T |\dot{y}(t)| dt; \quad (2.4)$$

- Коэффициент потенциальной повреждаемости Арайа

$$I_{Araya} = \frac{I_A}{v_0^2}, \quad (2.5)$$

где v_0 – число пересечений акселерограммой оси времени.

- Эффективная продолжительность землетрясения

Для нее используются различные оценки

Следуя [170], существенная продолжительность t_s определяется как интервал времени, в течение которого вклад в интеграл I_A составляет 90%. Если $t_{0,05}$ – время, при котором $I_A(t_{0,05}) = 0,05 \cdot I_A(\tau)$, а $t_{0,95}$ – время, при котором $I_A(t_{0,95}) = 0,95 \cdot I_A(\tau)$, то $t_s = t_{0,95} - t_{0,05}$.

Другое определение продолжительности сильных движений грунта предложено в [173, 174]. При этом сначала определяется «эффективный центр тяжести ускорений» по оси времени:

$$t_c = 2 \sqrt{\frac{\int_0^\tau t \cdot a(t)^2 dt}{\int_0^\tau a(t)^2 dt}}, \quad (2.6)$$

Продолжительность сильных движений далее вычисляется по формуле:

$$\bar{t} = 2 \sqrt{\frac{\int_0^{\tau} (t - t_c)^2 a(t)^2 dt}{\int_0^{\tau} a(t)^2 dt}}, \quad (2.7)$$

Обзор 30 методов оценки продолжительности интенсивной фазы землетрясений приведен в [140].

- Среднеквадратическое ускорение

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\int_0^{\tau} \ddot{y}_0^2 dt}{\tau}} = \sqrt{\frac{I_A}{\tau}}; \quad (2.8)$$

- Среднеквадратическая скорость

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{\int_0^{\tau} \dot{y}_0^2 dt}{\tau}} = \sqrt{\frac{SED}{\tau}}; \quad (2.9)$$

- Работа сил пластического деформирования

$$PFW = \int_0^{\tau_{eq}} (R(y, \dot{y}) \cdot \dot{y}) dt, \quad (2.10)$$

где $y(t)$ смещение маятника, $R(y, \dot{y})$ ответ маятника на сейсмическое воздействие.

Спектральные характеристики учитывают спектральный состав воздействия. Воздействие с правильно заданными значениями энергетических и кинематических характеристик может оказаться безвредным для конкретного сооружения. Казалось бы, высокие PGA обуславливают большие значения инерционных нагрузок, высокие значения I_A , CAV и PFW позволяют задать воздействие, которое сильно загрузит сооружение. Однако, оказывается, что, если воздействие не является резонансным для сооружения, то повреждения окажутся либо минимальными, либо более низкими по сравнению со случаем совпадения преобладающего периода T и периода одной из собственных форм колебаний конструкции. Чтобы учесть этот фактор, для оценки опасности воздействия используются спектральные характеристики. К ним относятся

- Преобладающий период воздействия T или преобладающая частота воздействия ω :

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}, \quad (2.11)$$

где ω имеет размерность рад/с.

- Спектры величин кинематических характеристик (спектры смещений, спектры скоростей, спектры ускорений);
- Спектры величин энергетических характеристик;
- Псевдоспектральные скорости и ускорения

$$PSV = \omega \cdot S_d, \quad (2.12)$$

$$PSA = \omega^2 \cdot S_d, \quad (2.13)$$

где S_d – упругое смещение, соответствующее ответу рассматриваемого сооружения.

Стоит отметить, что подавляющее большинство кинематических характеристик определяются непосредственно из инструментальных данных: записей сейсмических воздействий (акселерограмма, велосиграмма и сейсмограмма для определения PGA , PGV и PGD , соответственно). Исключением является показатель гармоничности k , определение которого возможно только после обработки акселерограммы. Остальные характеристики требуют обработки записей прошлых землетрясений [16, 119].

Условно характеристики можно разделить на две группы: связанные с воздействием землетрясения на сооружение и непосредственные – характеризующие само воздействие.

К первой группе можно причислить спектры ускорений, скоростей и смещений, работу сил пластического деформирования PFW и т.д.

К непосредственным отнесём преобладающий период воздействия T и преобладающую частоту ω , кинематические характеристики (PGA , PGV , PGD), плотность сейсмической энергии SED , абсолютную кумулятивную скорость CAV и интенсивность по Ариасу I_A . Это даёт основания полагать, что при генерации воздействий непосредственные характеристики должны определяться, исходя из местных условий.

2.2. Исследование кинематических характеристик сейсмического воздействия

Такие кинематические характеристики, как пиковые ускорения и скорости основания, а также показатель гармоничности явно зависят от преобладающего периода воздействия. (PGA и κ с ростом преобладающего периода падают, а PGV – возрастает). Эти результаты получены А.А. Долгой, А.М. Уздиным под руководством О.А.Савинова [39, 40, 41]. Ими было проанализировано более 200 записей 8-балльных землетрясений [116].

Автором были исследованы записи 9-балльных воздействий, собранные и обработанные в рамках российско-китайского гранта № 16-58-53095 и проанализированные в литературе [119]. При этом результат, полученный автором, оказался близким, к результатам, полученным А.А. Долгой. Это наглядно продемонстрировано на рисунках 2.1 – 2.2, где на втором рисунке использована аппроксимация Долгой, но значения PGA соответствуют 9-балльным воздействиям (зависимость построена на 9-балльной опытной базе). Таким образом, можно утверждать, что задание одного пикового ускорения для заданного балла невозможно. Следует задавать значения PGA в разных частотных диапазонах или зависимость $PGA(T)$.

$PGA,$
 m/c^2

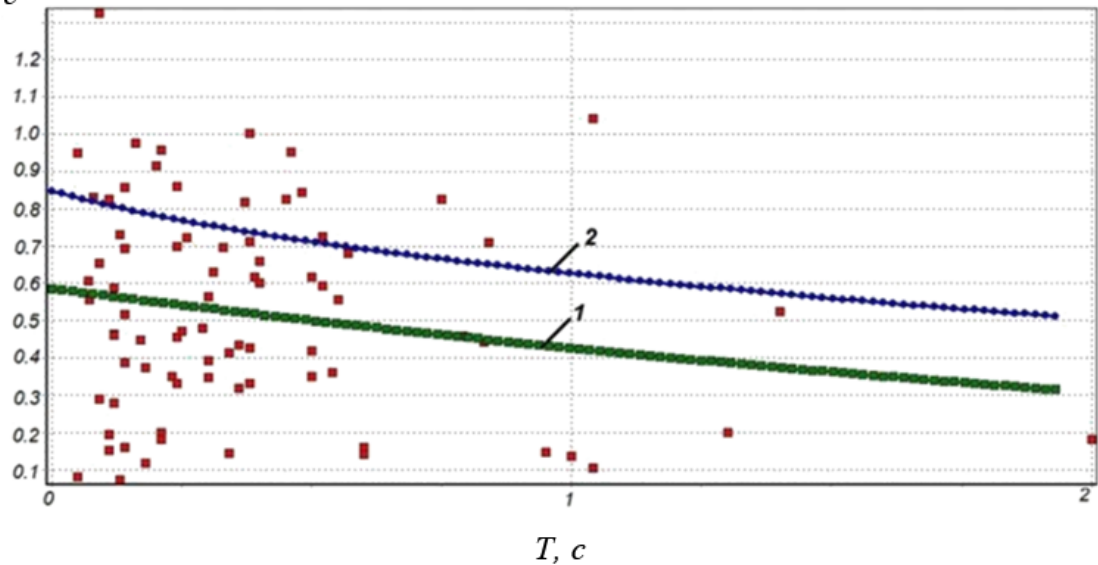


Рисунок 2.3 — Зависимость PGA от преобладающего периода воздействия T , построенная автором для 9-балльных землетрясений

$$PGA(T_{eq}) = a \cdot e^{-20,75 \cdot T_{eq}} + b \cdot e^{-1,64 \cdot T_{eq}} - c$$

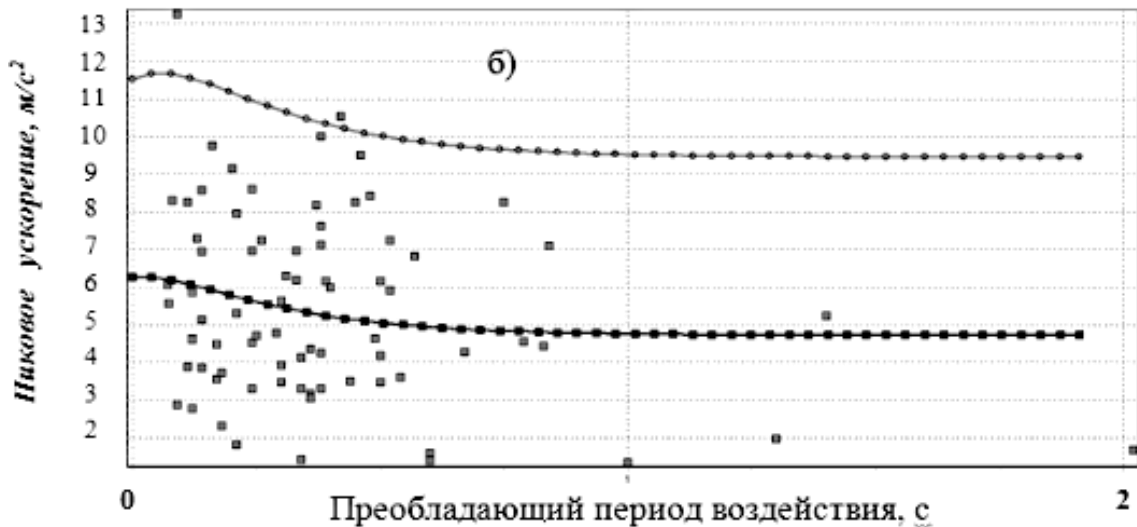


Рисунок 2.4 — Зависимость, полученная А.А. Долгой в [39]

Также были проанализированы зависимости пиковых скоростей от преобладающего периода $PGV(T)$, зависимость показателя гармоничности от преобладающего периода T $k(T)$ и зависимость пиковых смещений от преобладающего периода $PGD(T)$. Исследования показали, что показатель гармоничности k падает с ростом преобладающего периода (рис. 2.5), PGV также падает (рис.2.4). PGD показала сильную зависимость от преобладающего периода

Т для жёстких воздействий, с ростом преобладающего периода величина PGD стабилизируется (рис. 5).

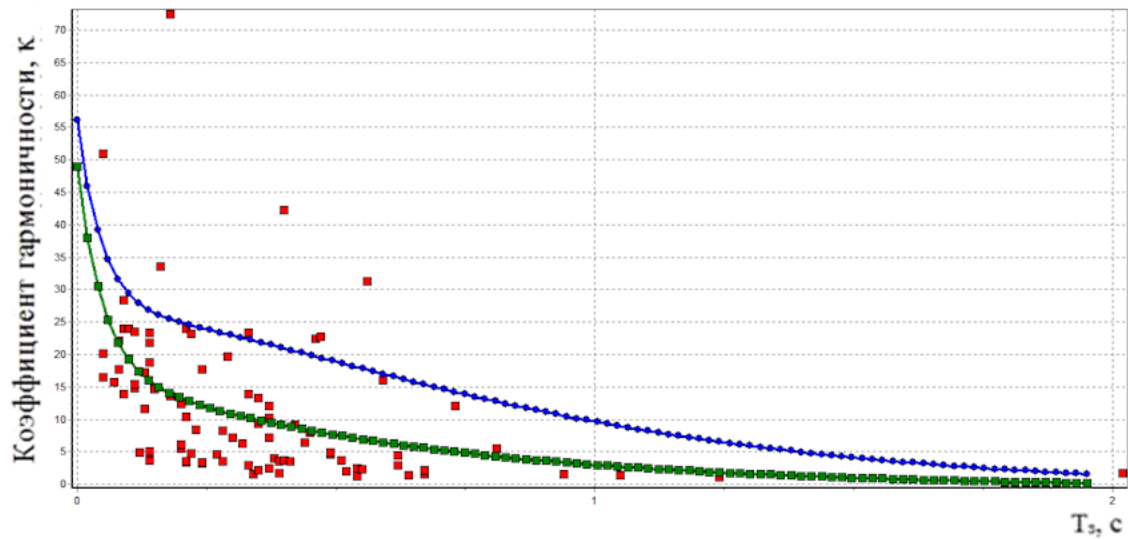


Рисунок 2.6 — Зависимость коэффициента гармоничности от преобладающего периода воздействия T_z

$$\kappa(T_{eq}) = 30,941 \cdot e^{-20,75 \cdot T_{eq}} + 18,564 \cdot e^{-1,64 \cdot T_{eq}} - 0,59$$

$PGV,$

$м/с$

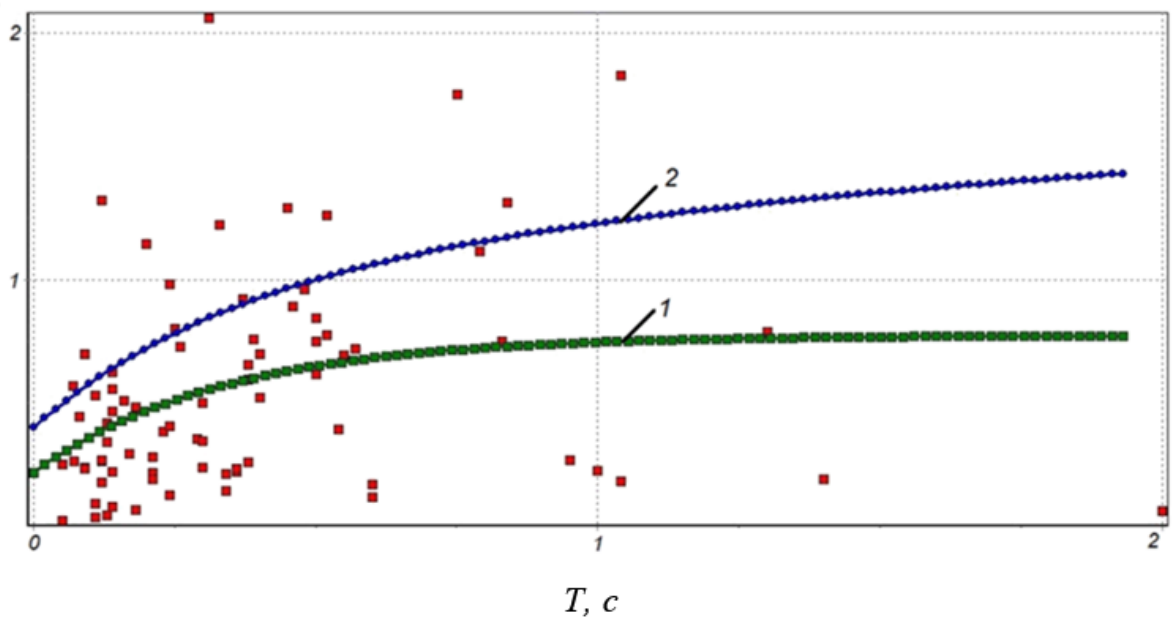


Рисунок 2.7 — Зависимость PGV от преобладающего периода T

$$PGV(T_{eq}) = 0,941 - 0,527 \cdot e^{-2,96 \cdot T_{eq}} - 0,198 \cdot e^{-2,92 \cdot T_{eq}}$$

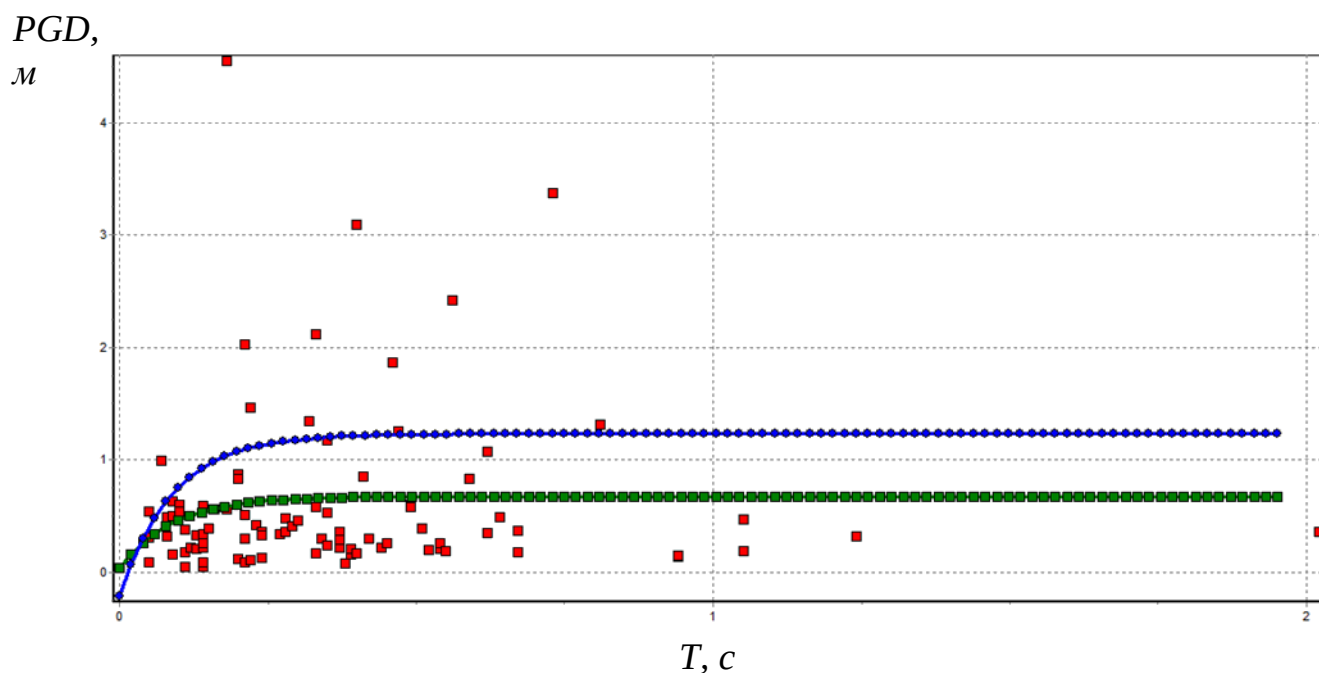


Рисунок 2.8 — Зависимость пиковых смещений от преобладающего периода
PGD(T)

Следует отметить, что показатель гармоничности широко используется в зарубежных исследованиях. Как отмечено в обзоре, норма США рекомендуют принимать значение κ постоянным и равным 5. Исследования [16, 119, 139] указывали на падение величины κ с ростом преобладающего периода воздействия. Однако в [139] были рассмотрены записи 20 землетрясений. Выполненная работа позволяет получить аппроксимирующую формулу для зависимости $\kappa(T)$. Можно отметить также, что использование рекомендаций США дает неконсервативное значение сейсмической нагрузки.

Практически во всём мире кинематические характеристики используются при задании расчётного сейсмического воздействия. Так, в России оперируют пиковыми ускорениями, которые зависят от силы воздействия в баллах. В соответствии с СП на проектирование [109] для 9 баллов $PGA=4 \text{ м/с}^2$; по шкале Ф.Ф. Аптикаева, вошедшей в действующий ГОСТ [33], аналогичная величина $PGA=7,5 \text{ м/с}^2$ при этом преобладающие периоды расчётного воздействия принимаются в диапазоне 0,3-0,4 с [8]. Во Франции территория разделена на провинции и для каждой из них устанавливается расчётный уровень ускорения скального основания, а свойства воздействия непосредственно на площадке

строительства учитываются с помощью класса грунтового основания и соответствующего ему спектрального состава землетрясения [155]. Наиболее интересной представляется разработка Ю.М. Заславского, А. Шапира и М. Кенигсберга [172], сделавших двойные карты ОСР для Израиля. На одной карте приводятся значения PGA , а на другой – преобладающий период воздействия. Такие карты соответствуют нашим исследованиям, показывающим зависимость $PGA(T)$.

2.3. Спектральные характеристики сейсмического воздействия

Наиболее распространёнными и простыми являются такие спектральные характеристики, как преобладающий период воздействия T и преобладающая частота ω . Они в некоторой мере определяют спектральный состав воздействия. Преобладающий период воздействия широко используется в нормативной [93], учебной [42, 117] и научной литературе [164]. Однако вопрос задания преобладающего периода далеко не так прост, как кажется на первый взгляд. При задании преобладающего периода чаще всего имеют в виду период, соответствующий пику на спектре ускорений акселерограммы. Между тем, преобладающий период акселерограммы и сейсмограммы воздействия могут существенно различаться. На рис. 2.9 приведены в качестве примера спектры ускорений и смещений для одной из записей землетрясения “Hollywood Storage”. На спектре ускорений преобладающий период равен 0,35 с, а на спектре смещений – 3,8 с. Поэтому вопрос определения преобладающей частоты землетрясения в настоящий момент является, по нашему мнению, дискуссионным. По крайней мере, значение преобладающей частоты дает весьма ограниченную информацию о спектральном составе воздействия.

Наиболее полная информация о спектральном составе землетрясения задается спектрами Фурье и спектрами ускорений, скоростей и смещений. Эти характеристики широко используются в литературе и проектной практике.

Спектр Фурье в общем случае определяется следующей формулой

$$\tilde{f}(\omega) = \int_0^{t_{\text{кон}}} f(t) \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} dt, \quad (2.14)$$

где $f(t)$ - исходная функция, а $e^{i \cdot \omega \cdot t}$ можно представить по формуле Эйлера в виде

$$e^{i \cdot \omega \cdot t} = \cos(\omega \cdot t) + i \sin(\omega \cdot t). \quad (2.15)$$

Тогда (2.14) можно записать следующим образом

$$\tilde{f}(\omega) = \int_0^{t_{\text{кон}}} f(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) dt + i \cdot \int_0^{t_{\text{кон}}} f(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) dt. \quad (2.16)$$

В более простом виде (2.16) представляется как

$$\tilde{f}(\omega) = Re(\omega) + i \cdot Im(\omega), \quad (2.17)$$

где $Im(\omega) = \int_0^{t_{\text{кон}}} f(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) dt$ – мнимая часть комплексной функции $\tilde{f}(\omega)$, а

$Re(\omega) = \int_0^{t_{\text{кон}}} f(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) dt$ – реальная часть функции $\tilde{f}(\omega)$.

Если в качестве функции $f(t)$ взять акселерограмму воздействия $\ddot{u}(t)$, то модуль функции $|\tilde{u}(\omega)| = \sqrt{Re(\omega)^2 + Im(\omega)^2}$ будет определять энергию составляющей с частотой ω и спектральную плотность $S(\omega)$, а отношение мнимой части к действительной $\varphi = \arctg \frac{Im(\omega)}{Re(\omega)}$ – её фазу.

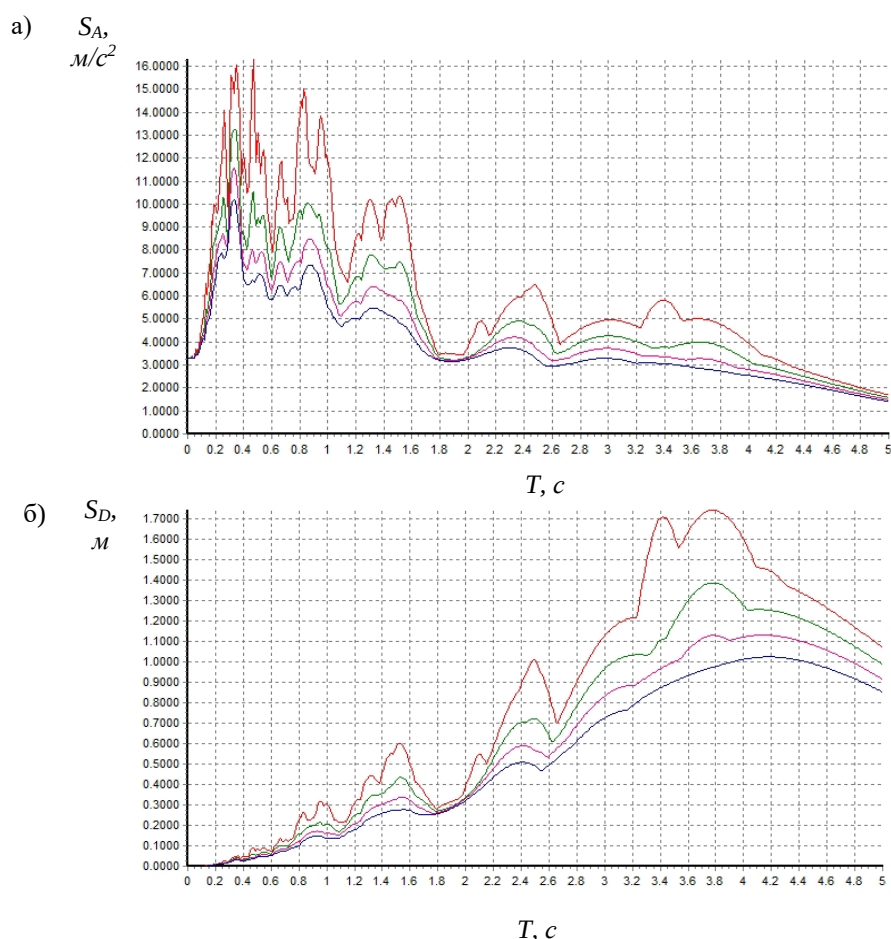


Рисунок 2.9 — Спектр ускорений (а) и спектр смещений (б) для землетрясения Hollywood Storage P.E.

Спектральные характеристики позволяют не только определить частотный состав воздействия, но и оценить степень опасности землетрясения для проектируемого сооружения. В частности, для любых линейных дифференциальных уравнений сейсмических колебаний Фурье-изображение решения $Q(\omega)$ в общем случае имеет следующий вид

$$Q(\omega) = S(\omega) \cdot \Phi(\omega), \quad (2.18)$$

где $S(\omega)$ – спектральная плотность воздействия,

$\Phi(\omega)$ – Фурье-образ ИПФ рассматриваемой системы.

С инженерной точки зрения более удобными оказались не спектры Фурье, а спектры ответов (смещений, ускорений, скоростей и других факторов) маятника на рассматриваемое воздействие. Использование и особенности построения спектров хорошо описаны в литературе [67, 110]. Для расчета сооружений по ЛСМ базовым является спектр ускорений [14, 15, 117].

К сожалению, его применение для расчета смещений весьма проблематично. Исследования показывают, что при использовании спектра ускорений для задания расчётного воздействия, смещения рискуют оказаться заниженными. При этом спектры кинематических характеристик решают задачи расчёта сооружений на проектное землетрясение, а также расчёты, в которых выполняется оценка предельных смещений. Данные же по спектрам смещений реальных землетрясений до сих пор отсутствуют.

Для оценки сейсмостойкости нелинейных сооружений так же можно предложить спектральные характеристики воздействия. Работы этого направления ограничены. В статьях [120, 121] предложено использовать спектры работ сил пластического деформирования PFW, как критерий силы землетрясения. Этот подход имеет смысл использовать для оценки сейсмостойкости упругопластических систем. Для систем с хрупким механизмом накопления повреждений при участии автора диссертации предложен новый тип спектров - спектры повреждаемости χ . Этот вопрос рассмотрен ниже в части 4 диссертации.

2.4. Исследование энергетических характеристик сейсмического воздействия

Наряду с кинематическими и спектральными характеристиками сейсмического воздействия исследовались энергетические характеристики. Как отмечается в литературе [32, 94, 97, 85 и др.], именно эта группа величин наилучшим образом характеризует силу землетрясения и позволяет наиболее полно учесть его свойства. Ввиду того, что нормы оперируют в первую очередь кинематическими и спектральными характеристиками, исследования энергетических характеристик ограничены. Хотя вопрос учета энергии сейсмических воздействий рассматривался еще основоположниками современной теории сейсмостойкости [78, 137, 156], детальные исследования энергетических характеристик землетрясений появились только в последние 30 лет [69, 94-97, 128, 129 и др.]. Важным шагом, по мнению автора, было изучение зависимости энергетических характеристик от преобладающего периода воздействия.

Построение расчётных формул теории сейсмостойкости с использованием энергетических характеристик пытались осуществить А.А. Петров [85] и А.А. Долгая [40]. В частности, А.А. Долгая пыталась поострить аппроксимирующую зависимость величины I_A от преобладающего периода воздействия T . Она использовала упомянутую базу 8-балльных воздействий и искала зависимость $I_A(T)$ в виде

$$I_A = C_0 + C_1(e^{-\alpha T} + C_2 e^{-\beta T}). \quad (2.19)$$

Однако данная модель содержит большое число коэффициентов и не позволяет оценить, какой из параметров модели наибольшим образом влияет на величины I_A . Для устранения этого недостатка автором был выполнен поиск более простых аппроксимирующих функций. Прежде всего, была сделана попытка получить физичную аппроксимацию $I_A(T)$. Для этого принимались те или иные представления воздействия и для них оценивался вид функции $I_A(T)$. В качестве основной функции была принята велосиграмма в виде затухающей синусоиды

$$V = e^{-\varepsilon \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (2.20)$$

Аппроксимация выполнялась следующим образом:

- 1) Была определена производная от формулы (2.20) (зависимость $A(t)$):

$$A(t) = -\varepsilon \cdot e^{-\varepsilon \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t) + \omega \cdot e^{-\varepsilon \cdot t} \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (2.21)$$

- 2) Далее для этой модели воздействия были найдены энергетические характеристики:

$$I_A = \frac{e^{-2 \cdot t \cdot \varepsilon} \cdot (\omega^2 - \varepsilon^2 \cdot \cos(2 \cdot t \cdot \omega) - \omega \cdot \varepsilon \cdot \sin(2 \cdot t \cdot \omega) + \varepsilon^2)}{4 \cdot \varepsilon}; \quad (2.22)$$

$$SED = \frac{e^{-2 \cdot t \cdot \varepsilon}}{4 \cdot \varepsilon} - \frac{e^{-2 \cdot t \cdot \varepsilon} \cdot (2 \cdot \omega \cdot \sin(2 \cdot t \cdot \omega) - 2 \cdot \varepsilon \cdot \cos(2 \cdot t \cdot \omega))}{2 \cdot (4 \cdot \omega^2 + 4 \cdot \varepsilon^2)}, \quad (2.23)$$

где ε – параметр затухания.

- 3) При $t \rightarrow \infty$ функции (2.22) и (2.23) принимают нулевые значения, при $t \rightarrow 0$ – максимальные. Таким образом, было принято

$$I_A = \frac{\omega^2}{4 \cdot \varepsilon} = \frac{\omega^2}{4 \cdot \varepsilon^2} \cdot \varepsilon; \quad (2.24)$$

$$SED = \frac{1}{4 \cdot \varepsilon} - \frac{-2 \cdot \varepsilon}{2 \cdot (4 \cdot \omega^2 + 4 \cdot \varepsilon^2)}, \quad (2.25)$$

Из формулы (2.25) были удалены малозначащие члены и была предложен аппроксимация в виде

$$SED = \frac{-2 \cdot \varepsilon}{2 \cdot (4 \cdot \omega^2 + 4 \cdot \varepsilon^2)}. \quad (2.26)$$

Для удобства дальнейших вычислений (поиска коэффициентов аппроксимирующей функции) формулы (2.24) и (2.26) были представлены в виде

$$I_A = \frac{a}{T^2}; \quad (2.27)$$

$$SED = \frac{A}{B + T^2}, \quad (2.28)$$

где a , A , B и C – искомые параметры аппроксимации, а T – преобладающий период воздействия.

В ходе исследования выяснилось, что формулы (2.27) и (2.28) плохо соотносятся с натурными данными (рис. 2.10). Это обусловлено тем, что не учитывается изменение пиковой скорости с ростом преобладающего периода воздействия.

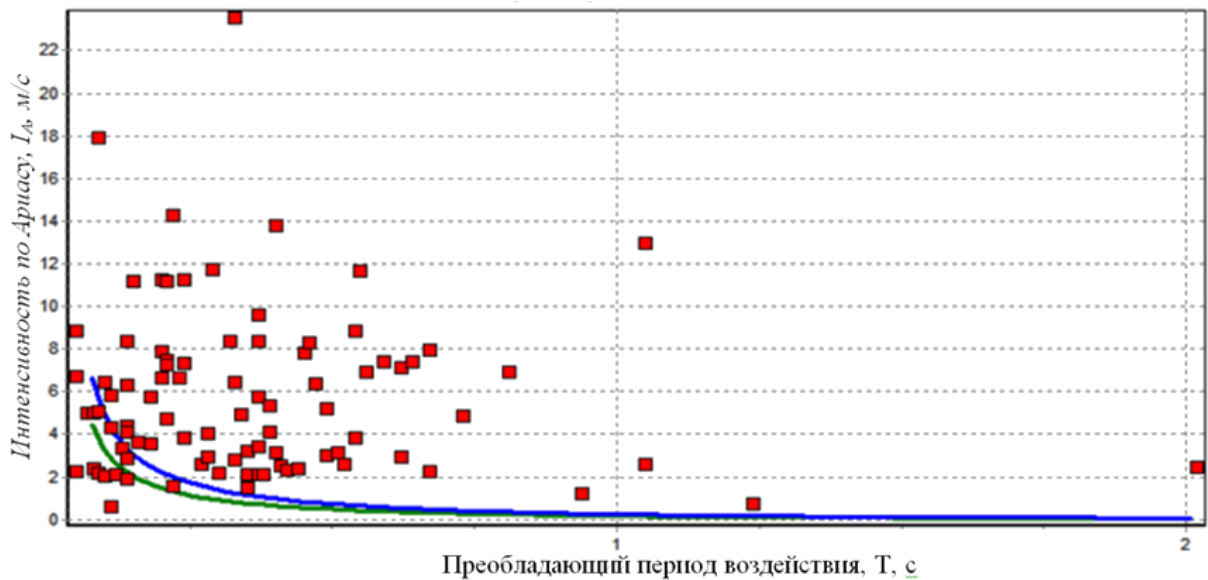


Рисунок 2.10 — Аппроксимация зависимости $I_A(T)$ по формуле (2.27)

Нижняя кривая – среднее значение $I_A(T)$, верхняя - $I_A(T) + \sigma_{IA}(T)$

Для того, чтобы учесть это изменение, была найдена следующая наиболее точно описывающая опытные данные функция

$$PGV(T) = 0.91 - 0.695 \cdot e^{-2.91 \cdot T}. \quad (2.29)$$

Вид данной зависимости оказался соответствующим полученной ранее А.А. Долгой [40].

Таким образом формулы (2.27) и (2.28) приняли следующий вид

$$I_A = PGV^2 \cdot \frac{a}{T^2}; \quad (2.30)$$

$$SED = PGV^2 \cdot \frac{a}{b + T^2}. \quad (2.31)$$

Как видно из рисунков 2.11 и 2.12, основная масса натуральных точек легла выше аппроксимирующей кривой. Это указывает на то, что изначальная модель воздействия в виде (2.20) также не согласуется с натурными данными.

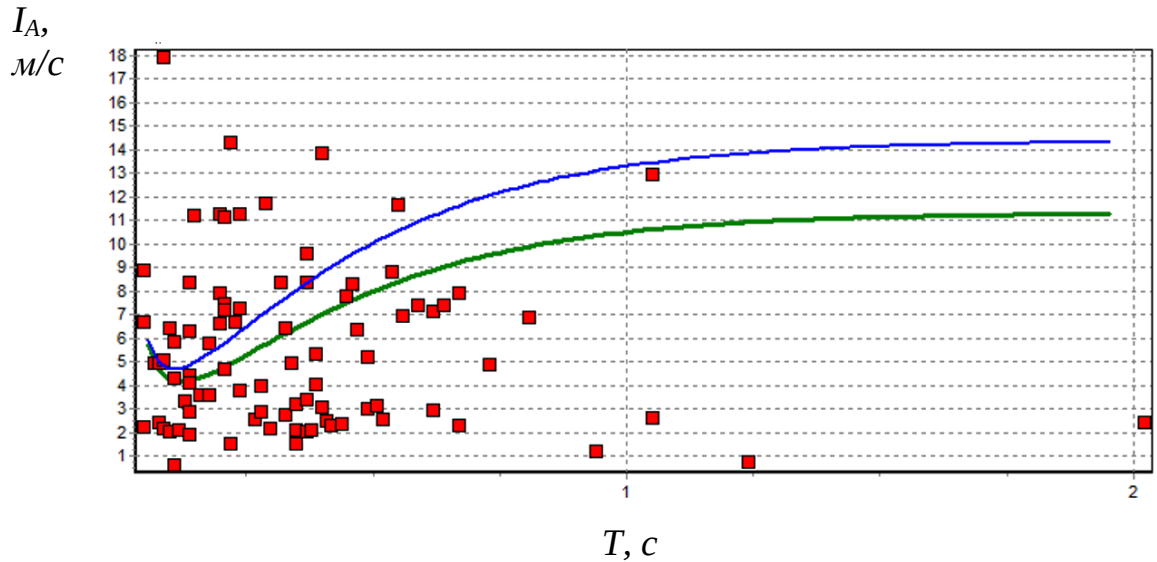


Рисунок 2.11 — Аппроксимация зависимости $I_A(T)$ по формуле (2.30)

Нижняя кривая – среднее значение $I_A(T)$, верхняя - $I_A(T) + \sigma_{IA}(T)$

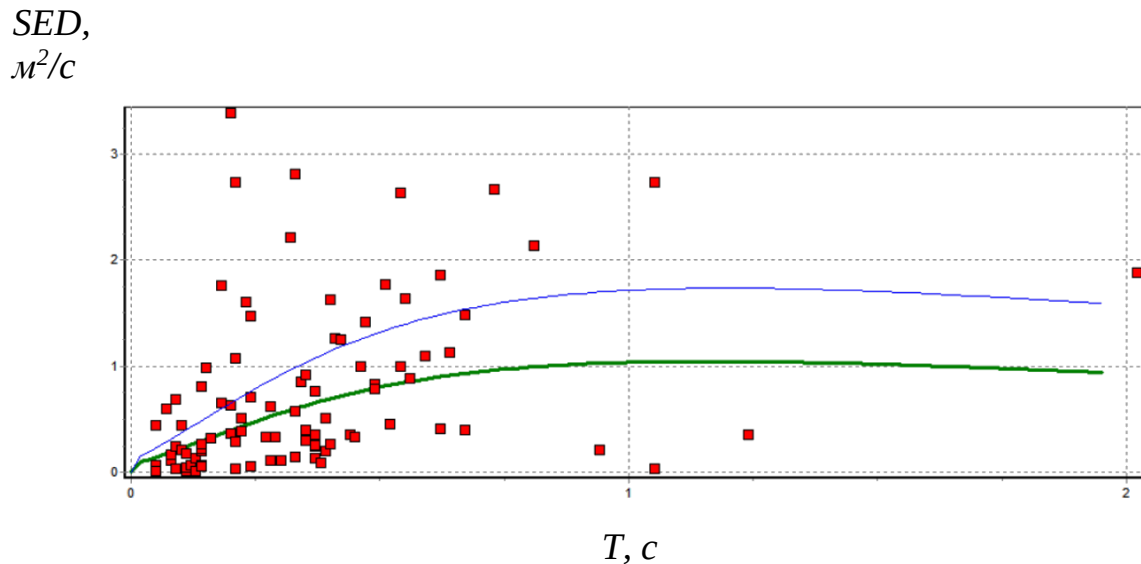


Рисунок 2.12 — Аппроксимация зависимости $SED(T)$ по формуле (2.31)

Нижняя кривая – среднее значение $SED(T)$, верхняя - $SED(T) + \sigma_{SED}(T)$

Если добавить к модели воздействия импульс скорости $\delta(t)$, т.е. представить скорость в виде

$$V(t) = \alpha \cdot \delta(t) + V_0 e^{-\varepsilon t} \sin(\omega \cdot t), \quad (2.32)$$

то в интенсивности по Ариасу добавится константа, равная b , а в плотность сейсмической энергии (SED) – константа, равная C . Следует отметить, что наличие в воздействии импульса скорости отмечалось многими исследователями [30, 144, 150, 171].

С учётом сказанного аппроксимации (2.30) и (2.31) были дополнены:

$$I_A = PGV^2 \cdot \left(\frac{a}{T^2} + b \right); \quad (2.33)$$

$$SED = PGV(T)^2 \cdot \left(\frac{A}{(B + T^2)} + C \right). \quad (2.34)$$

Помимо представленных выше аппроксимаций были рассмотрены и другие классические функции:

$$I_A = a + b \cdot T; \quad (2.35)$$

$$I_A = a \cdot \ln(T) + b; \quad (2.36)$$

$$I_A = a \cdot e^{b \cdot T} + c, \quad (2.37)$$

где а, b, с – искомые коэффициенты аппроксимации.

Аналогичные зависимости использовались и для оценки формулы (2.34). Функции сравнивались по среднеквадратическому и среднему отклонениям. Результаты аппроксимации приведены в таблице 2.1 и 2.2. . Аппроксимация по данным [40] также представлена в таблицах.

Как можно видеть из таблиц 2.1 и 2.2, погрешности у полученных аппроксимаций не являются минимальными. Хотя значения погрешностей всех функций сопоставимы, только аппроксимации (2.33) и (2.34) позволяют выявить и оценить влияние на величину характеристики затухания, представленного параметрами а и А для I_A и SED, соответственно; импульса скорости – b и C, а также частотности процесса, представленную в виде В.

Таблица 2.1 — Результаты использования различных аппроксимирующих формул для I_A

Вид аппроксимации	Параметры аппроксимации	Среднеквадратичная погрешность	Примечания
$I_A = C_0 + C_1(e^{-\alpha T} + C_2 e^{-\beta T})$	$C_0 = -747,531$; $C_1 = 190,28$; $C_2 = 2,96$; $\alpha = 0,001$; $\beta = 0,002$	4,01	Ранее использованная аппроксимация
$I_A = PGV(T)^2 \cdot \left(\frac{a}{T^2} \right)$	$a = 0,215$	5,892	Использование модели воздействия в виде затухающей синусоиды
$I_A = PGV(T)^2 \cdot \left(\frac{a}{T^2} + b \right)$	$a = 13,684$ $b = 0,1431$	4,57	Модель воздействия в виде суммы затухающей синусоиды и импульса скорости
$I_A = a + bT$	$a = 5,98$ $b = -1,332$	4,01	
$I_A = a + b \ln T$	$a = 5,256$ $b = -0,184$	4,03	
$I_A = a + b \cdot e^{-cT}$	$a = 5,479$ $b = 1,977 \cdot 10^{16}$ $c = 766,796$	4,03	
$I_A = \text{const}$	$\text{const} = 5.44$	4.03	

Таблица 2.2 — Результаты использования различных аппроксимирующих формул для SED

Вид аппроксимации	Параметры аппроксимации	Среднеквадратичная погрешность	Примечания
$SED = C_0 + C_1 \cdot (e^{-\alpha \cdot T} + C_2 \cdot e^{-\beta \cdot T})$	$C_0=1,337; C_1=0,744; C_2=1,176; \alpha=10; \beta=2$	0,721	Ранее использованная аппроксимация
$SED = PGV(T)^2 \cdot \frac{A}{(B + T^2)}$	$A=19,9; B=13,6$	0,75	Использование модели воздействия в виде затухающей синусоиды
$SED = PGV(T)^2 \cdot (\frac{A}{(B + T^2)} + C)$	$A=11,6; B=5,1; C=-0,195$	0,74	Использование модели воздействия в виде суммы затухающей синусоиды и импульса скорости
$SED = a + b \cdot T$	$a=0,446; b=0,838$	0,737	
$SED = a + b \cdot \ln(T)$	$a=1,244; b=0,382$	0,721	
$SED = a + b \cdot e^{-c \cdot T}$	$a=1,22; b=1,267; c=3,667$	1,317	
SED=const	const=0,352	0,876	

Также был проведён анализ зависимости CAV(T) с помощью указанных выше стандартных аппроксимаций. Результаты анализа приведены в таблице 2.3 . Большая среднеквадратическая погрешность каждой из рассмотренных аппроксимаций говорит о том, что зависимость величины CAV от преобладающего периода отсутствует.

Таблица 2.3 — Результаты использования различных аппроксимирующих формул для CAV

Вид аппроксимации	Параметры аппроксимации	Среднеквадратичная погрешность
$CAV = a + b \cdot T$	$a=0,446; b=0,838$	0,737
$CAV = a + b \cdot \ln(T)$	$a=1,244; b=0,382$	0,721
$CAV = a + b \cdot e^{-c \cdot T}$	$a=1,22; b=1,267; c=3,667$	1,317
CAV=const	const=0,352	0,876

В ходе дальнейших исследований автор рассмотрел прочие модели воздействий, для которых методами численного интегрирования были также построены зависимости $I_A(T)$ и $CAV(T)$. Выбор этих двух характеристик исходит из того, что постоянные величины этих характеристик имеют одну из наименьших погрешностей (по сравнению с другими аппроксимирующими функциями). Оказалось, что наибольший вклад в энергию воздействия вносит множитель $PGV(T)^2$ в случае с I_A и постоянная C , которая фигурирует в аппроксимациях для обеих характеристик.

Это говорит о том, что вид используемой модели непринципиален при попытке обеспечить расчётные величины энергетических характеристик, так как соответствие синтезированной акселерограммы реальной по данному критерию обеспечивается за счёт импульса скорости и учёта зависимости пиковых значений скорости от преобладающего периода воздействия. Такой факт позволяет более гибко подбирать модель воздействия.

К числу важных энергетических характеристик также относятся среднеквадратичные ускорения, среднеквадратичные скорости и продолжительность воздействия. Формально эти характеристики можно считать кинематическими, однако, по существу, они определяют возможность малоциклового усталости или прогрессивного разрушения конструкции. Автором были вычислены эти характеристики для акселерограмм упомянутой базы. На рис. 2.13, 2.14, 2.15 приведены зависимости этих характеристик от преобладающего периода воздействия

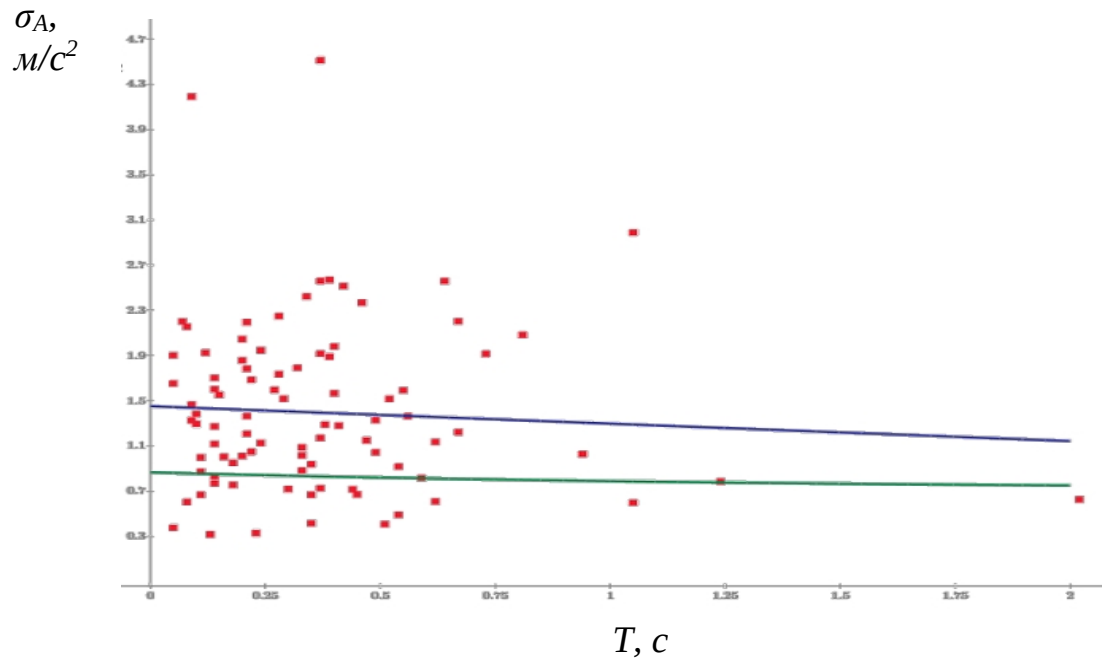


Рисунок 2.13 — Зависимость среднеквадратичного ускорения от преобладающего периода воздействия

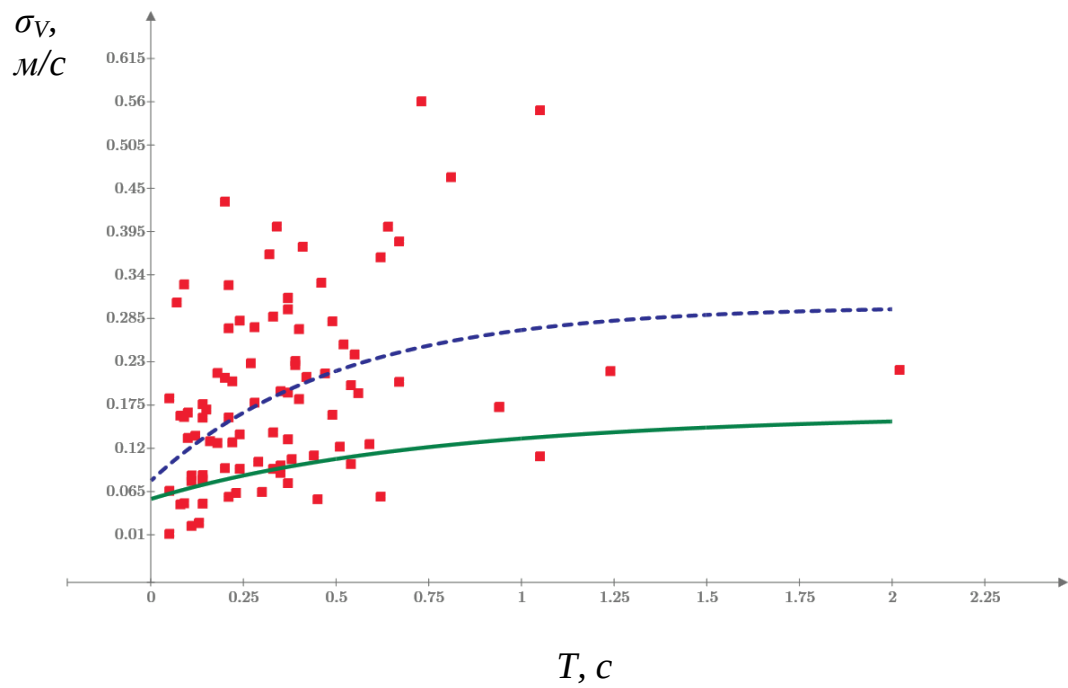


Рисунок 2.14 — Зависимость среднеквадратичной скорости от преобладающего периода воздействия

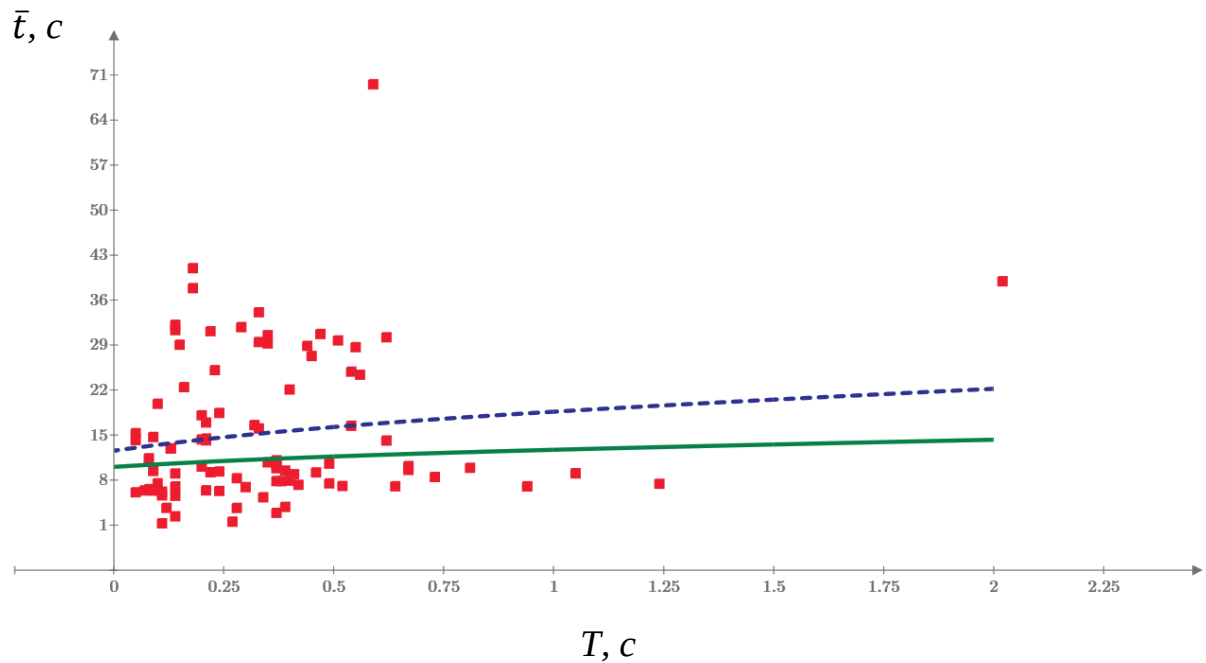


Рисунок 2.15 — Зависимость продолжительности воздействия $\bar{t}$ от преобладающего периода воздействия

Обращает на себя внимание то, что среднеквадратичные ускорения и продолжительности воздействия практически не зависят от преобладающей частоты воздействия. Это позволяет использовать эти характеристики в качестве показателя силы воздействия независимо от его спектрального состава. На такую возможность указывал основоположник отечественной теории сейсмостойкости И.Л. Корчинский [63]. Однако, нормативные значения ускорений не соответствуют их среднеквадратическим значениям. По полученным данным среднее значение ускорения равно $1,5 \text{ м/с}^2$, что в 2.7 раза меньше нормативной величины. Значение среднеквадратичного ускорения с вероятностью превышения 30% составляет 2 м/с^2 .

Что касается среднеквадратичной скорости, то, как видно из рис. 2.14, ее величина возрастает с ростом преобладающего периода.

Наиболее разумным было бы считать величину I_A постоянной в рамках данного балла или же использование для её описания формулу (2.33), которая обладает физическим смыслом. Автор считает, что допустимо считать величину I_A не зависящей от преобладающего периода воздействия T , принимая в расчётах в качестве расчётной величины сумму $I_A + \sigma_{IA} \approx 9,5 \text{ м/с}$.

Для зависимости $SED(T_{eq})$ характерен рост SED с увеличением T_{eq} , особенно в диапазоне $0 < T_{eq} < 0,75$ с. В отличие от $I_A(T_{eq})$, $SED(T_{eq})$ не так чувствителен к наличию импульса – импульс скорости немного снижает погрешность, но общий вид зависимости не меняет. Однако, параметр, характеризующий импульс скорости позволяет учесть природу воздействия, а сама зависимость – просто регулировать модель воздействия. В инженерной практике также допустимо принимать SED не зависящим от преобладающего периода и равным $SED + \sigma_{SED} \approx 1,228 \text{ м}^2/\text{с}$.

Отметим в заключении, что воздействие в виде суммы затухающей синусоиды и импульса скорости отражает реальную зависимость $I_A(T_{eq})$. Это подтверждает известное предложение А. М. Уздина и Л. Н. Дмитривской о выделении из реальных воздействий импульса скорости [144, 171].

2.5. Спектральные энергетические характеристики землетрясений

К числу энергетических характеристик нами отнесены спектр работы сил пластического деформирования и спектр повреждаемости. По существу, эти характеристики являются двойственными, поскольку определяют зависимость энергетических показателей воздействия от его спектра.

Для описания спектра работ сил пластического деформирования и спектра повреждаемости следует рассмотреть две модели накопления повреждений в сооружении. Первая модель – упругопластическая, а вторая адаптивная с деградирующей жёсткостью.

2.5.1. Спектр работ сил пластического деформирования

Упругопластическая модель описана в [120,121], где для определения PFW рассматривается упругопластический маятник с диаграммой Прандтля (Рис. 3). Диаграмма характеризуется углом наклона α для первого участка диаграммы и пределом упругости F_{el} с предельным смещением u_{el} . Жёсткость системы $C = tg\alpha$, а период колебаний при отсутствии проскальзывания $T = 2\pi/k$; где $k^2 = C/m$; m – масса системы; предел упругости удобно выразить через условный коэффициент трения $f = F_{el}/mg$.

В процессе нагружения силы пластического деформирования работают только на втором участке диаграммы.

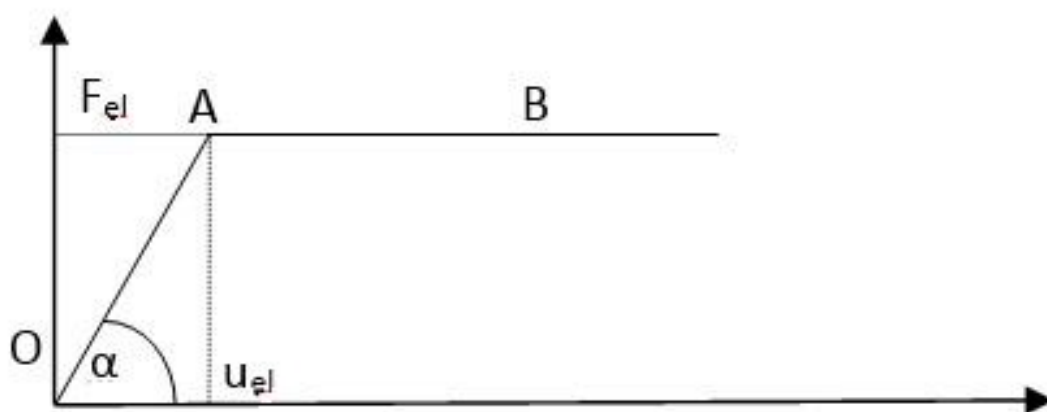


Рисунок 2.16 — Диаграмма «сила-смещение» системы для оценки силы землетрясения

Для построения спектра элементарной работы сил пластического деформирования $W(T)$ рассматриваются уравнения

- На участке OA

$$\ddot{y} + \gamma k \dot{y} + k^2 y = -\ddot{y}_0; \quad (2.38)$$

- На участке AB

$$\ddot{y} + g f \text{sign}(\dot{y}) = -\ddot{y}_0; \quad (2.39)$$

В уравнение (2.40) включена сила внутреннего трения в материале, характеризующаяся коэффициентом неупругого сопротивления γ . Значение γ влияет на величину W . У объектов массовой застройки значение γ изменяется в пределах от 0,08 до 0,2. Нижняя граница относится к металлическим и монолитным железобетонным конструкциям на скальных грунтах. Верхняя граница относится к жёстким сооружениям на сильносжимаемых грунтах. Для оценки силы землетрясения разумно использовать сооружение-представитель с $\gamma=0,1$, как усреднённое значение.

Решения уравнений (2.41), (2.42) имеют стандартный вид и на участке интегрирования записываются аналитически [116, 117]. Интегрирование начинается на участке OA (2.43), а переход на участок A-B происходит, если сила упругости C_y превысит предел упругости F_{el} . Возврат с участка AB на участок OA происходит при смене знака скорости массы относительно основания.

Построив спектры элементарных работ $W(T)$ для каждого f , можно определить потенциальную разрушительную способность землетрясения, что представляется объёмом фигуры, образованной поверхностью $W(T, f)$ (рис. 2.17).

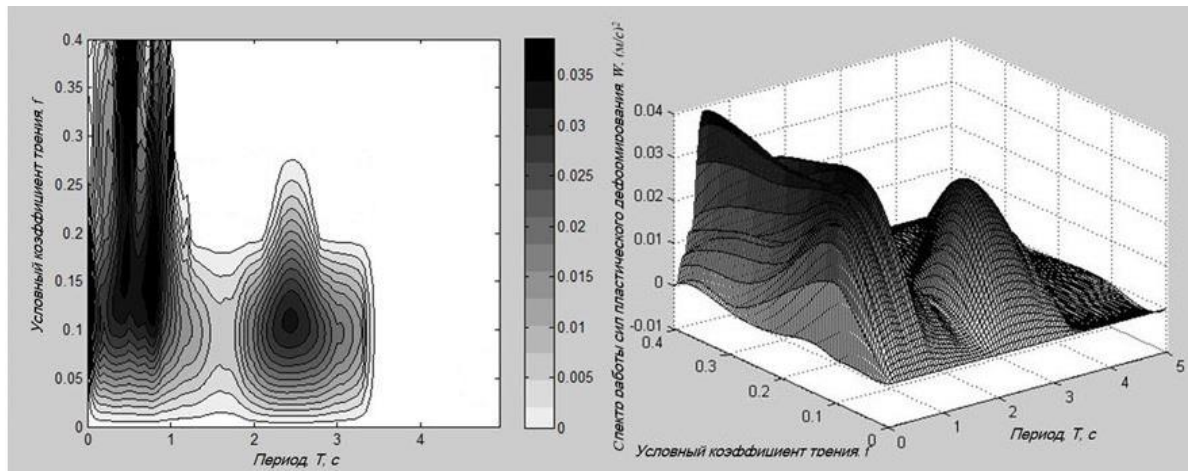


Рисунок 2.18 — Спектр работы сил пластического деформирования $W(T, f)$

Объём этой фигуры PFW (Plastic forces work – работа сил пластического деформирования) вычисляется следующим образом

$$PFW = \int_0^{T_{max}} \int_0^{f_{max}} W(T, f) dT df. \quad (2.44)$$

Исследование [120, 121] показало, что даже при больших различиях в наиболее широко используемых характеристиках сейсмического воздействия (PGA, I_A , CAV, κ) спектры элементарных работ сил пластического деформирования $W(T)$ при равных коэффициентах условного трения f и близких значениях преобладающего периода воздействия T оказались близкими. Это подтверждается полученной в статье [90] зависимостью PFW от преобладающего периода T (рис. 2.19) для фиксированных значений, так как, согласно этой статье, работа сил пластического деформирования не зависит от преобладающего периода воздействия.

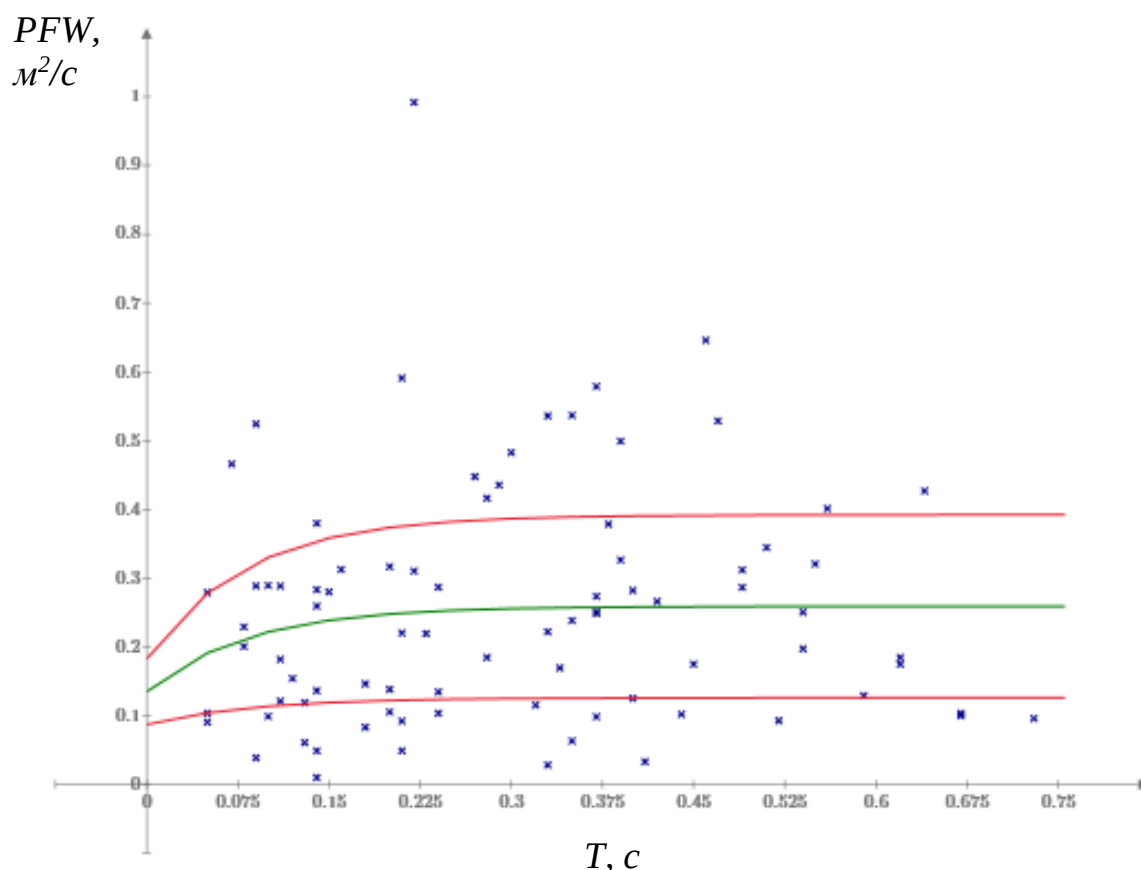


Рисунок 2.20 — Зависимость величины PFW от преобладающего периода воздействия T

$$PFW(T_{eq}) = -0,008 \cdot e^{-12 \cdot T_{eq}} - 0,116 \cdot e^{-12,08 \cdot T_{eq}} - 0,259$$

$$\sigma(T_{eq}) = \pm(-0,005 \cdot e^{-19 \cdot T_{eq}} - 0,08 \cdot e^{-12,079 \cdot T_{eq}} + 0,133) + PFW(T_{eq})$$

Предлагаемый показатель оценки сил землетрясения отражает физический смысл макросейсмического балла и не требует каких-либо условностей, связанных с установлением продолжительности землетрясения. Отсечения «безопасных» участков происходит автоматически, при этом, оно зависит от свойств сооружения. Кроме того, предлагаемый показатель даёт о землетрясении больше информации, чем использование макросейсмического балла. Например, высокочастотное землетрясение на территории, застроенной гибкими сооружениями, не приведёт к большому объёму повреждений и будет охарактеризовано как слабое или умеренное. Вместе с тем, на территории, застроенной малоэтажными жёсткими зданиями, это же землетрясение вызовет большой объем разрушений и будет охарактеризовано как сильное. При использовании предлагаемого показателя силы

землетрясения оно само найдёт объекты, которые может разрушить, что позволяет объективно оценить его силу.

2.5.2. Спектры повреждаемости сейсмического воздействия

Для адаптивных систем с деградирующей жёсткостью удобно использовать модель сооружения Кирикова-Аманкулова [7], в которой в качестве критерия накопления повреждений (силы землетрясения) используется показатель повреждаемости χ и текущий период основного тона колебаний сооружения T . Предполагается, что по мере накопления повреждений жёсткость системы будет падать, а период основного тона колебаний – возрастать, то есть показатель повреждаемости χ линейно возрастает, а период колебаний линейно падает с ростом максимального за историю нагружения перемещения системы $u_{\max}$. В момент обрушения жёсткость превращается в 0. Понятие повреждаемости было введено Л.М. Качановым [56] и Ю.Н. Роботновым [91] и характеризуется площадью части сечения занятого трещиной. В начале колебаний $\chi=0$, а в момент обрушения $\chi=1$.

Для данного типа накопления повреждений восстанавливающая сила описывается уравнением

$$R(y) = \frac{r(u) \cdot y}{1 + \kappa(u) \cdot y^2}, \quad (2.45)$$

где y – смещение опоры; u – максимальное за историю нагружения перемещение опоры; κ - параметр нелинейности.

Жёсткость системы постоянна, пока величина смещения u меньше предела упругости $u_{\text{упр}}$. Когда предел упругости превышен, жёсткость начинает линейно падать с увеличением значения максимального за историю смещения системы. Перемещение, соответствующее нулевой жёсткости системы, названо условным перемещением разрушения $u_{\text{усл}}$. Фактически, перемещение, при котором происходит разрушение сооружения, считается перемещение $u_{\text{разр}}$, при котором реакция системы достигает максимального значения. Зависимости $R(u)$ и $\gamma(u)$ показаны на рис. 2.21.

Системы с рассматриваемым типом нелинейности относятся к числу адаптивных систем, которые за счёт возникновения повреждений отстраиваются от резонанса. Для таких систем Я.М. Айзенбергом введено понятие спектра состояний системы [2, 4, 5]. Система приспособляется к программе нагружения, если спектр состояний пересечёт в некоторой точке спектр реакции.

Колебания системы с деградирующей жёсткостью описываются уравнением:

$$m\ddot{u} + \gamma\sqrt{r\dot{m}}\dot{u} + R(u) = -m\ddot{y}_0, \quad (2.46)$$

где $u, \dot{u}, \ddot{u}$ – соответственно перемещение, скорость и ускорение сооружения; m – масса сооружения; $\gamma(u_{\max})$ – коэффициент неупругого сопротивления; $R(u, u_{\max})$ – жёсткость системы; $\ddot{y}_0(t)$ – акселерограмма колебаний основания.

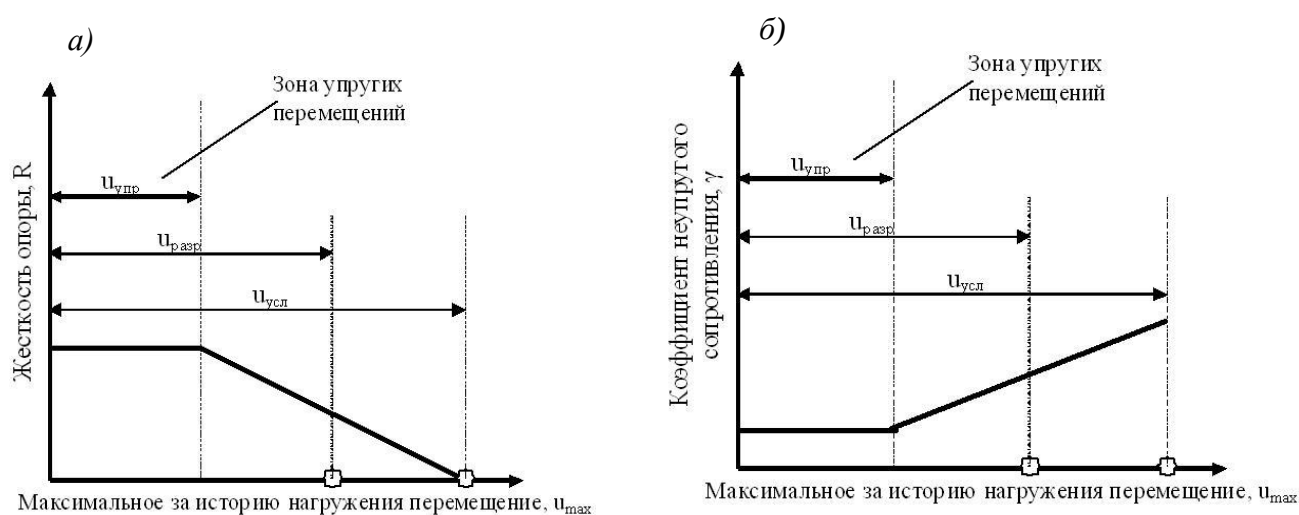


Рисунок 2.22 — Зависимость жесткости сооружения (а) и коэффициента неупругого сопротивления сооружения (б) от максимального за историю нагружения перемещения опоры

Интегрирование уравнения (2.47) осуществляется стандартными методами. Если в пределах шага интегрирования менялись характеристики системы, то ее параметры меняются в соответствии с изменением этих характеристик.

В результате можно получить зависимости конечного (после сейсмического воздействия) периода и коэффициента повреждаемости системы от начального периода её колебаний, т.е. спектры периодов и спектры повреждаемости системы. На рис. 2.23 и 2.24 приведены примеры таких спектров для Бухарестского и Табасского землетрясений.

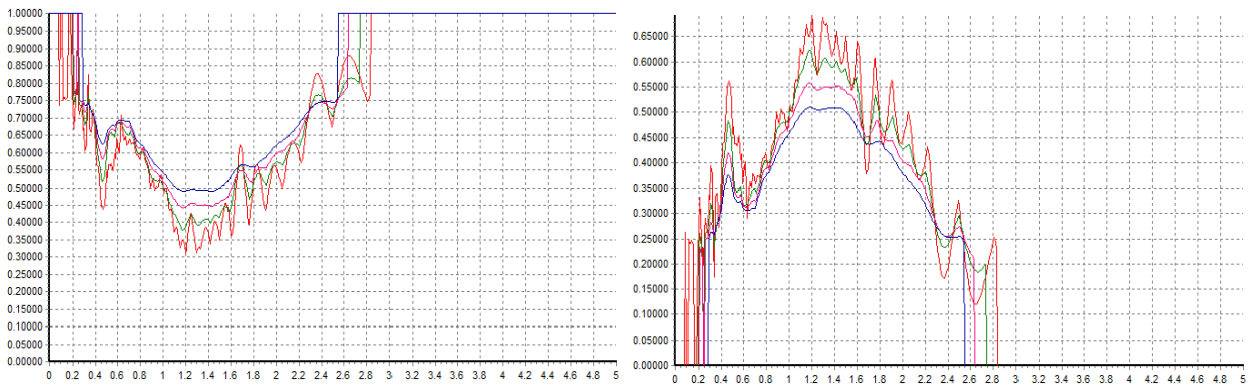


Рисунок 2.23 — Спектр периодов (слева) и повреждаемости (справа) для Бухарестского землетрясения

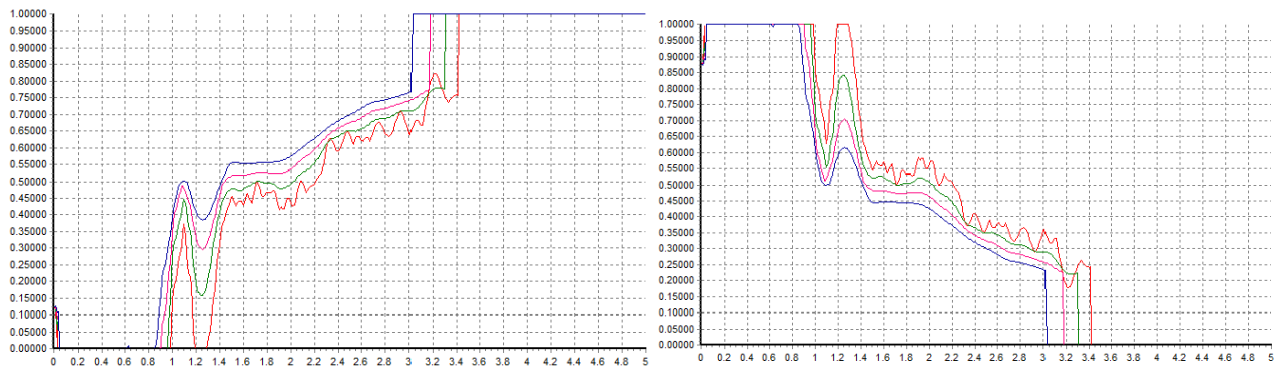


Рисунок 2.24 — Спектр периодов (слева) и повреждаемости (справа) для Табасского землетрясения

Как видно из приведённых рисунков рассматриваемые системы с принятыми характеристиками накопления повреждений должны переносить Бухарестское землетрясение без повреждений, а при Табасском землетрясении все сооружения с периодами в диапазоне от 0,05 до 1 с будут разрушены.

2.6. Выводы по главе 2

Для характеристики сейсмического воздействия необходимо задать большую группу кинематических, спектральных и энергетических характеристик. Как показали исследования, часть этих характеристик не зависит практически от преобладающего периода на акселерограмме. К числу таких характеристик относятся интенсивность по Ариасу, среднеквадратичное ускорение и абсолютная кумулятивная скорость. Эти величины могут быть использованы в качестве показателя силы сейсмического воздействия.

При задании PGA возникает необходимость учета зависимости этой величины от преобладающего периода воздействия. Полученные автором результаты хорошо согласуются с известными рекомендациями А.А.Долгой.

Спектральные кинематические характеристики, прежде всего спектр ускорений, широко применяется в теории сейсмостойкости для определения сейсмической нагрузки. Применение спектра ускорений, наряду с PGA, позволяет корректно рассчитывать линейно-упругие системы. Однако задание упругого спектра ответа не характеризует повреждаемость сооружений от землетрясения. Для этого в работе предлагается использовать спектральные энергетические характеристики, которые позволяют оценить разрушающую способность воздействия и подобрать опасное воздействие для оценки пластических деформаций и повреждаемости сооружения.

В работе предлагается использовать две новые спектральные характеристики воздействия. Это спектр работ сил пластического деформирования и спектр повреждаемости. Спектр работ сил пластического деформирования введён А.М.Уздиным и рассмотрен в ряде исследований его учеников. Спектр повреждаемости введён автором и развивает подход быстрой оценки сейсмостойкости сооружений. Первая характеристика характерна для стальных конструкций и должна сопоставляться с работой монотонного нагружения сооружения. Вторая характеристика характерна для каменных и бетонных конструкций и оценивается в первом приближении величиной снижением жёсткости сооружения в процессе колебаний.

Глава 3. Задание параметров сейсмического воздействия в зависимости от сейсмичности площадки и ответственности сооружения

При моделировании сейсмического воздействия одним из базовых вопросов является вопрос о задании его расчётных характеристик. Несмотря на достаточный уровень исследования энергетических характеристик, нормы разных стран до сих пор регламентируют лишь пиковые величины кинематических характеристик.

У проектировщика при задании расчётного воздействия остаётся возможность ориентироваться лишь на собственные частоты колебаний сооружения и сейсмическую опасность площадки строительства. А непосредственно при проектировании приходится использовать единственный регламентированный линейно-спектральный метод расчёта сооружения, который использует ускорения, соответствующие отмененной шкале балльности [34] и позволяет корректно исследовать работу сооружения только в упругой стадии. Такая ситуация ограничивает инженера в выборе расчётного воздействия, которое без учёта, например, энергетических характеристик может является не самым опасным.

Помимо этого, в настоящее время во всем мире осуществляется переход на многоуровневое проектирование, когда возникает необходимость задания воздействий различной повторяемости. В простейшем случае это проектное (ПЗ) и максимальное расчётное (МРЗ) землетрясения, которые рассмотрены в обзорной части диссертации. Однако до сих пор отсутствует методика задания сейсмических воздействий для проведения расчётов на действие ПЗ и МРЗ для гражданских сооружений (не входящих в первый класс опасности), которая учитывала бы повторяемость воздействия, опасность его для сооружения и сейсмическую опасность площадки строительства.

Прежде всего инженеру надо задать средний уровень сейсмических ускорений, возможный на площадке строительства. Однако в расчеты, как известно [42, 143, 145 и др.], должны вводиться не средние значения нагрузки, а их значения, заданные с некоторой вероятностью превышения, иными словами, необходима оценка доверительных границ для анализируемых параметров. Эту оценку будем

проводить на основе ранее выполненных исследований, опубликованных в работе А.А. Долгой [39]. Базовым для этого является распределение величины PGA.

3.1. Задание величины PGA в зависимости от повторяемости воздействия и сейсмической опасности на площадке строительства и срока службы сооружения

Исходными величинами для оценки расчётного уровня сейсмического воздействия, т.е. расчётной величины PGA, должны являться расчётная повторяемость воздействия T_{calc} , ситуационная сейсмичность на площадке строительства и срок службы сооружения

Величина повторяемости T_{calc} должна определяться собственником. Это, по существу, повторяемость отказов. Для проектного землетрясения (ПЗ) это нарушение штатной работы сооружения. В практике сейсмостойкого строительства эта величина принимается в диапазоне от 20 до 300 лет [117, 149, 155, 162]. Если собственник является государственным органом, то он должен нормировать эту повторяемость.

Для МРЗ повторяемость должна быть существенно выше – от 1000 до 5000 лет, а для ответственных сооружений ещё выше.

Следует отметить, что вероятность отказов, соответствующая указанным повторяемостям ПЗ и МРЗ достаточно высока. Она описывается законом Пуассона [105]

$$P = 1 - e^{-\frac{T_{life}}{T_{calc}}}, \quad (3.1)$$

где T_{life} – срок службы сооружения

При $T_{life}=50$ лет, вероятность отказа при ПЗ за срок службы составит 86,53% для $T_{calc}=100$ лет и 28,3% для $T_{calc}=300$ лет. В пересчёте на один год $0,087 < P < 0,028$, что соответствует данным работы [103], в которой эта вероятность принята равной 0,1. Отметим, что согласно [103] при таком уровне ПЗ объекты массового строительства должны работать в упругой стадии под расчётной (нормативной) сейсмической нагрузкой с коэффициентом $K_1 \approx 0,25$.

Для задания расчётного уровня сейсмического воздействия по шкале балльности используется логарифмическая зависимость

$$I = \frac{\lg(T) - b}{a}, \quad (3.2)$$

где a и b – коэффициенты, задаваемые сейсмологами для каждого региона [105]. По этим данным построены карты ОСР.

Инженер может решить обратную задачу, восстановив указанные коэффициенты по картам ОСР, исходя из ситуационной сейсмичности на площадке строительства. При этом задаются нормативные значения балла и соответствующие ему повторяемости. Например, для района с ситуационной сейсмичностью 7, 8, 9 получаются повторяемости 7-балльных землетрясений раз в 500 лет, 8-балльных – раз в тысячу лет и 9-ти балльных – раз в 5000 лет. Соответственно формулы для коэффициентов a и b имеют следующий вид [114].

$$a = \frac{\Delta a}{\Delta}; \quad (3.3)$$

$$b = \frac{\Delta b}{\Delta}, \quad (3.4)$$

где $\Delta = 3(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) - (I_a + I_b + I_c)^2$;

$\Delta a = 3(I_a \ln(T_a) + I_b \ln(T_b) + I_c \ln(T_c)) - (I_a + I_b + I_c)(\ln(T_a) + \ln(T_b) + \ln(T_c))$;

$\Delta b = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)(\ln(T_a) + \ln(T_b) + \ln(T_c)) - (I_a \ln(T_a) + I_b \ln(T_b) + I_c \ln(T_c))(I_a + I_b + I_c)$;

I_a, I_b, I_c – сила землетрясения в баллах по картам А, В и С;

T_a, T_b, T_c – повторяемость землетрясений силой I_a, I_b, I_c по картам.

По коэффициентам a и b и величине T мы можем определить расчётную силу землетрясения в баллах I .

$$I = \frac{\log_{10} T - b}{a}. \quad (3.5)$$

Получив значения балла, можно перейти к значению пикового ускорения. Для этого авторы использовали новую шкалу балльности [33]. В новой шкале балльности зависимость PGA от I можно аппроксимировать следующей формулой.

$$PGA(I) = C_0 + C_1 \cdot e^{-\alpha \cdot I} + C_2 \cdot e^{-\beta \cdot I}, \quad (3.6)$$

где $C_0 = -0,003$; $C_1 = 0,0007$; $C_2 = -0,806$; $\alpha = -0,8$; $\beta = -0,806$.

Нетрудно видеть, что эта формула даёт, значения, приведённые в шкале Ф.А. Аптикаева [8, 33].

Для зданий массового строительства с периодом собственных колебаний порядка $T = 0,3$ секунды пиковые ускорения резонансных воздействий соответствуют нормативным, так как именно по разрушениям зданий массовой постройки определялся балл и соответствующие значения PGA. Для воздействий с другим преобладающим периодом величина PGA должна уточняться. С этой целью авторами были использованы зависимости $PGA(T_{eq})$, полученные в [119] и согласующиеся с данными А.А. Долгой [39]. По этим зависимостям, после их деления на значения ускорений при $T_{eq} = 0,3$ с, был получен поправочный коэффициент K_T к PGA в зависимости от периода колебаний T_{eq} . Зависимость $K_T(T_{eq})$ представлена на рисунке 3.1. В результате получаем расчётные ускорения с учётом фактического периода колебаний сооружения.

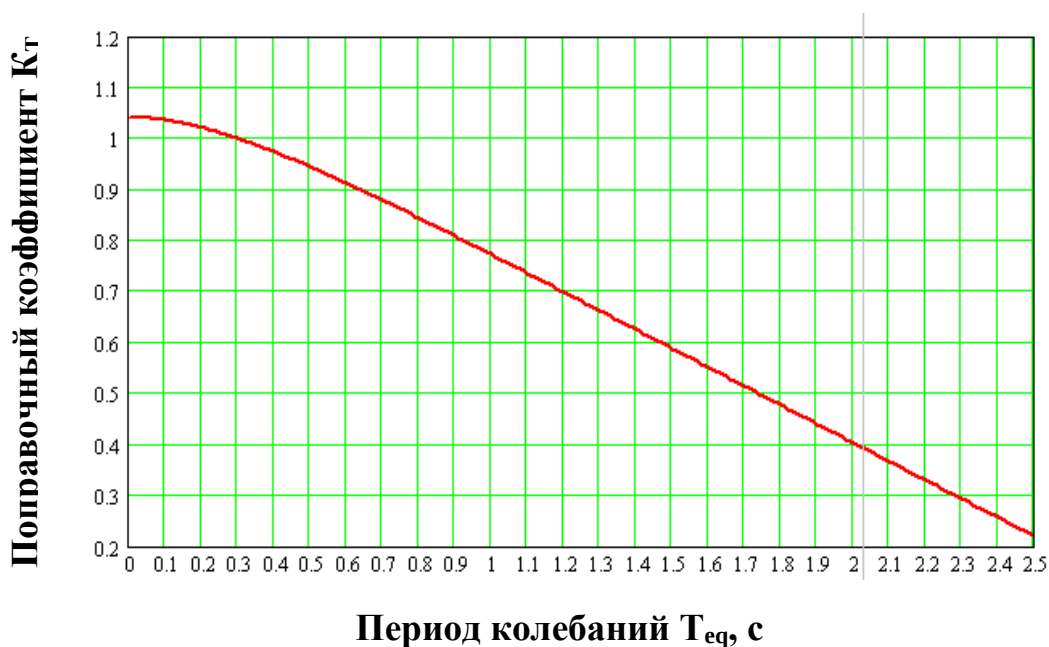


Рисунок 3.1 — Зависимость поправочного коэффициента K_T от периода колебаний T_{eq}

Изложенный подход был заложен в программу для определения расчётных ускорений, которая была реализована в рамках гранта ПГУПС [11,12], по которому

соискатель являлся руководителем работ. При этом было разработано программное обеспечение на языке C++ в среде Windows для вычисления расчетных ускорений. Диалоговое окно программы представлено на рис. 3.2 .

Исходными данными в программе являются

- срок службы сооружения (T_{life}),
- ситуационная сейсмичность по картам ОСР (I_a , I_b , I_c) ;

соответствующие им периоды (T_a , T_b , T_c) задаются в программе автоматически.

- преобладающий период воздействия, равному периоду колебаний сооружения (T_{eq}).
- повторяемость опасного землетрясения, которая с точки зрения заказчика должно вызвать предельное состояние.

Используя все эти данные, пользователь программы может получить пиковое ускорение и расчётную балльность, что целесообразно применять при проектировании объектов, сильно отличающихся по своим характеристикам от объектов массового строительства. Текст программы и копия свидетельства о регистрации приведены в приложении к диссертации.

Однако, вычисленные значения не учитывают возможного разброса значений PGA вокруг среднего значения, приведенного в Шкале балльности [33]. Чтобы учесть этот разброс, требуется определить статистические характеристики величины PGA.

Срок службы сооружения T_{life} =

Ситуационная сейсмичность
 I_a = I_b = I_c =

Средняя повторяемость Расчетного Землетрясения в годах T =

Преобладающий период воздействия $T_{eq}(\text{сек})$ =

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Вероятность землетрясения при заданной повторяемости P =

Расчетная балльность I =

ПИКОВОЕ УСКОРЕНИЕ A =

Рисунок 3.2 — Интерфейс программы для определения расчётных ускорений

3.2. Оценка доверительных границ для кинематических характеристик

Рассмотренные в главе 2 характеристики сейсмических воздействий разделяются на две группы: зависящие от преобладающего периода на акселерограмме (PGA , PGV , SED , κ , σ_v , $\bar{t}$) и слабо зависящие от спектрального состава воздействия (I_A, σ_A , CAV).

Для характеристик первой группы статистические характеристики зависят от преобладающего периода на акселерограмме землетрясения. Когда преобладающий период задан, выполняется поиск доверительных границ для рассматриваемой характеристики. Так как величина кинематических характеристик зависит от преобладающего периода воздействия, границы, также как и величина характеристики описываются некоторой функцией преобладающего периода. В частности, для PGA доверительные границы были оценены А.А.Долгой в [145] при анализе 240 записей 8-балльных землетрясений. В диссертационной работе получены идентичные результаты на основе базы данных из 100 9-балльных записей. Для этого выполнена оценка среднеквадратичного отклонения величины PGA , которое выражается аппроксимирующей зависимостью

$$\sigma(T) = \mp 19,923 \pm 20,393 \cdot (e^{0,04 \cdot T} + 0,12 \cdot e^{-1,98 \cdot T}) + PGA(T) \quad (3.7)$$

и представлено на рисунке 3.1.

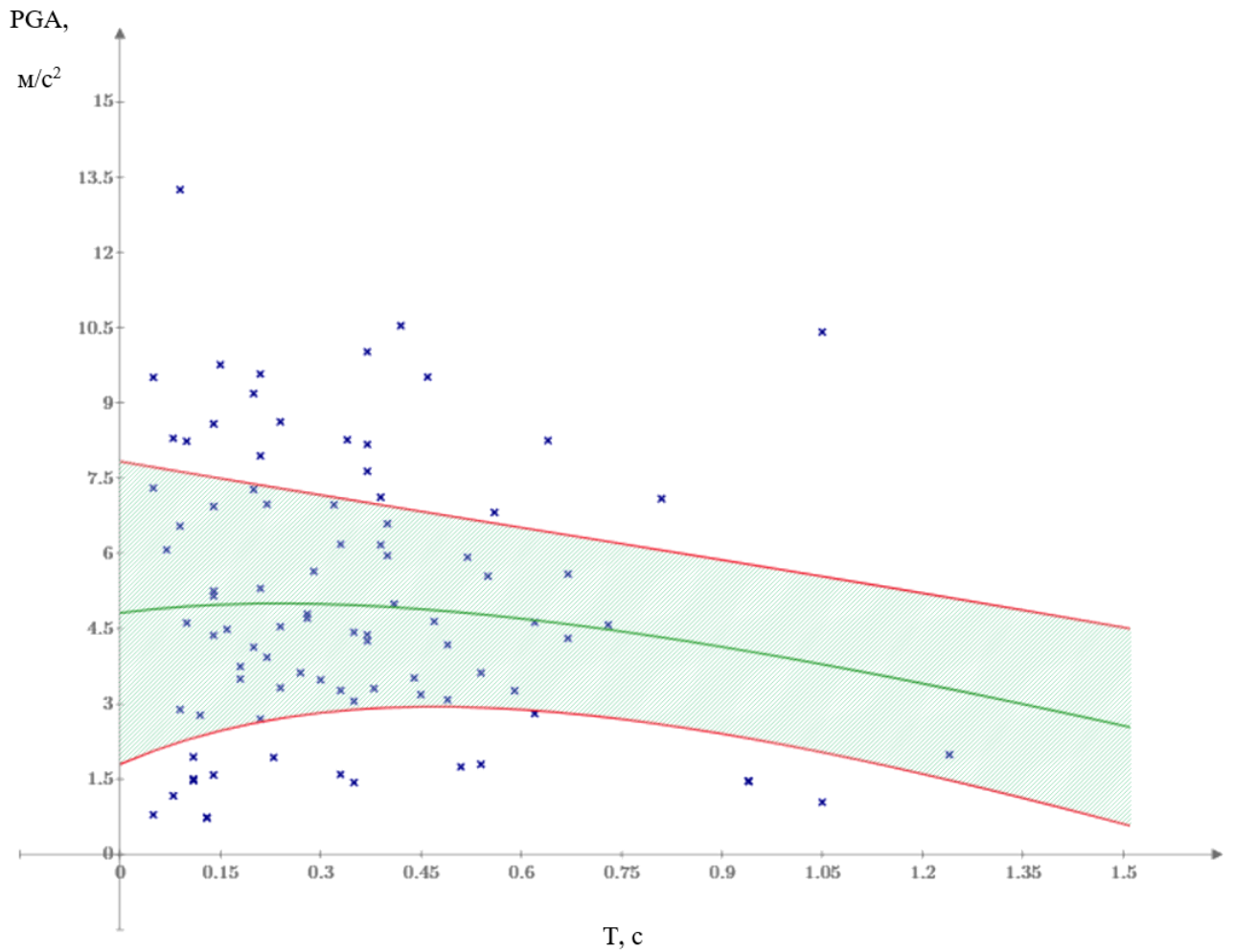


Рисунок 3.3 — Аппроксимация $PGA(T)$ и $PGA(T) \pm \sigma$

Далее, исходя из значений средней величины и среднеквадратичного отклонения, были определены параметры распределения. В качестве ф.п.р., так же, как в [145], был использована функция распределения Вейбулла, имеющая вид:

$$P(Q) = 1 - e^{-\left(\frac{Q}{\theta}\right)^\beta}, \quad (3.8)$$

где $P(Q)$ – вероятность превышения расчётной величины;

Q – математическое ожидание, в данном случае равное среднему значению из опытных данных;

θ – параметр масштаба;

β – параметр формы.

Параметры масштаба и формы связаны с математическим ожиданием μ и дисперсией σ^2 следующим соотношением [102]

$$\begin{cases} \bar{Q} = \theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \\ \sigma_Q^2 = \theta^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^2 \right\} \end{cases} \quad (3.9)$$

где $\bar{Q}$ - математическое ожидание случайной величины, σ_Q - среднеквадратичное отклонение случайной величины, Γ – гамма функция.

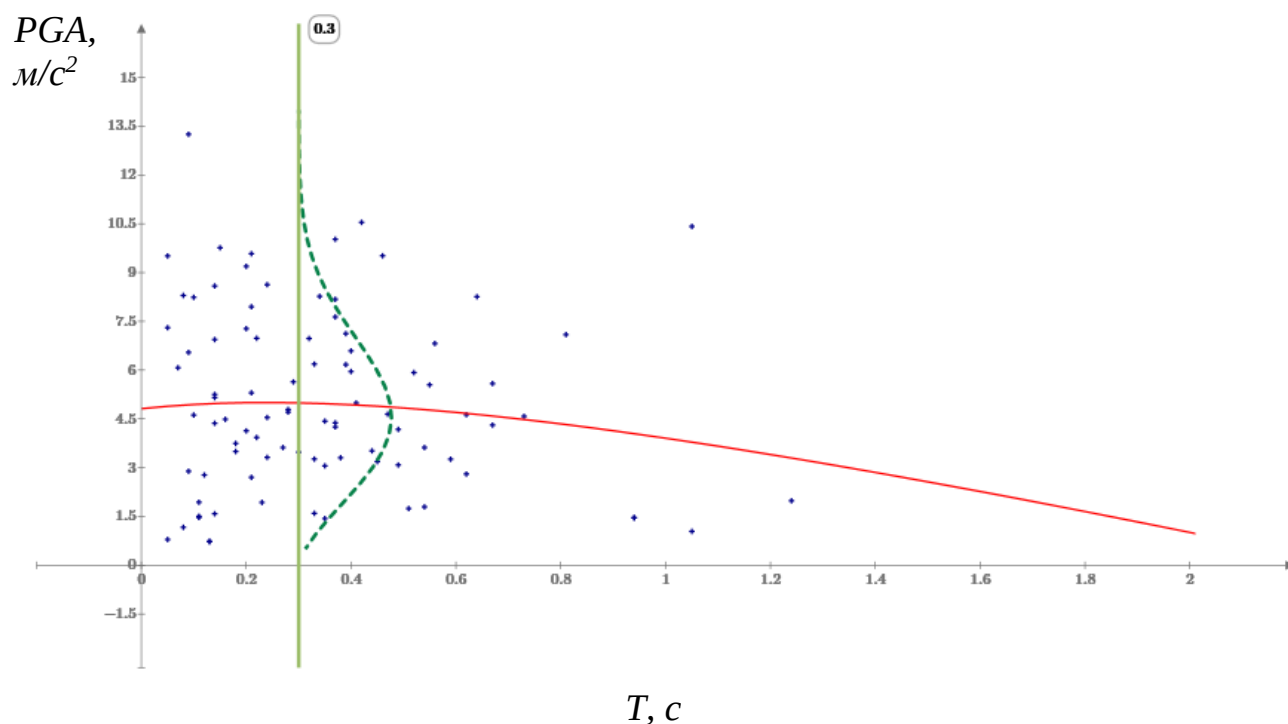


Рисунок 3.4 — Функция плотности распределения PGA для T=0,3 с

Одна из функций плотности распределения, полученных автором и схожей с результатами Долгой А.А. для различных T приведена на рисунке 3.4.

Аналогичная методика использовалась для поиска параметров распределения κ . Алгоритм этой методики рассмотрен более подробно ниже.

1. Найдена функции $\sigma(T)$ для κ (рис. 3.3):

$$\sigma(T) = \mp 3,62 \pm 3,532 \cdot (e^{-21 \cdot T} + 0,7 \cdot e^{-1,643 \cdot T}) + \kappa(T); \quad (3.10)$$

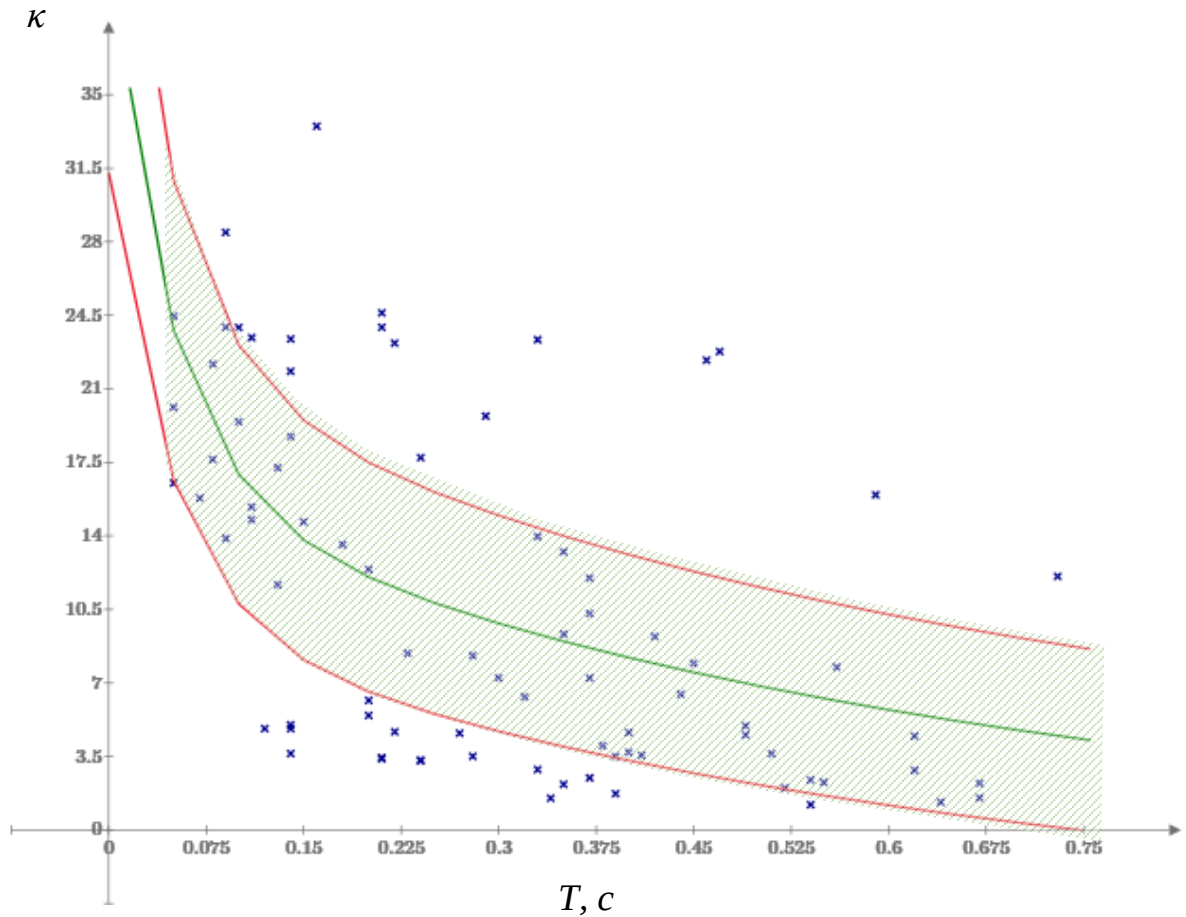


Рисунок 3.5 — Аппроксимация $\kappa(T)$ и $\kappa(T) \pm \sigma$

2. Составлена система уравнений для определения параметров распределения:

$$\begin{cases} 9.836 = \theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \\ 5.137^2 = \theta^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^2 \right\} \end{cases} \quad (3.11)$$

Параметры распределения θ и β определялись методом перебора на ЭВМ, и в данном случае для $T=0,3$ с $\theta=11,099$ и $\beta=2,002$.

Функция плотности вероятности величины κ для $T=0,3$ с изображена на рис. 3.6.

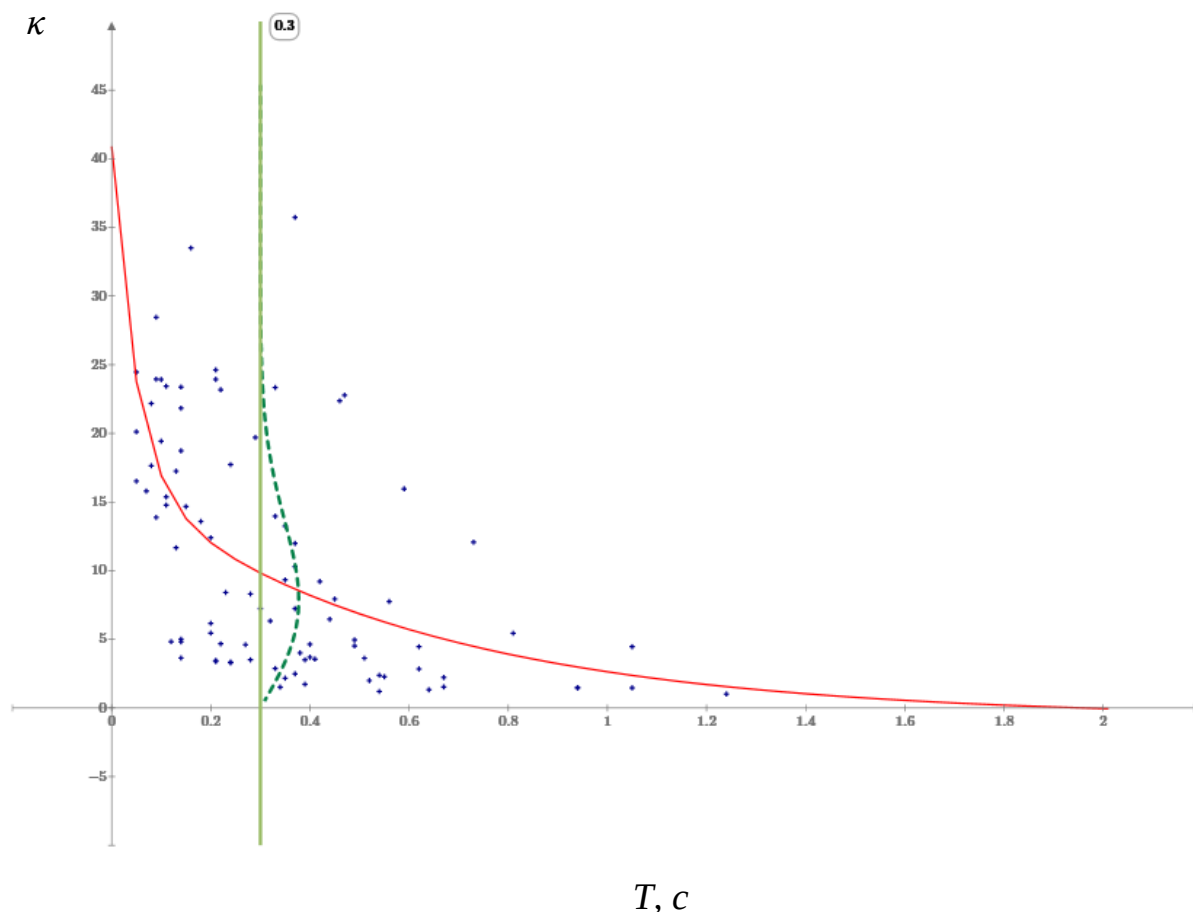


Рисунок 3.6 — Плотность распределения показателя гармоничности для $T=0,3$ с

Как видно из рисунка, дисперсия показателя гармоничности к достаточно высока. При задании доверительных границ следует учитывать, что наиболее опасным является воздействие с меньшей величиной k . Это означает, что при генерации воздействий следует вводить в расчёт нижнюю границу доверительного интервала.

3. Были определены расчётные величины коэффициента гармоничности s для наиболее важных с нашей точки зрения вероятностей превышения. Эти значения приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Величины k с заданной вероятностью превышения

Обеспеченность, %	Величина k
40	7,935
30	6,632
20	5,427
10	3,607

3.3. Оценка доверительных границ для энергетических характеристик сейсмического воздействия

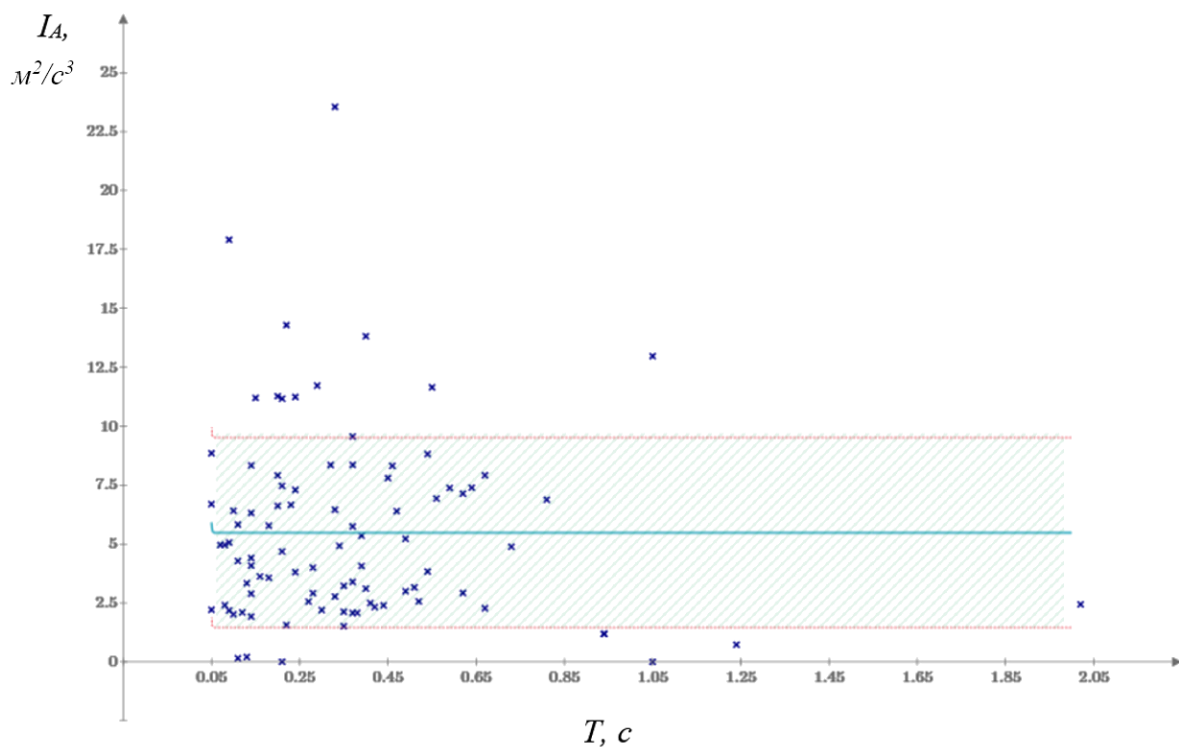
Из проанализированных в разделе 2 энергетических параметров были приняты для обработки те параметры, которые не зависят практически от спектрального состава воздействия. К числу этих параметров относятся интенсивность по Ариасу, кумулятивная абсолютная скорость, среднеквадратичные ускорения и показатель работы сил пластического деформирования.

Разброс величин показан на графиках зависимости энергетических характеристик от преобладающего периода воздействия ниже (рис. 3.7-3.11). Чем меньше коэффициент вариации, тем уже полоса отклонения от средней величины. Как видно из графиков, коэффициенты вариации для интенсивности по Ариасу I_A , кумулятивной абсолютной скорости, среднеквадратичного ускорения и работы сил пластического деформирования для $f=0,25$ сопоставимы, а коэффициент вариации для принятого постоянным SED оказался недопустимым (рис 3.11), что лишний раз подтверждает его тесную связь с преобладающим периодом воздействия.

В таблице 3.2 приведены значения, используемые при определении параметра β величин и непосредственно сам параметр β для величин I_A и CAV, а также расчётные величины, соответствующие заданным вероятностям превышения.

Таблица 3.2 — Параметры распределения для энергетических характеристик

Характеристика	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Параметр распределения β	Параметр распределения θ
Интенсивность по Ариасу I_A	5,44	4,03	0,74	1,365	5,944
Абсолютная кумулятивная скорость CAV	19,096	10,502	0,55	1,89	21,516
Среднеквадратичное ускорение σ_A	1,425	0,569	0,399	2,701	1,602
Работа сил пластического деформирования PFW	0,089	0,08	0,899	1,114	0,093

Рисунок 3.7 — Разброс для постоянной величины I_A

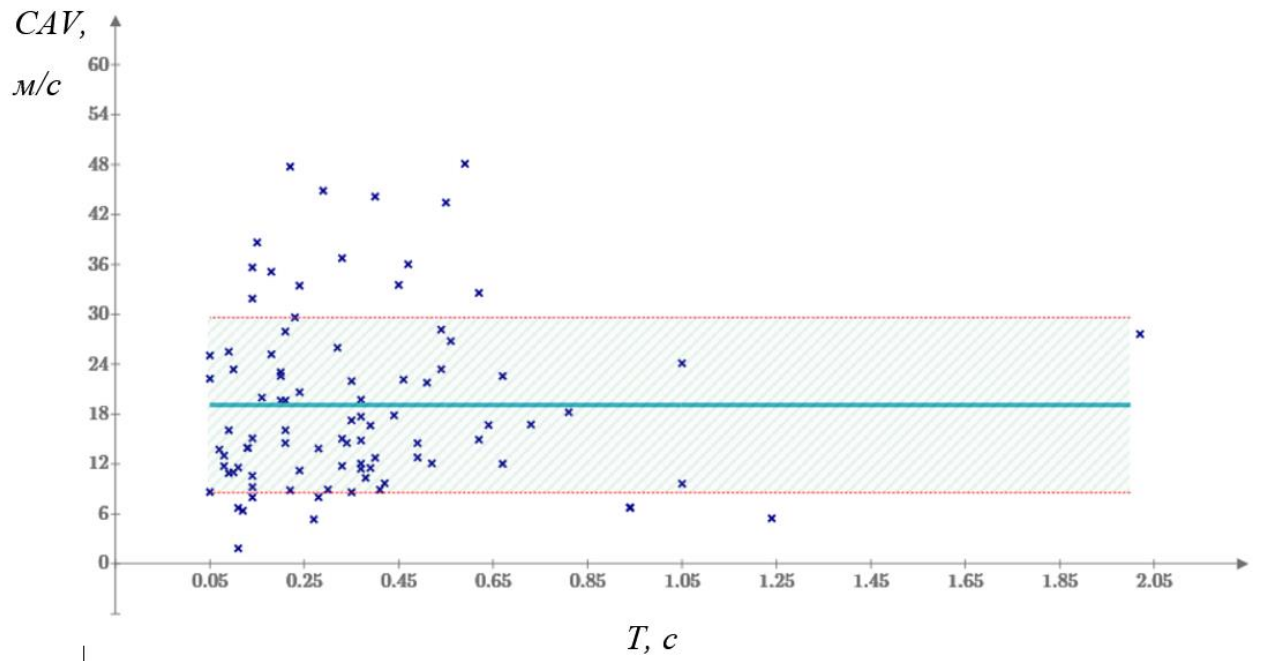


Рисунок 3.8 — Разброс для постоянной величины CAV

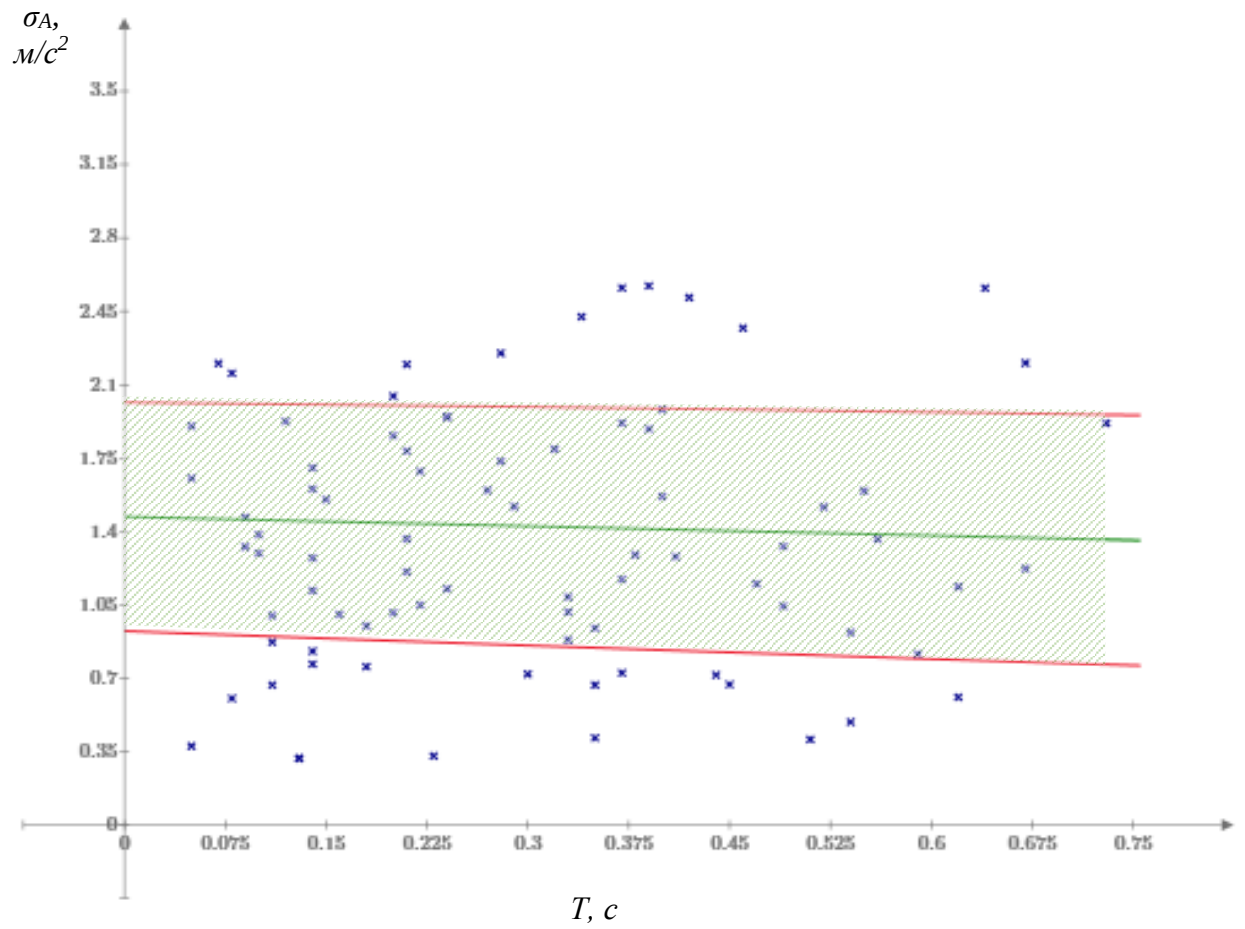


Рисунок 3.9 — Разброс для постоянной величины σ_A

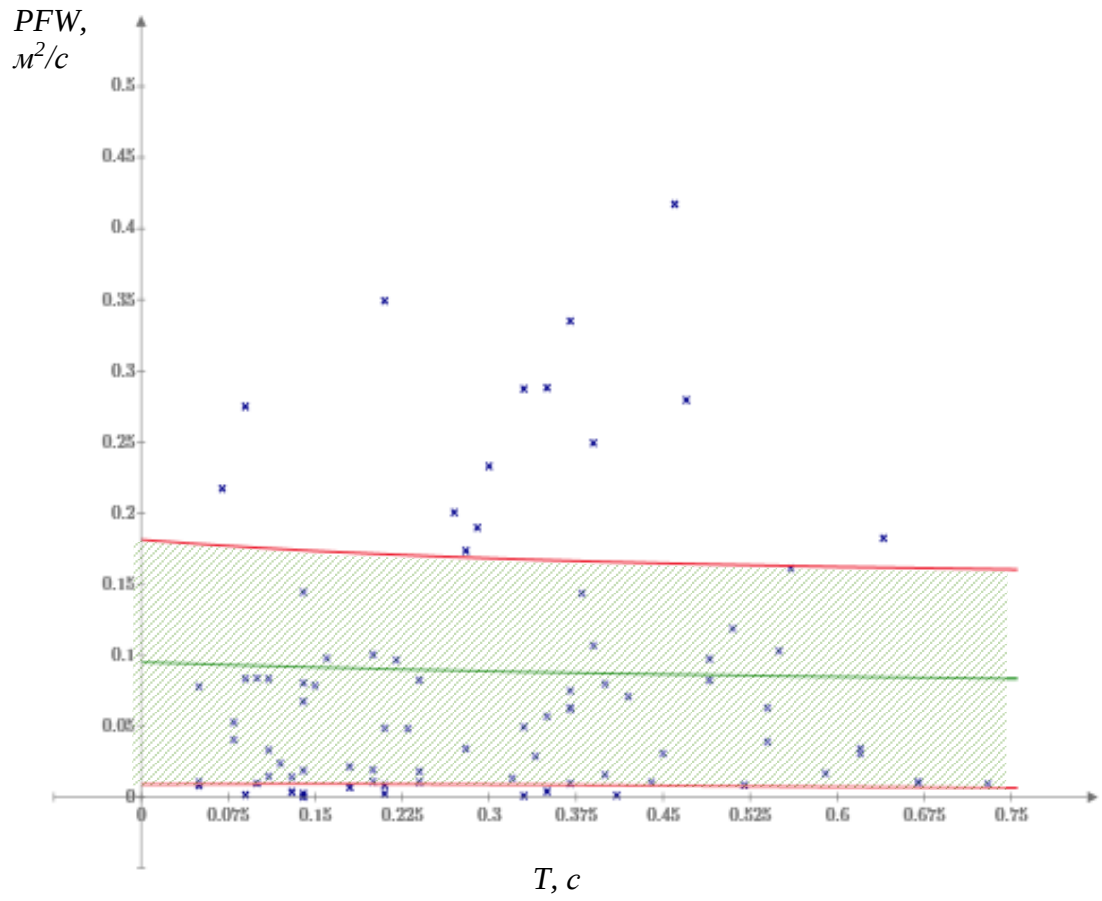


Рисунок 3.10 — Разброс для постоянной величины PFW

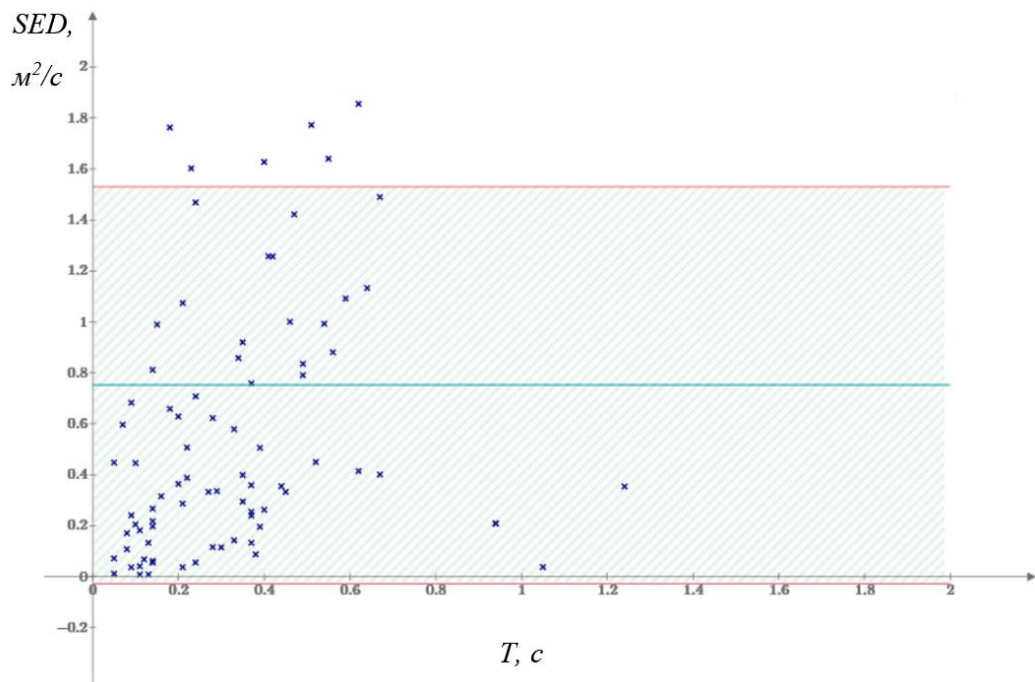


Рисунок 3.11 — Разброс для постоянной величины SED

Таблица 3.3 — Величины постоянных энергетических характеристик при их различной обеспеченности

Обеспеченность, %	CAV, м/с	I_A , м ² /с ³	σ_A , м/с ²	PFW, м ² /с ²
40	20,543	5,575	1,551	0,086
30	23,736	6,81	1,716	0,11
20	27,677	8,423	1,911	0,143
10	33,451	10,951	2,182	0,197

Для величины SED был реализован алгоритм, рассмотренный ранее в разделе 3.2 настоящей главы. Рисунки и выкладки, связанные с определением параметров распределения представлены ниже.

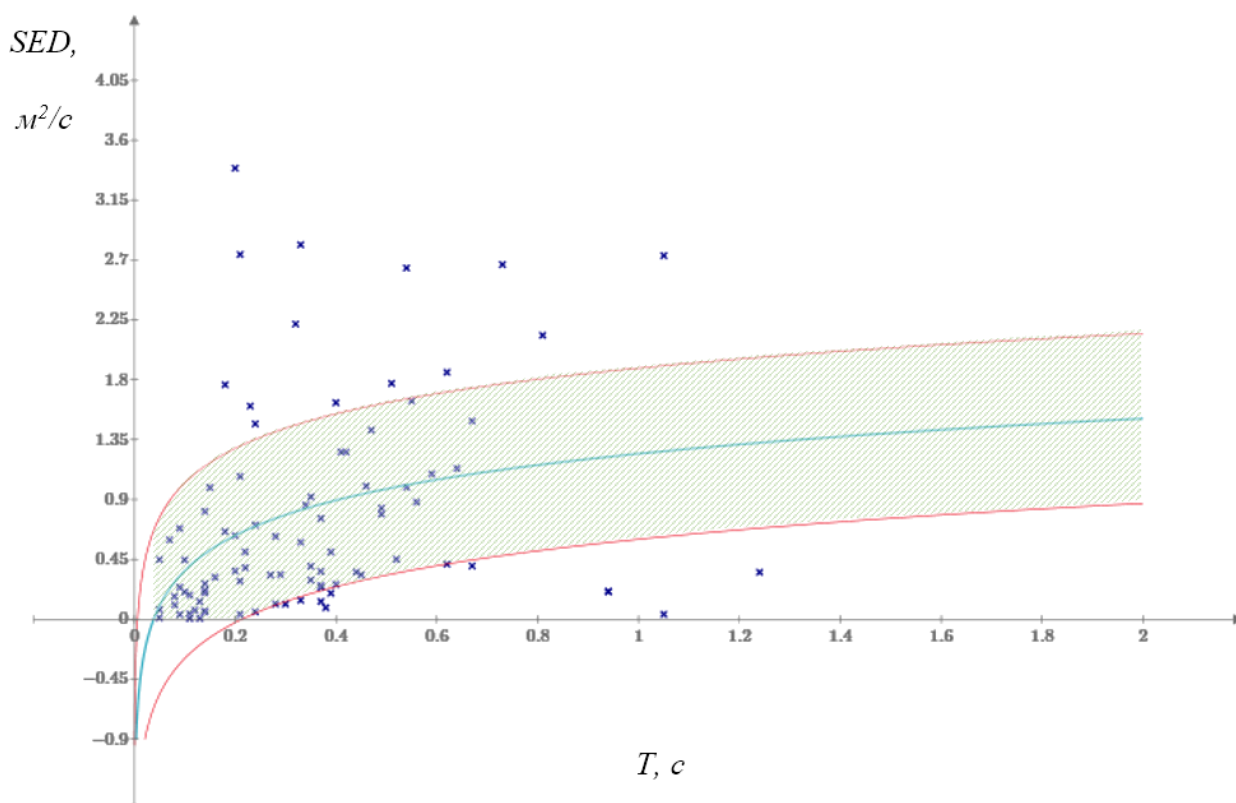


Рисунок 3.12 — Аппроксимация $SED(T)$ и $SED(T) \pm \sigma$

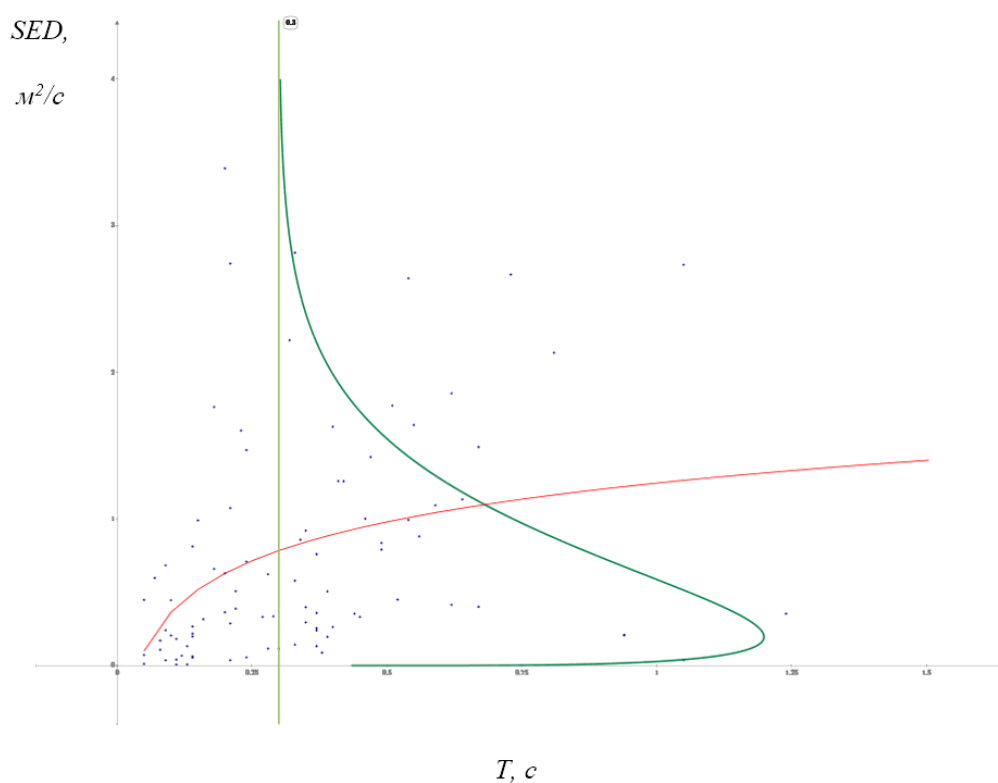


Рисунок 3.13 — Плотность распределения величины SED для $T=0,3$

Таблица 3.4 — Величины SED при ее различной обеспеченности

Обеспеченность, %	Величина SED, $\text{м}^2/\text{с}$
40	0,777
30	0,973
20	1,237
10	1,664

3.4. Выводы по главе 3. Рекомендации по заданию параметров воздействия

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации

1) Уровень расчётного воздействия, задаваемый в действующих нормах величиной пиковых ускорений грунта PGA, должен ориентироваться на натурные данные, приведённые в действующих ГОСТ (Шкале балльности) и сейсмогеологических условий на площадке строительства. Имеющиеся у автора натурные данные по значениям PGA согласуются с данными шкалы балльности. В разделе диссертации описана программа, разработанная при участии автора,

позволяющая задать расчётные значения PGA в зависимости от ситуационной сейсмичности на площадке строительства и допустимой повторяемости предельного состояния, для которого определяется расчётное значение PGA. Дополнительно предлагается учитывать влияние спектрального состава на пиковые значения PGA.

2) Для принятия инженерных решений задания среднего уровня воздействия недостаточно. Необходимо дополнительно задавать доверительные границы рабочих параметров. В разделе рассмотрено построение доверительных границ для кинематических и энергетических характеристик воздействия.

3) Параметры, определяющие кинематические характеристики воздействия, зависят от преобладающего периода на акселерограмме землетрясения. В работе рассмотрены математическое ожидание и доверительные границы для PGA и коэффициента гармоничности. Следует отметить, что данные по величине PGA хорошо согласуются с аналогичными данными, полученными А.А.Долгой при анализе записей 8-балльных землетрясений. Данные по коэффициенту гармоничности получены автором впервые. Они уточняют известные представления, отражённые в нормах США и анализ этого коэффициента, выполненный ранее О.А.Сахаровым.

4) Важным при задании коэффициента гармоничности является тот факт, что его увеличение ведет к распределению энергии колебаний между различными частотными компонентами воздействия. Поэтому при генерации расчетных воздействий в запас прочности следует вводить нижнюю доверительную границу этой величины.

5) Энергетические характеристики сейсмического воздействия (I_A , CAV , σ_A , PFW) не зависят от спектрального состава воздействия. Это позволяет задать их ожидаемую величину, как константу, независимо от преобладающего периода воздействия. Соответствующие величины и их доверительные интервалы приведены в диссертации.

6) Среди энергетических характеристик имеются такие, которые значительно изменяются при изменении преобладающего периода воздействия. К их числу

относится спектральная плотность сейсмической энергии (SED). В работе оценены зависимости параметров этой величины от преобладающего периода воздействия.

7) среди энергетических характеристик наименьший разброс данных оказался для абсолютной кумулятивной скорости CAV. Этот результат соответствует данным американских специалистов, рекомендовавшим CAV в качестве универсальной характеристики силы землетрясения [159].

Глава 4. Модели сейсмического воздействия для ПЗ и МРЗ

4.1. Задача моделирования воздействия для расчета на действие ПЗ и МРЗ

В мировой инженерной практике принято разделять два типа предельных состояний.

Первая группа — состояния, при которых происходит исчерпание несущей способности (прочность, устойчивость или выносливость) сооружений при соответствующих комбинациях нагрузок, которые могут также сопровождаться разрушениями любого вида (вязкое, усталостное, хрупкое), превращением системы в механизм, образованием трещин, цепи пластических шарниров и др.

Вторая группа — состояния, при которых нарушается нормальная эксплуатация сооружений или исчерпывается ресурс их долговечности вследствие появления недопустимых деформаций, колебаний и иных нарушений, требующих временной приостановки эксплуатации сооружения и выполнения его ремонта. Ко второму предельному состоянию для железобетона также относится чрезмерное раскрытие трещин.

Первое предельное состояние предусматривает невозможность дальнейшей эксплуатации сооружения. Необходимость прекращения эксплуатации конструкций может быть вызвана: потерей сопротивляемости материала действию внешних сил и развитием недопустимых общих деформаций.

Обычно такое состояние предусматривает отсутствие жертв, а также аварий на опасных и жизнеобеспечивающих предприятиях. Расчёт предусматривает работу материалов в упругопластических и пластических стадиях разрушения, и, как следствие, после восприятия расчётных нагрузок недопустимость дальнейшей нормальной эксплуатации.

После второго предельного состояния предусматриваются условия нормальной эксплуатации сооружения. В этом случае сооружение должно работать упруго, а воспринимаемая нагрузка не должна превышать нормативной. В российских нормах такие условия работы регламентируются предельными деформациями конструкции (сюда также относится и предельная величина раскрытия трещин защитного слоя бетона)

Естественно, что при оценке возникновения первого предельного состояния должны учитываться более редкие нагрузки, чем при оценке второго.

Если перейти в оценке предельных состояний на язык ущерба, то после второго предельного состояния ущерб минимален, а после первого сооружение теряется полностью, т.е. ущерб составляет 100%. Понятно, что по мере развития инженерного дела возникает необходимость более полной детализации ущербов и рассмотрение не двух, а трех или четырех групп предельных состояний, характеризующихся различными физическими признаками и промежуточными между 0 и 100% значениями ущерба. На рис. 4.1 представлен в качестве примера плакат из доклада профессора М.Х. Султанова из государственного «Института проблем транспорта энергоресурсов» республики Башкортостан, представленного в интернете (<https://www.slideserve.com/cybele/4283468>).

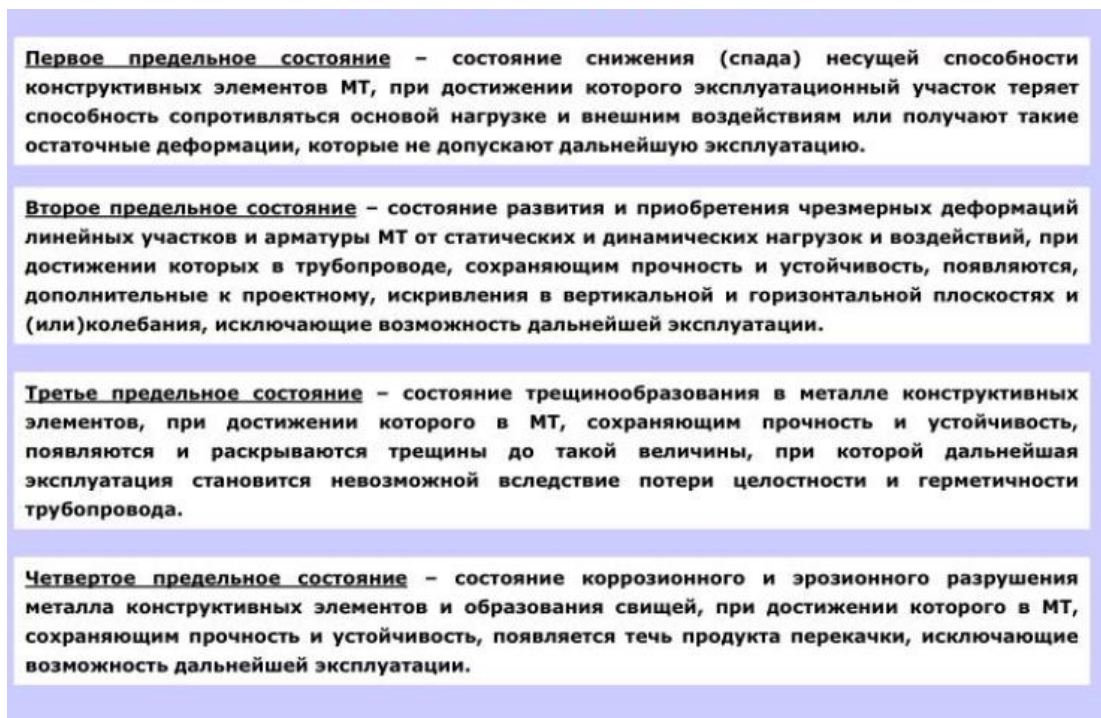


Рисунок 4.1 — Предельное состояние магистральных трубопроводов по М.Х. Султанову

При задании расчётного сейсмического воздействия эти стадии также должны быть учтены. В литературе по сейсмостойкому строительству [6, 14, 117 и др.] разделяют два вида расчётных воздействий проектное и максимальное расчётное землетрясения. При проектировании особо опасных объектов, к которым, в частности, относятся АЭС, во всем мире [14, 110] явно выделяют ПЗ и

МРЗ. При проектировании прочих объектов в России оперируют с одним типом расчётного воздействия, который по существу является МРЗ [49, 75]. В зарубежной практике для каждого типа объектов регламентируется уровни воздействия. Наиболее чётко такая регламентация сформулирована в Еврокоде-8. В Китае, Франции, Японии и Канаде также разделяют ПЗ и МРЗ. А в нормах Италии существует дополнительное разделение ПЗ и МРЗ на стадии работы. Сравнительная характеристика норм приведена в таблице № 4.1.

Переход на Еврокод произошёл в начале века, но регламентация воздействий ПЗ и МРЗ до сих пор вызывает вопросы. Даже для двух воздействий инженеры могут получить лишь рекомендуемую повторяемость [149]. Между тем, теория сейсмостойкости активно развивается, переходя от проектирования сейсмостойких сооружений к проектированию сооружений с заданными параметрами предельных состояний [57, 58, 146, 167] и, в перспективе, к проектированию сценариев накопления повреждений [134]. Таким образом, в настоящее время имеет место противоречие между требованиями проектировщиков к заданию различных типов сейсмического воздействия и имеющимися разработками по моделированию таких воздействий.

В первую очередь следует определиться с заданием сейсмических воздействий для ПЗ и МРЗ. Как отмечено ранее, расчётная нагрузка должна быть консервативной и исходить из рассматриваемого предельного состояния. Поскольку для ПЗ и МРЗ предельные состояния разные, то и принципы задания расчётных акселерограмм должны различаться. В настоящее время расчётные акселерограммы генерируются сейсмологами, которые не представляют с какими сооружениями они имеют дело и какое предельное состояние должно быть учтено. Это не может не приводить к ошибкам при генерации воздействий

Исследования, выполненные в диссертации, позволяют аккуратно подойти к задаче моделирования расчётных воздействий, базируясь на приведённых выше, хорошо известных положениях, которые в настоящее время оказались забытыми.

В мировой практике сложилось два принципиально разных подхода к заданию сейсмических воздействий: под сооружение и под площадку строительства (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 — Классификация методов задания расчетных воздействий

Таблица 4.1 — Сравнение мировых норм

Страна	МРЗ (МСЕ)	ПЗ (DE)
Россия	Глобальное обрушение сооружения или его частей, создающее угрозу безопасности людей. Вероятность превышения расчётных величин определяется исходя из карт сейсмического районирования. Максимальное значение вероятности превышения составляет 10% в течение 50 лет. Расчётная повторяемость определяется исходя из назначения сооружения.	Регламентируется только для опасных объектов. При работе АЭС - работа в штатном режиме.
Франция	Устанавливается минимальная степень защиты населения от последствий сейсмического воздействия исходя из сейсмического риска. Величина сейсмического риска определяется исходя из назначения рассматриваемого объекта, которые в свою очередь разделены на категории.	Состояние функционирования устанавливается исходя из требований заказчика, который зачастую руководствуется экономическими соображениями. Для железных дорог устанавливается "рабочий" уровень воздействия.
Италия	Безопасное состояние - после землетрясения разрушаются и падают несущие элементы, а несущие элементы получают проектные повреждения, при которых утрачивается значительная часть несущей способности при восприятии горизонтальных нагрузок; однако конструкция сохраняет часть несущей способности для восприятия вертикальных и горизонтальных нагрузок с целью предотвращения обрушения из-за действия горизонтальных сейсмических нагрузок. Вероятность превышения за срок службы сооружения 10%	Функциональное состояние - после землетрясения конструкция в общем, включая несущие элементы и аппаратуру не несёт значительных повреждений и остановки приборов. Вероятность превышения за срок службы сооружения 81%
	Аварийное состояние - разрушение и падение несущих элементов, а также очень сильные повреждения несущих элементов; конструкция ещё сохраняет долю несущей способности на вертикальные нагрузки и незначительный запас от обрушения при восприятии горизонтальных нагрузок. Вероятность превышения за срок службы сооружения 5%	Повреждённое состояние - после землетрясения конструкция не представляет угрозы для пользователя и несущая способность основных элементов сохраняется в значительной степени, достаточной для восприятия нормативных нагрузок и обеспечения работоспособного состояния аппаратуры, даже после его остановки. Вероятность превышения за срок службы сооружения 63%
США	Глобальное обрушение сооружения или его частей, создающее угрозу безопасности людей. Вероятность превышения за срок службы сооружения зависит от его назначения - максимальная вероятность превышения составляет 10%, для театров и общественных мест вероятность превышения составляет 6%, для учреждений гражданской обороны максимальная вероятность превышения составляет 3%. Повторяемость, также как и в РФ регламентируется картами - в США это национальные карты сейсмического районирования.	Смещения и усилия от действия ПЗ должны составлять 2/3 от соответствующих эффектов МРЗ. Сооружение при этом должно работать упруго. Вероятности превышения расчётных характеристик сейсмического воздействия при этом не устанавливается.

Первый подход предполагает задание воздействий без учёта особенностей сооружения. При этом воздействие задаётся пакетом акселерограмм прошлых землетрясений или генерируется под площадку строительства, либо под нормативную спектральную кривую.

Наиболее распространённым способом, который можно отнести к первой группе, является построение ансамбля расчётных воздействий из акселерограмм, имевших место во время прошлых землетрясений при схожих сейсмогеологических условиях. При этом сейсмологи оценивают глубину очага, эпицентральное расстояние, характер подвижки в очаге, а также геологию площадки строительства. Для адекватной реализации данного подхода следует определить указанные сейсмогеологические характеристики на площадке строительства, а также найти аналогичные условия среди прошлых землетрясений. Сделать это достаточно трудно, поэтому неопределённость данных компенсируется созданием пакетов с большим числом акселерограмм (70, 80 и более). Предполагается, что опасное воздействие найдётся в пакете. Если набрать много реальных воздействий из разных мест, то, скорее всего, так и будет. Однако на практике ограничиваются набором из 60-100 акселерограмм, а иногда и менее. Можно набрать 100 высокочастотных акселерограмм и сделать неверный вывод о высокой сейсмостойкости слабодемпфированного сейсмоизолированного сооружения. В связи с этим подбор акселерограмм прошлых землетрясений надо проводить совместно с инженерами, знающими, что опасно для их сооружения. Этот вопрос детально обсуждался в [49, 111].

Но даже при грамотном использовании пакета расчётных акселерограмм у данного подхода возникает существенный минус: Среди этих акселерограмм только 2-3 будут определять сейсмостойкость сооружения. То есть подавляющее большинство расчётов окажется бесполезным.

Более продолжительным и трудоёмким способом является сбор акселерограмм непосредственно на площадке строительства.

Часто такие данные на момент начала проектирования ещё отсутствуют, а при типовом проектировании и проектирования малых сооружений

сейсмологические изыскания не предусмотрены вовсе. В результате проектировщик сталкивается с проблемой задания расчётного воздействия. Если даже пакет акселерограмм предложен, при оценке возможности его использования необходимо учитывать достоверность исходной информации. Хорошо известно [117], что из 27 разрушительных землетрясений, произошедших на территории СССР с 1948 года, 24 произошли в несейсмичных или слабосейсмичных районах. Для прогноза же сейсмического воздействия необходимы значительно более детальные данные, чем информация о возможности возникновения землетрясения. Проектировщику трудно оценить данные, предоставляемые сейсмологами. В связи с этим очень часто приходится сталкиваться с ситуацией, когда проектировщик просто использует имеющийся в наличии пакет воздействий. Например, к ППП «MIDAS» приложено 40 акселерограмм прошлых землетрясений. Надо понимать, что их полнота никем не проверялась, и результаты расчётов могут дезинформировать проектировщика.

Рассмотрим теперь подходы с генерацией искусственных акселерограмм.

Наиболее детальный подход предусматривает получение расчётной акселерограммы путём математического описания распространения волны от очага к дневной поверхности. Этот подход появился в последние 20 лет в связи с развитием вычислительной техники, которая формально позволяет рассматривать большие области грунтового основания, включающие очаг землетрясения. Такие области имеют размеры десятков километров и чисто теоретически позволяют получить акселерограмму на поверхности по параметрам очага. Естественно, что рассматриваемая область должна быть описана с позиций динамической теории упругости и пластичности, что требует задания большого набора исходных данных.

К числу наиболее значимых геологических данных с точки зрения данного подхода относится спектр ответа грунтового массива, который подразумевает наличие информации о физико-механических, геометрических характеристиках, а также о скорости распространения волн в рассматриваемом слое, что не всегда представляется возможным получить.

Кроме этого, усложняют процесс расчёта случайные сейсмологические данные, среди которых ориентация волны с наибольшим потенциалом, а также глубина разлома и эпицентрального расстояния до площадки строительства.

Анализ распространения волн наиболее полно представлен в исследованиях О.В. Павленко [81]. Реализация этих подходов требует детальной информации о сейсмогеологических условиях в зоне распространения волн от очага до площадки строительства. В подавляющем большинстве случаев такие данные получить невозможно, поэтому попытки генерации сейсмического воздействия на основе данных о распространении сейсмических волн в грунтовой среде весьма ограничены. Помимо упомянутых работ О.В. Павленко можно отметить исследования ВНИИГ [126] по расчёту плотины Саяно-Шушинской ГЭС, в которых рассмотрена область основания протяжённостью 32 км. Аналогичная задача с 30-километровым массивом грунта рассмотрена профессором Р.Флешем в Венском политехническом университете при оценке сейсмостойкости моста «Европа» [168]. Успешные попытки генерации воздействий с учётом свойств очага и грунтовых условий имеются в работе [23].

В связи со сложностью указанных методов используются более простые, в которых сперва задаётся ограниченный набор акселерограмм. Это могут быть акселерограммы прошлых землетрясений или полученные на основе сейсмологических измерений. По ним оценивается спектр ожидаемых сейсмических воздействий, и под него стандартными методами генерируются соответствующие акселерограммы. Такой подход широко распространён в инженерной сейсмологии [9, 10]. В менее ответственных случаях в качестве спектра используют нормативную спектральную кривую. Генерация воздействия под нормативную спектральную кривую использовалась многими специалистами для расчётов нелинейных сооружений, для которых нельзя задать собственную частоту колебаний и воспользоваться линейно-спектральной методикой (ЛСМ) [116]. Наиболее чётко такой подход сформулирован в статье Р.В. Гузеева [36]. Поскольку при моделировании акселерограмм под нормативную спектральную кривую свойства реальных акселерограмм не принимаются во внимание,

применение такого подхода возможно только для грубых оценок сейсмостойкости сооружений. При этом авторы игнорируют тот факт, что нормативная кривая динамичности не является на самом деле спектральной кривой, а опосредованно учитывает ошибки, заложенные при задании расчётных пиковых ускорений (PGA) [113]. Поэтому надёжность такого подхода весьма проблематична. Вместе с тем этот подход удобен для прохождения и утверждения проектов в экспертизе, поскольку связан с действующими нормами.

Следует отметить, что под заданный спектр можно сгенерировать бесконечное количество акселерограмм. Обычно это обстоятельство используется при статистическом моделировании сейсмических воздействий [37, 38]. На практике использование рассмотренного подхода ведёт к необходимости использовать пакеты расчётных акселерограмм с близким спектром ответа.

Все рассмотренные выше подходы имеют общий недостаток, важный для проектировщика. В процессе задания или генерации воздействия рассмотренные методы не учитывают опасность воздействия для сооружения. Между тем, инженерам хорошо известно, что даже небольшие изменения положения пика на спектрах ответа могут существенно, иногда в несколько раз, изменить реакцию сооружения. Другая проблема возникает часто при проектировании длиннопериодных сооружений таких, как висячие и вантовые мосты с собственным периодом колебаний 2-3 с. Для них воздействия с большими PGA в высокочастотной области совершенно безопасны, и расчётными должны быть относительно слабые длиннопериодные воздействия. Наконец, необходимо отметить, что в сложившихся подходах полностью проигнорированы известные принципы моделирования расчётных воздействий [29, 83], которые требуют при моделировании исходить из возможного предельного состояния сооружения. Как уже отмечалось в обзорной части работы, этот принцип требует использовать разные модели при генерации ПЗ и МРЗ.

В связи со сказанным проектировщики разработали подход, подразумевающий генерацию воздействия под сооружения, который отображён на схеме (рис.4.2) в качестве альтернативного варианта. Особо следует отметить, что

второй подход является единственно возможным при типовом проектировании, когда сейсмологические данные о площадке строительства фактически отсутствуют. Сооружение должно быть сейсмостойким на любой площадке строительства.

Отсюда возникают попытки задать ограниченное число расчётных воздействий, которые должны имитировать реальные и быть опасными для возникновения рассматриваемого предельного состояния в сооружении. При этом центральным вопросом является вопрос о том, какие свойства реальных воздействий следует учитывать при их моделировании. Должно ли модельное воздействие быть внешне похожим на реальное? Автор, следуя работе [83], отвечает на этот вопрос отрицательно. По мнению автора, необходимо выделить основные особенности реальных воздействий, определяющие их эффект и учитывать в модели именно эти свойства. Такой подход практически складывался в сейсмостойком строительстве на протяжении последних 60 лет.

Первые специалисты по сейсмостойкому строительству использовали в качестве модели воздействия гармонику [166, 47]. И.Л. Корчинский использовал модель воздействия в виде затухающей синусоиды [65]. В дальнейшем пытались использовать более сложные модели в виде полинома Берлаге [136], Н.Н.Пузырева [86], Гельфанда [28], Риккера [169] и др. Эти модели исходили, прежде всего, из задания пиковых ускорений процесса (PGA) и возможной частоты воздействия. В большинстве случаев авторы анализировали ускорения основания, не обращая внимания на смещения, поэтому многие процессы были неуравновешенными и приводили к огромным смещениям (табл. 4.2) [25, 35, 111]. Второй особенностью большинства процессов является их узкополосность, т.е. доминирование одной частоты. При работе с линейной системой, когда спектр известен, можно использовать несколько узкополосных процессов. Чтобы использовать один процесс ряд специалистов [13, 24, 158] предложили использование модели воздействия с переменной частотой. Они полагали, что такие процессы будут широкополосными. Анализ этих процессов [117], показал, что они обеспечивают только PGA реальных воздействий и не позволяют оценивать смещения. В работе

[51] предложено использовать известные модели акселерограмм для описания велосиграмм и сейсмограмм. Тогда процессы становятся уравновешенными (скорость в конце процесса обращается в 0, а смещения ограничены). Данные модели представлены в таблице 4.3. Однако известные процессы все-таки являются достаточно узкополосными. В качестве примера на рис. 4.3 приведён спектр ускорений процесса Аннаева-Уздина. Характеристики моделей представлены в таблице 4.4.

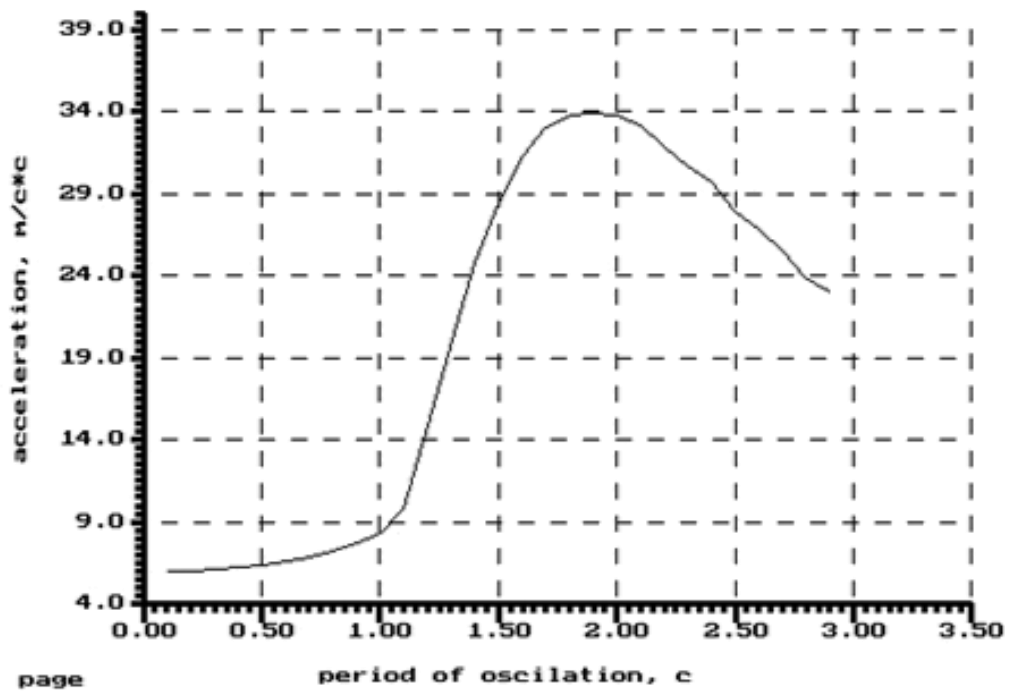


Рисунок 4.3 — Спектр ускорений процесса Аннаева-Уздина

Таблица 4.2 — Неуравновешанные модели

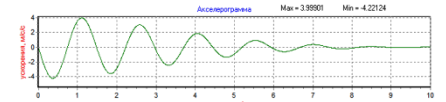
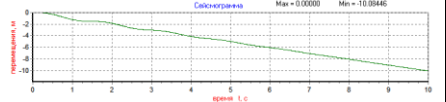
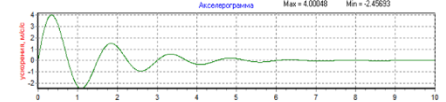
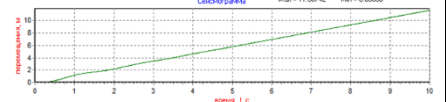
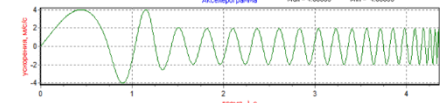
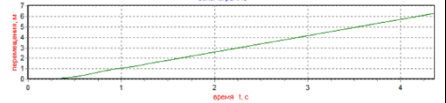
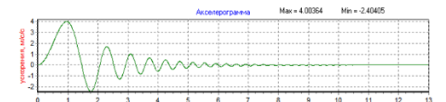
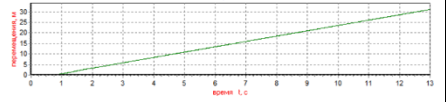
№	Название модели	Акселерограмма модели	Сейсмограмма модели
1	Модель Гельфанда		
2	Модель Корчинского		
3	Модель Костарева-Ветошкина		
4	Модель Эпштейна		

Таблица 4.3 — Уравновешанные модели

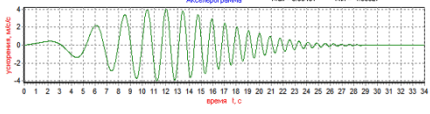
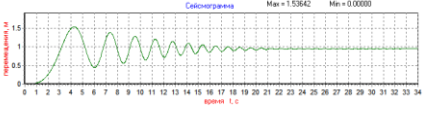
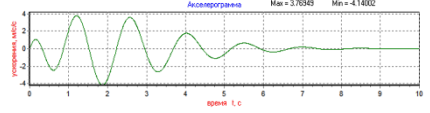
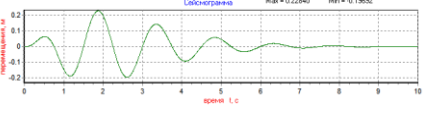
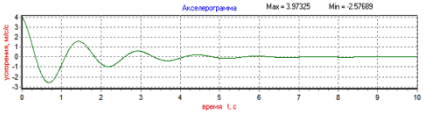
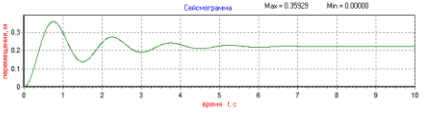
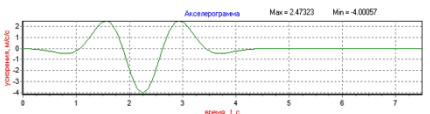
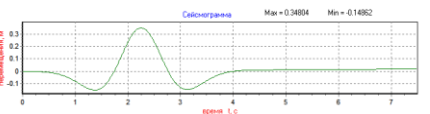
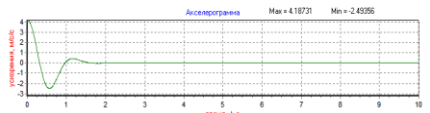
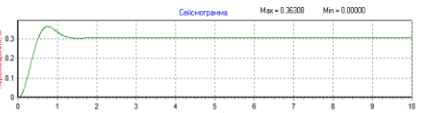
№	Название модели	Акселерограмма модели	Сейсмограмма модели
5	Процесс Аннаева-Уздина		
6	Модель Берлаге		
7	Скорость в виде затухающей синусоиды		
8	Модель Рикера		
9	Модель Пузырёва		
10	Бухарестское землетрясение		
11	Землетрясение в Табасе		

Таблица 4.4 — Характеристики моделей

№	Название модели	Функция модели	PGA, m/s ²	PGV, m/s	I _A , m/s	CAV, m/s	κ
1	Модель Гельфанда	$y = e^{-\beta \cdot t^2} \cdot \sin(\omega \cdot t)$	4,22	1,99	4,08	10,76	10,75
2	Модель Корчинского	$\dot{y} = e^{-\beta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t)$	4,00	1,84	1,52	4,86	13,19
3	Модель Костарева-Ветошкина	Дискретный сигнал	4,00	1,91	2,59	7,11	6,88
4	Модель Эпштейна	$\dot{y} = A \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \sin(\omega(t) \cdot t)$	4,00	3,14	2,05	6,00	12,62
5	Процесс Аннаева-Уздина	$\dot{y} = A \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \sin(\omega(t) \cdot t)$	4,00	1,14	11,99	33,07	4,76
6	Модель Берлаге	$y = t^n \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t)$	4,14	0,93	3,43	9,37	1,10
7	Скорость в виде затухающей синусоиды	$\dot{y} = e^{-\beta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t)$	3,97	0,76	0,99	3,92	2,50
8	Модель Рикера	$y = (1 - 2 \cdot \left(\omega \cdot \left(t - \frac{\pi}{\omega}\right)\right)^2) \cdot e^{-\left(\omega \cdot \left(t - \frac{\pi}{\omega}\right)\right)^2}$	4	0,93	1,68	4,74	1,6
9	Модель Пузырёва	$y = e^{-\left(\frac{\omega}{\pi} t\right)^2} \cdot \sin(\omega \cdot t)$	4,19	0,81	0,73	1,93	2,31
10	Бухарестское землетрясение	Дискретный сигнал	1,99	0,80	0,74	5,48	1,04
11	Землетрясение в Табасе	Дискретный сигнал	8,63	1,00	11,20	33,30	3,29

Наиболее простая и распространённая на данный момент модель, учитывающая недостатки описанных выше моделей, была предложена А.А.Долгой [39]. Эта модель приводится в учебной [117] и инструктивной [93] литературе. Она оказалась удобной для проектировщиков и использована при разработке ряда крупных проектов, например, при проектировании мостов для олимпийских объектов г. Сочи [43]. В связи с этим ниже рассмотрены возможности использования и усовершенствования этой модели.

4.2. Развитие методики А.А.Долгой для моделирования сейсмического воздействия

Модель воздействия представляется в [39] в виде ограниченного набора осциллирующих функций. Согласно [39] это 3 или 5 затухающих синусоид

$$\dot{y} = \sum_{j=1}^3 A_j e^{-\varepsilon_j t} \sin(\omega_j t), \quad (4.1)$$

где A_j и ε_j – параметры модельного воздействия.

Частоты рассматриваемых процессов принимаются опасными для сооружения. Для линейных систем это резонансные частоты. Для нелинейных систем определение резонансных частот требует построения амплитудно-частотной характеристики [76]. Указанные процессы содержат различное число неопределённых параметров. Так, в процессе А.А. Долгой при удержании трёх членов будет шесть неопределённых параметров ($A_j, \varepsilon_j; j = 0 \dots 3$), а в процессе Н.В. Никоновой – 9 таких параметров ($A_j, \varepsilon_j, \alpha_j; j = 0 \dots 3$) [76].

Эти параметры должны назначаться так, чтобы характеристики сгенерированного воздействия соответствовали характеристикам реальных землетрясений.

Модель воздействия в виде (4.1) характеризуется набором случайных параметров $A_j, \varepsilon_j, \alpha_j$ и др. Эти параметры должны обеспечить соответствие задаваемых моделей реальным воздействиям. В известных разработках [39, 116] пытаются обеспечить соответствие двух кинематических (PGA и κ) и трех

энергетических (I_A , CAD и SED) параметров. Это сводится к необходимости выполнения 5 условий

$$PGA(A_j, \varepsilon_j, \dots) = PGA_{calc}; \quad (4.2)$$

$$\kappa(A_j, \varepsilon_j, \dots) = \kappa_{calc}; \quad (4.3)$$

$$I_A(A_j, \varepsilon_j, \dots) = I_{A,calc}; \quad (4.4)$$

$$CAV(A_j, \varepsilon_j, \dots) = CAV_{calc}; \quad (4.5)$$

$$SED(A_j, \varepsilon_j, \dots) = SED_{calc}. \quad (4.6)$$

Удовлетворить всем условиям (4.2)-(4.6) во многих случаях оказывается затруднительным, и при генерации используют принцип минимизации погрешности «er», которая вычисляется по формуле

$$er = (PGA - PGA_{calc})^2 \cdot p_1 + (\kappa - \kappa_{calc})^2 \cdot p_2 + (I_A - I_{A,calc})^2 \cdot p_3 + \dots \\ \dots + (CAV - CAV_{calc})^2 \cdot p_4 + (SED - SED_{calc})^2 \cdot p_5. \quad (4.7)$$

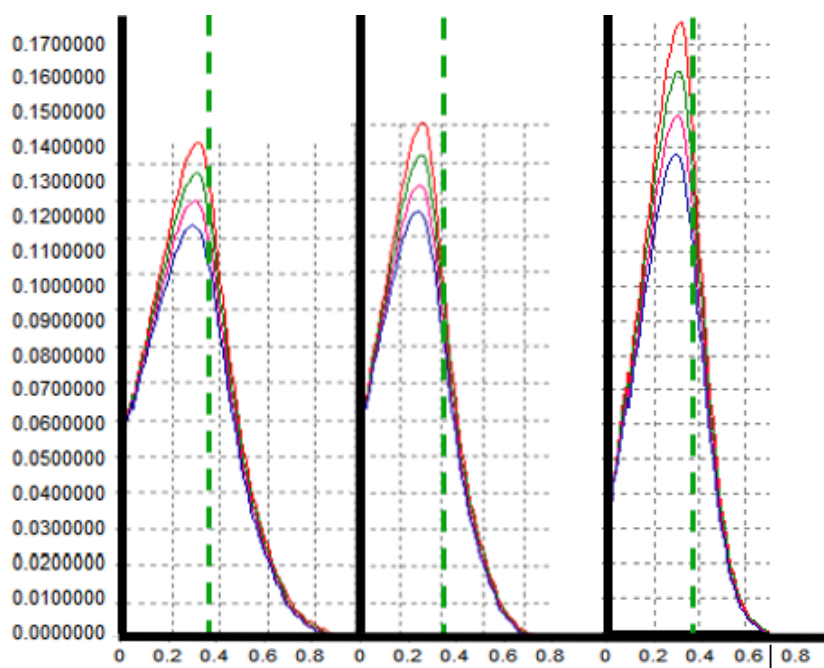
Набор весовых коэффициентов p_i , входящих в формулу погрешности (4.7), определяет значимость факторов (4.2)-(4.6) для расчета сооружения. Изменяя указанные факторы, получаем множество расчётных воздействий. Представляется очевидным, что при расчёте упругих систем на действие ПЗ определяющим для расчета является PGA , а для расчета упругопластических систем на действие МРЗ первостепенное значение должны иметь энергетические характеристики [117]. Однако вопрос выбора системы весовых коэффициентов остается неоднозначным в силу неопределенности параметров фактических землетрясений и нелинейного характера работы сооружения при сейсмическом воздействии.

В рамках исследования вышеописанной модели была рассмотрена генерация воздействия (МРЗ) для сооружения с опасными (резонансными) частотами $\omega_1 = 18,29 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 15,326 \text{ с}^{-1}$, $\omega_3 = 14,98 \text{ с}^{-1}$ ($T_1 = 0,3435 \text{ с}$, $T_2 = 0,41 \text{ с}$, $T_3 = 0,419 \text{ с}$). Расчётные значения параметров приняты $PGA = 7 \text{ м/с}^2$, $I_A = 52,6 \text{ м}^2/\text{с}^3$, $\kappa = 3,356$. Коэффициент пластичности сооружения задан равным 4. Весовой коэффициент для коэффициента гармоничности задан равным 0,3. Остальные коэффициенты менялись, при этом рассмотрены пары, приведённые в таблице 4.6. Для проверки опасности сгенерированной акселерограммы по условиям повреждений

сооружений были построены спектры работы сил пластического деформирования, спектр пластического сдвига и спектр повреждаемости для построенных акселерограмм.

Прежде всего, хотелось бы отметить три факта. Во-первых, акселерограмма, сгенерированная только с учётом PGA (при задании наибольшего весового коэффициента), обеспечивает заданные пиковые ускорения. При этом она вызывает наименьший уровень пластического деформирования сооружения (пластический сдвиг) (таблица 4.6). В рассмотренном примере пластический сдвиг сооружения составил 6,5 см. Повышение весового коэффициента к энергетическим характеристикам приводит и к завышению PGA. Поэтому завышение весов энергетических характеристик приводит к консервативному заданию сейсмического воздействия.

Во-вторых, сгенерированные акселерограммы при весовом коэффициенте $r_I \neq 0$ имеют пик на спектрах ускорений и сдвигов при более низкой частоте, чем заданная частота конструкции. Этот факт проиллюстрирован на рис. 3, где показан спектр работ сил пластического деформирования. «Резонансный» период на графике (максимум работы) составляет 0,305 с (частота равна $\omega_1 = 20,59 \text{ с}^{-1}$). При этом на упругом спектре положение пика соответствует исходной собственной частоте, которая на рис. 3 отмечена пунктиром. Этот факт связан с тем, что период колебаний упругопластической системы увеличивается за счёт пластических деформаций и опасная частота смещается в область более низких периодов.



— — — — — - период, соответствующий резонансной частоте сооружения

Рисунок 4.4 — Сдвиг пиковых значений PFW при весовых коэффициентах для I_A
 $r=0,6, 0,3$ и $0,1$, соответственно

В-третьих, функция (4.7) является полиэкстремальной и в зависимости от области поиска и начального приближения, можно сгенерировать разные акселерограммы с близкими рассматриваемыми характеристиками. Иногда эти акселерограммы сильно отличаются по виду и другим параметрам, не учитываемым при минимизации ошибки, например по продолжительности воздействия. На рис. 4.5 приведены результаты генерации двух акселерограмм. Для обоих сгенерированных воздействий функция ошибки оказалась минимальной, хотя эти минимумы были локальными. Для первого воздействия $er=10,2\%$, а для второго $er=8,9\%$. Характеристики этих воздействий приведены в таблице 4.5. На рис 4.6 приведены спектры их ускорений, а на рис. 4.7 – спектры работы сил пластического деформирования. Первое воздействие имеет большую амплитуду, а второе – большую продолжительность. По спектру ускорений воздействия весьма близки, особенно при демпфировании более 5% от критического. По нашему мнению, поскольку само удовлетворение критериям близости синтетического и натурного воздействий является приближенным, возможные ошибки получения близкого локального максимума, вместо глобального не является опасным. Однако

проектировщик должен представлять себе возможность такой ошибки. Чтобы избежать такого рода ошибок необходимо уменьшать шаг перебора параметров, что ведёт к резкому увеличению времени генерации акселерограммы.

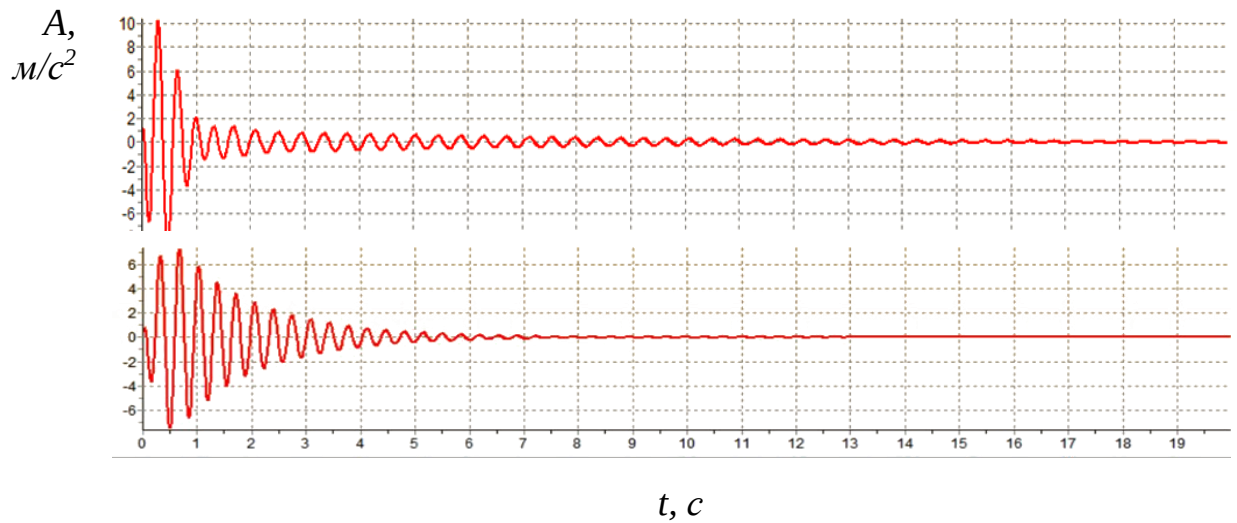


Рисунок 4.5 — Две сгенерированные акселерограммы, обеспечивающие локальный минимум функции (11) с ошибкой $\epsilon_r=10,2\%$ (сверху) и $\epsilon_r=8,9\%$ (снизу)

Таблица 4.5 — Сопоставление двух близких сгенерированных воздействий

Характеристика	Воздействие	
	При $\epsilon_r=10.2\%$	При $\epsilon_r=8.9\%$
PGA, м/с^2	10,38	7,57
I_A , м/с	27,19	32,412
CAV, м/с	8,66	9,416
SED,	0,103	0,104
κ	2,172	1,56
сдвиг, м	0,225	0,14
PFW	0,104	0,115

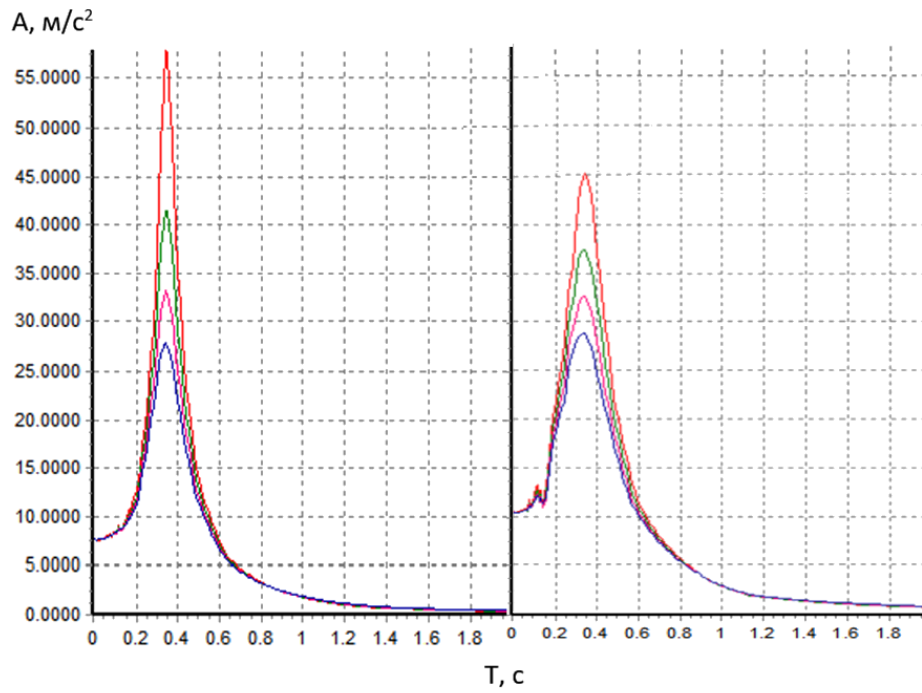


Рисунок 4.6 — Спектр абсолютных ускорений для сгенерированных акселерограмм с ошибкой $er=10,2\%$ (слева) и $er=8,9\%$ (справа)

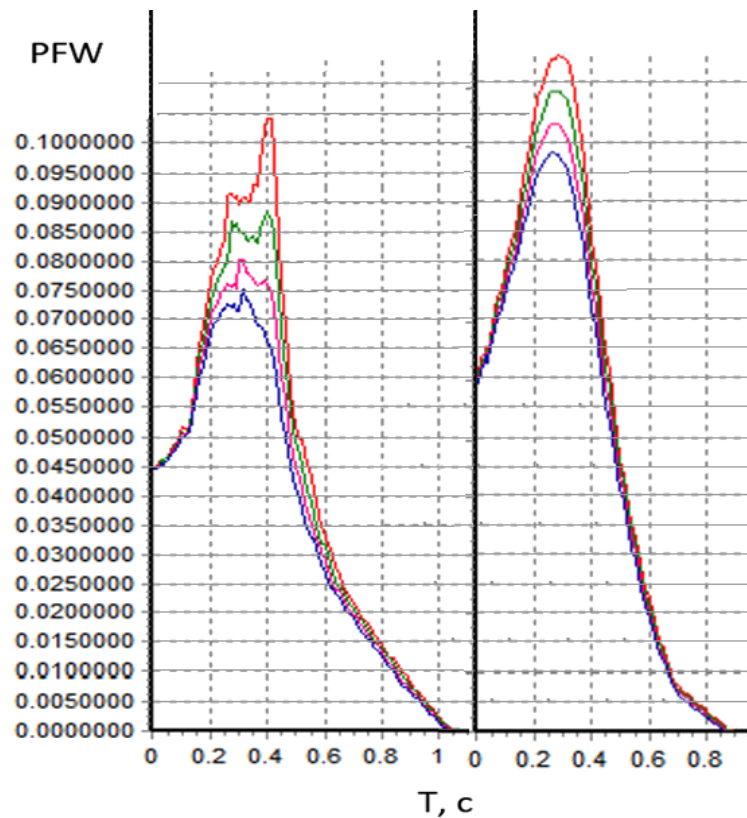


Рисунок 4.7 — Спектр работ сил пластического деформирования для сгенерированных акселерограмм с ошибкой $er=10,2\%$ (слева) и $er=8,9\%$ (справа)

Далее были сопоставлены сгенерированные акселерограммы с известными записями прошлых землетрясений. Для этого было выбрано из имеющейся базы данных [119] две акселерограммы с близкими для нашего случая параметрами: иранское землетрясение (Табас, 1978 г) и одна из записей землетрясения Эль-Центро. Характеристики акселерограмм приведены в двух нижних строках таблицы 4.6.

Таблица 4.6 — Некоторые результаты генерации акселерограмм для МРЗ

Весовые коэффициенты			Параметры сгенерированного воздействия			
P_{Ia}	P_k	P_{PGA}	$PGA, \text{ м/с}^2$	$I_A, \text{ м}^2/\text{с}^3$	CAV	сдвиг, м
0	0,3	0,7	7,04	24,4	7,44	0,095
0,1	0,3	0,6	6,88	33,94	11,78	0,065
0,2	0,3	0,5	7,07	32,88	9,84	0,123
0,4	0,3	0,3	7,5	32,25	12,25	0,127
0,5	0,3	0,2	7,57	32,58	9,44	0,14
0,6	0,3	0,1	5,13	34	16,25	0,149
El Centro			7,63	37,27	17,98	0,135
Tabas			7,31	51,27	27,76	0,167

Спектры абсолютных упругих ускорений в сгенерированных воздействиях оказались заметно выше, чем у реальных землетрясений с тем же PGA. При $\gamma=0,15$ спектр ускорения сгенерированного воздействия составляет примерно 30 в то время, как спектры реальных воздействий составляют около 25. Вместе с тем с точки зрения пластических деформаций сгенерированное воздействие оказалось менее опасным, чем выбранные записи реальных акселрограмм. Для записи Эль-Центро работа сил пластического деформирования превысила аналогичную работу синтетических акселерограмм, а для записи Табас пластический сдвиг превысил аналогичную величину для синтетических воздействий. Это связано с тем, что в рамках принятой модели не удаётся достаточно точно обеспечить характеристики воздействия. Так, в синтетической акселерограмме $I_A \approx 32 \text{ м/с}$, а требуемое значение

$I_A=52$ м/с. У акселерограммы Эль-Центро $I_A=37,2$ м/с, а у акселерограммы Табас $I_A=51,3$ м/с.

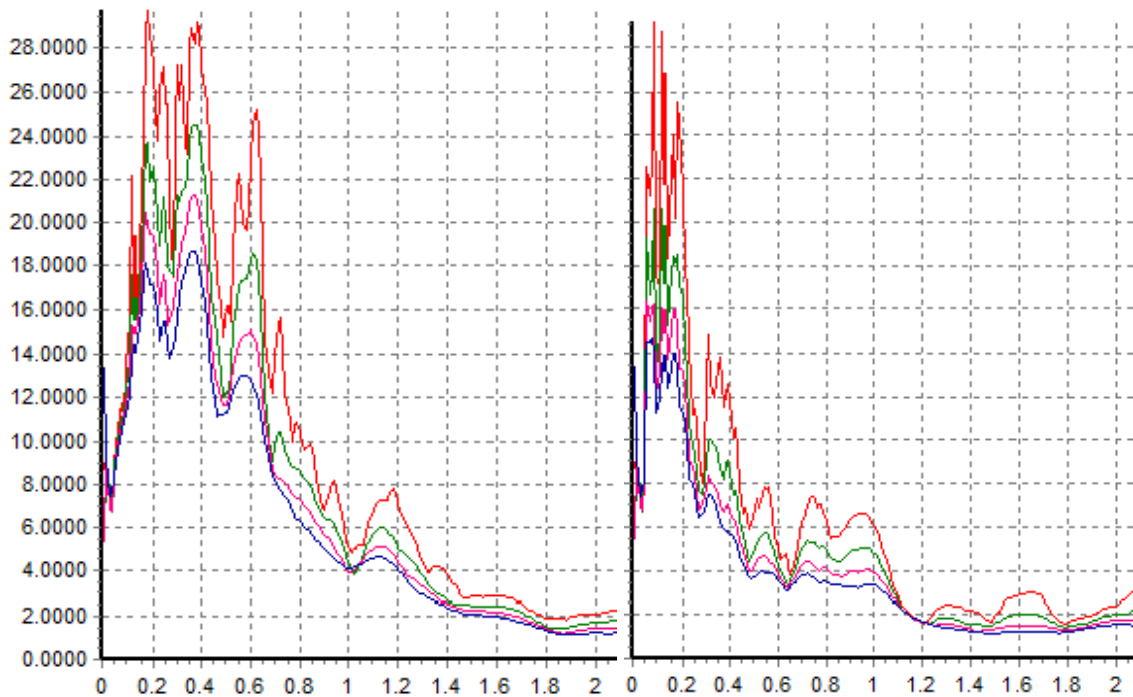


Рисунок 4.8 — Спектры ускорений акселерограмм Эль-Центро (слева) и Табас (справа)

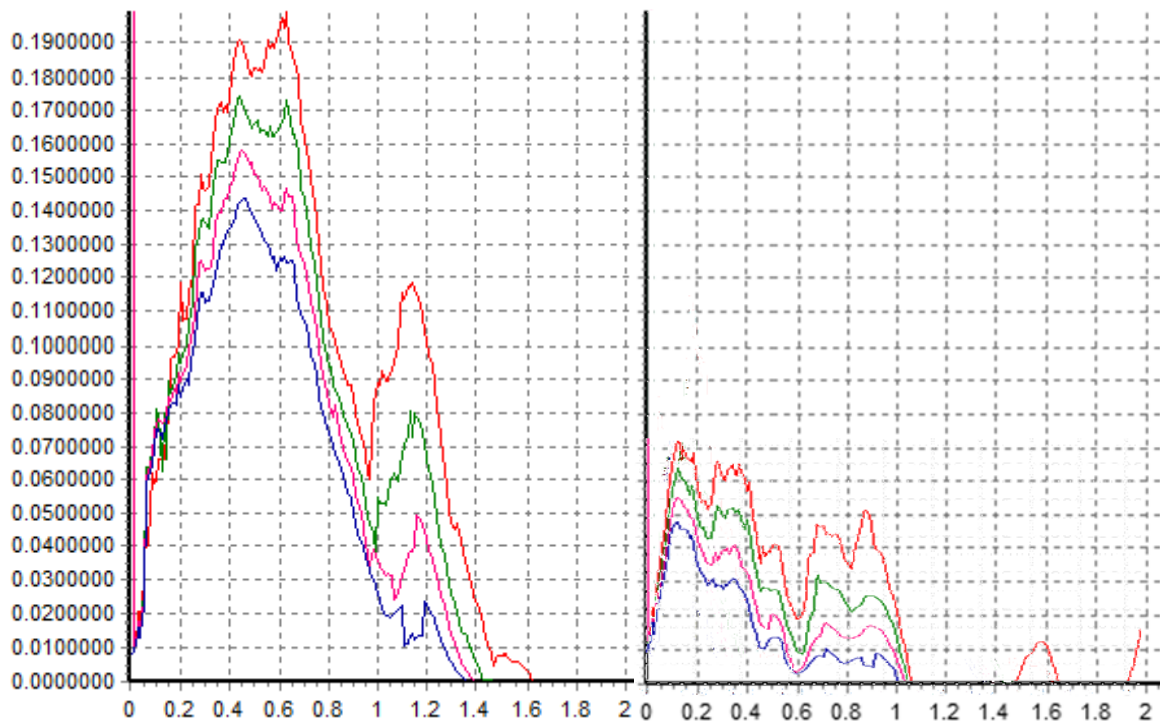


Рисунок 4.9 — Спектры работ сил пластического деформирования акселерограмм Эль-Центро (слева) и Табас (справа)

Генерация воздействия под сооружение предполагает некоторую аппроксимацию воздействия с неопределенными параметрами, которые находятся, исходя из близости характеристик синтетического воздействия и акселерограмм прошлых землетрясений. Эта близость обеспечивается минимизацией функции ошибки между расчетными и прогнозируемыми значениями параметров.

На примере синтетического воздействия, предложенного А.А.Долгой в НТЦСС, установлено, что в зависимости от весовых коэффициентов, определяющих погрешность параметров синтетического воздействия, получаются различные синтетические акселерограммы. Однако это различие можно считать приемлемым, учитывая точность задания сейсмической опасности. При расчёте систем с хрупкой диаграммой деформирования следует увеличивать весовые коэффициенты для значений PGA, а для пластических систем следует увеличивать весовые коэффициенты энергетических характеристик.

При расчёте упругопластических систем опасную частоту следует определять с учётом пластического деформирования системы, и эта частота будет меньше, чем у упругой системы.

Функция ошибки при приближенном удовлетворении требований к параметрам расчётного воздействия оказалось многоэкстремальной. Если при этом погрешность в определении параметров не превышает 10% любое воздействие может использоваться для оценки сейсмостойкости. Чтобы исключить большие ошибки при подборе параметров, следует варьировать весовые коэффициенты, получая 3-5 вариантов расчётного воздействия.

Принятая для анализа модель воздействия А.А.Долгой имеет 6 неопределённых параметров, что оказалось недостаточным для точного обеспечения требуемых характеристик воздействия.

4.2.1. Модернизация модели Долгой А.А.

Как следует из выполненного в предыдущем разделе исследования, известная модель А.А.Долгой не позволяет достаточно точно приблизиться к расчетным параметрам реальных воздействий. В связи с этим многие авторы предлагали

усовершенствовать указанную модель, предлагая модели с большим числом параметров [30, 76, 117, 144, 171].

С целью минимизации погрешностей Н.В. Никонова [76] использовала следующее представление воздействия

$$\dot{y} = \sum_{j=1}^3 A_j (1 - e^{-\alpha_j t}) e^{-\varepsilon_j t} \sin(\omega_j t), \quad (4.8)$$

где A_j, α_j и ε_j – параметры модельного воздействия. Такая модель имеет 9 неопределённых параметров, в отличие от модели Долгой, однако, согласно последним исследованиям [115], воздействие должно включать в себя импульс скорости. Поэтому Дмитриевская Л.Н. дополнила модель воздействия (1) импульсом скорости в начале процесса [30]

$$\dot{y} = \sum_{j=1}^3 A_j (1 - e^{-\alpha_j t}) e^{-\varepsilon_j t} \sin(\omega_j t) + V \cdot \delta(t), \quad (4.9)$$

где $V \cdot \delta(t)$ - импульсная составляющая скорости.

Авторами была сделана попытка реализации указанной модели программной среде Windows на языке C++. Однако она оказалась неудачной. В первую очередь проблема оказалась связанной со скоростью построения модели. Как известно, в модели А.А. Долгой 9 неопределённых параметров. Частоты компонент воздействия задаются опасными для сооружения, а остальные 6 параметров ищутся перебором на сетке их возможных значений. При дроблении диапазона значений на 10 частей получаем 10^6 вариантов, подлежащих просмотру. Перебор такого количества вариантов требует достаточно много машинного времени и, в зависимости от быстродействия компьютера, требует от 2 до 12 часов непрерывного счета. Более сложная модель (2) содержит уже 9 неопределённых параметров дополнительно три параметра импульса скорости, итого 12 параметров. Простой перебор на сетке требует уже рассмотрения 10^{12} вариантов, т.е. более 100 лет машинного счета.

Более того, требовал уточнения вопрос задания характеристик импульса скорости (величины, момента включения и его продолжительности. На момент

реализации предложений [30, 76] отсутствовали исследования на предмет момента включения импульса скорости и его величины. Результат этих исследований для применения в более сложной модели описан ниже.

4.3. Модель Л.Н. Дмитровской

4.3.1. Импульс скорости

Импульс скорости представляется в виде, предложенном итальянскими специалистами [150] и использованном в отечественных работах [171]:

$$\delta(t) = \begin{cases} u_{max} \cdot \frac{t}{t_0} & \text{при } t_{st} \leq t \leq t_{st} + t_0 \\ \frac{u_{max}}{t_0} \cdot \left(2 - \frac{t}{t_0}\right) & \text{при } t_{st} + t_0 \leq t \leq t_{st} + 2 \cdot t_0 \\ 0 & \text{при } t < t_{st} \cup t > t_{st} + 2 \cdot t_0 \end{cases} \quad (4.10)$$

где $u_{max} = V_{max}/t$; t_0 – продолжительность импульса; t_{st} – момент включения импульса. В работе авторов [171] отмечается, что импульс скорости можно выделить в любом воздействии.

В формуле (4.10) характеристики импульса скорости зависят от значений u_{max} и t_0 . Эти два параметра в свою очередь зависят от магнитуды M_W и гипоцентрального расстояния R , и по данным [150] имеют следующий вид:

$$t_0 = 10^{(-3.471 + 0.5 \cdot M_W)}; \quad (4.11)$$

$$u_{max} = 10^{(-6.3 + M_W - \log(R))}. \quad (4.12)$$

Однако, отсутствуют данные по моменту включения импульса скорости t_{st} . Автор провёл анализ 70 акселерограмм 9-ти балльных воздействий с выделением в них импульса скорости.

Выделение импульса происходило по следующему алгоритму:

- 1) Задание моментов включения импульса
- 2) Задание амплитуды импульса
- 3) Задание длительности импульса
- 4) Вычитание импульса из исходного воздействия и проверка значения сейсмограммы в начале и конце процесса.

Поиск момента включения импульса выполнялся методом перебора. Если значения сейсмограммы (после перебора значений в заданных пользователем

пределах, т.е. заданных в первом шаге представленного алгоритма) в начале воздействия и конце получались не нулевыми, то пользователь менял значения, заданные в первых трёх пунктах, после чего выполнялся пересчёт (повторный поиск момента включения импульса). Интерфейс и результат работы программы представлен на рисунке 4.10.

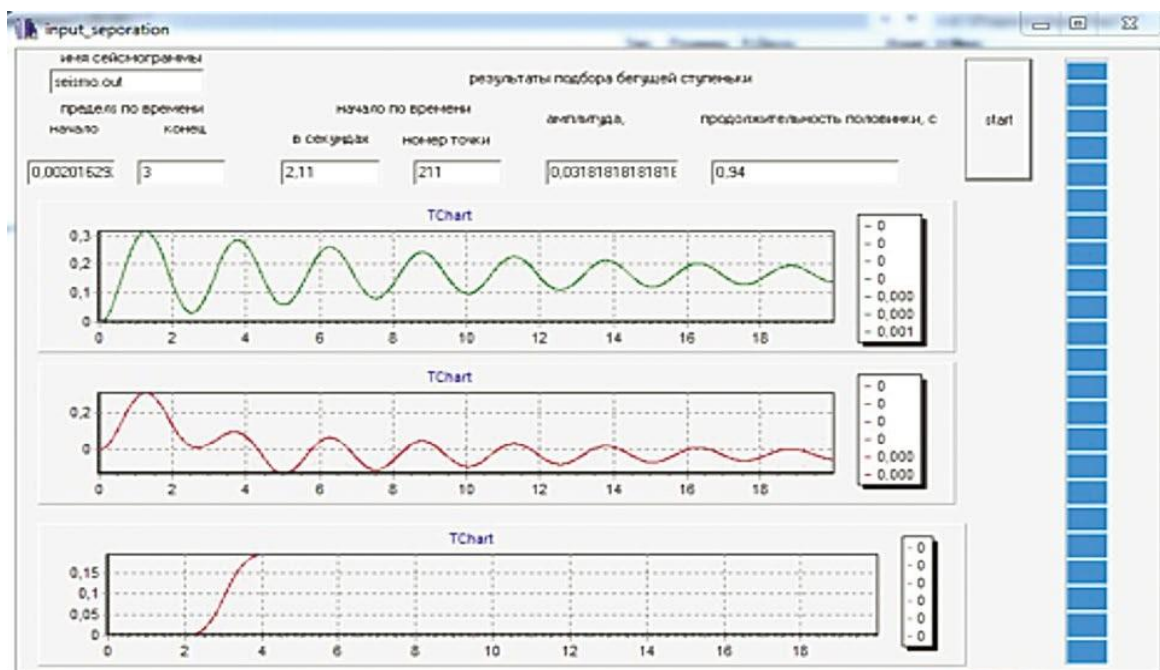


Рисунок 4.10 — Представление случайного воздействия (верхний рисунок) в виде суммы колебательного процесса (средний рисунок) и импульса скорости (нижний рисунок)

В результате на основании полученных данных была построена гистограмма момента включения импульса скорости, которая показана на рис. 4.11. Гистограмма хорошо аппроксимируется экспоненциальным законом распределения:

$$f(x) = \lambda \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot x}). \quad (4.13)$$

Для имеющихся данных величина λ получается равной $\lambda = 0,128$.

На рис. 4.12 приведены теоретическая и эмпирическая гистограммы распределения величины сдвига импульса от начала воздействия.

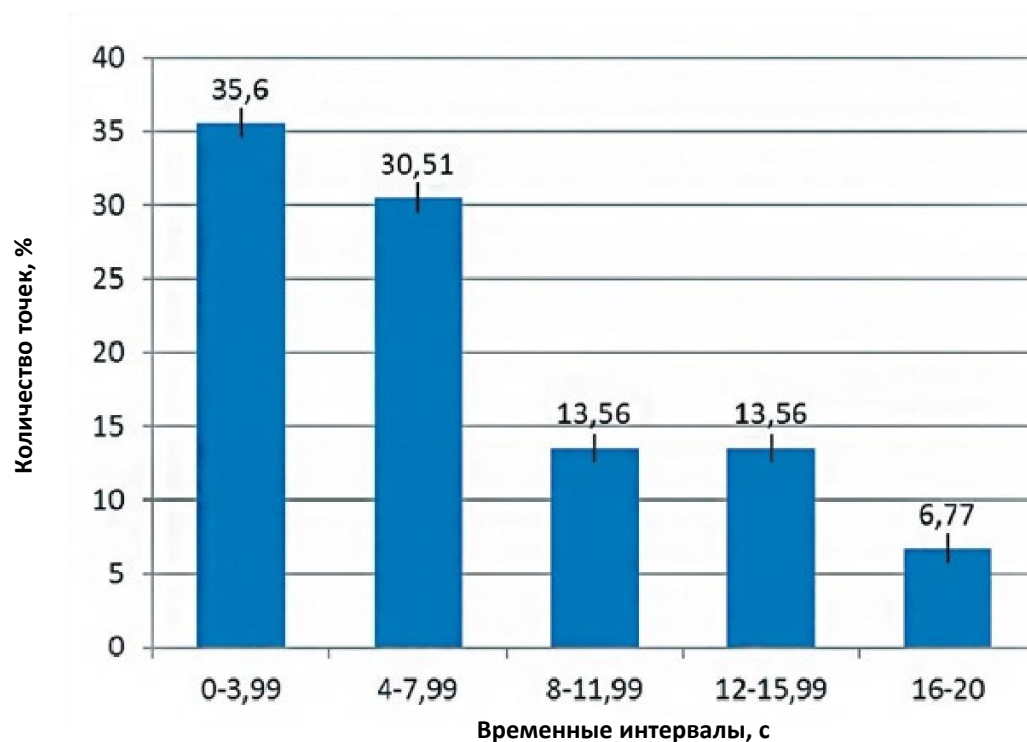


Рисунок 4.11 — Гистограмма момента включения импульса

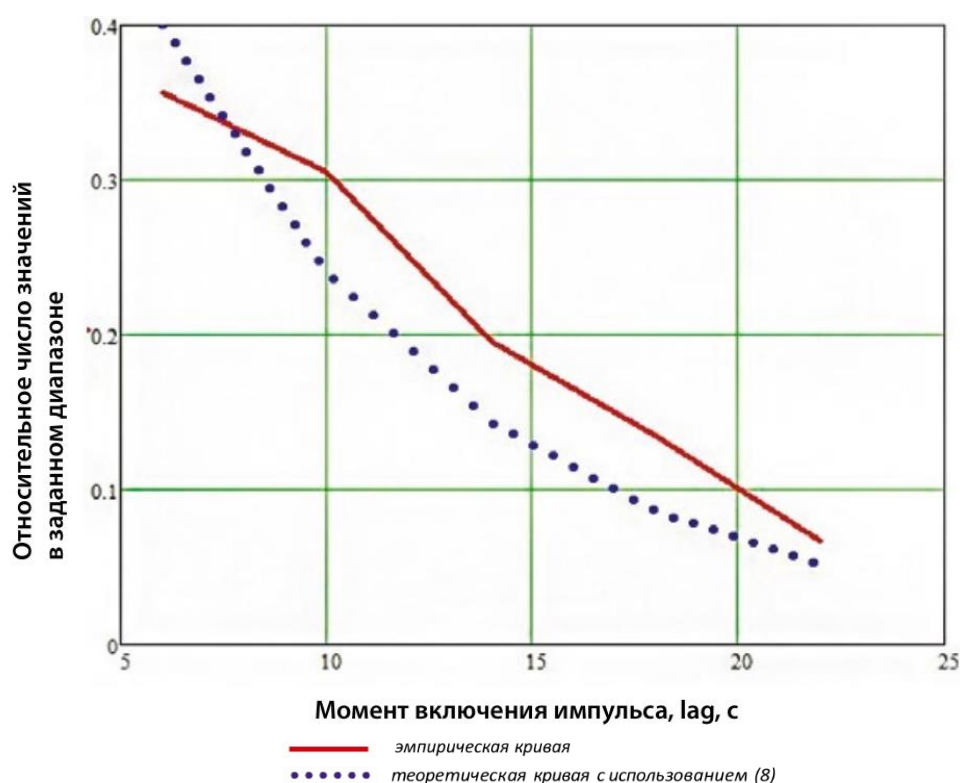


Рисунок 4.12 — Экспоненциальная аппроксимация момента включения импульса

В зависимости от заданной вероятности момента включения импульса задаётся интервал включения импульса скорости и в пределах этого интервала момент включения импульса задаётся таким образом, чтобы величины характеристик воздействия оказывались приемлемыми.

4.3.2. Реализация модели с достоверным включением импульса скорости

О.П. Нестерова попыталась реализовать модель (4.9) Дмитровской, рассмотрев 3 комбинации параметров с 5 различными импульсами. Однако, это исследование лишь показало, что модель действительно более удачная и позволяет более гибко моделировать воздействие, но для более детальных исследований модели требовалось сгенерировать большее число воздействий, что требовало отсутствующих у автора больших вычислительных мощностей (наличия мэйнфрейма).

4.3.3. Основные технические принципы, заложенные в реализацию модели Дмитровской

Проблема отсутствия больших вычислительных мощностей была решена с использованием видеокарты, архитектура которой хорошо подходит для решения вариационных задач.

В общих чертах, при вычислениях на ядрах процессора CPU компьютер работает следующим образом [106]: вначале с помощью какого-либо внешнего устройства в память компьютера (в данном случае, что отображено на рисунке 8, память представляет собой динамическую память DRAM) вводится программа. Устройство управления (Control) считывает содержимое ячейки памяти, где находится первая команда программы и организует её выполнение, используя для этого арифметико-логические устройства ALU и кэш (Cache) – быструю оперативную память малого объёма. Для увеличения быстродействия операции, выполняемые программой, распределяются между ALU. Количество параллельных процессов, соответствует количеству ядер процессора и им же ограничено. На данный момент, наиболее мощные ПК, доступные массовой аудитории имеют максимум 12 ядер.

При использовании видеокарты, ввиду наличия большого количества блоков вида «Control+n·ALU+Cache» параллельно может выполняться значительно большее количество процессов. Однако ввиду того, что кэш-память таких блоков обладает существенно меньшим объёмом, чем кэш-память процессора (256 Кб против 9 Мб, т.е. в 36 раз меньшая) пропускная способность таких блоков

существенно ниже, как следствие выполнение одних и тех же процессов занимает более продолжительное время. Поэтому видеокарта используется для выполнения простых, но объёмных с точки зрения количества вычислительных операций, программ. Быстрая реализация этого числа операций достигается наличием и использованием большого числа АЛУ: в то время как процессор CPU имеет максимум 48 АЛУ, у видеокарт их количество может варьироваться до 2048 штук.

Таким образом, производительность при выполнении «лёгких» программ у видеокарты в 25-40 раз выше

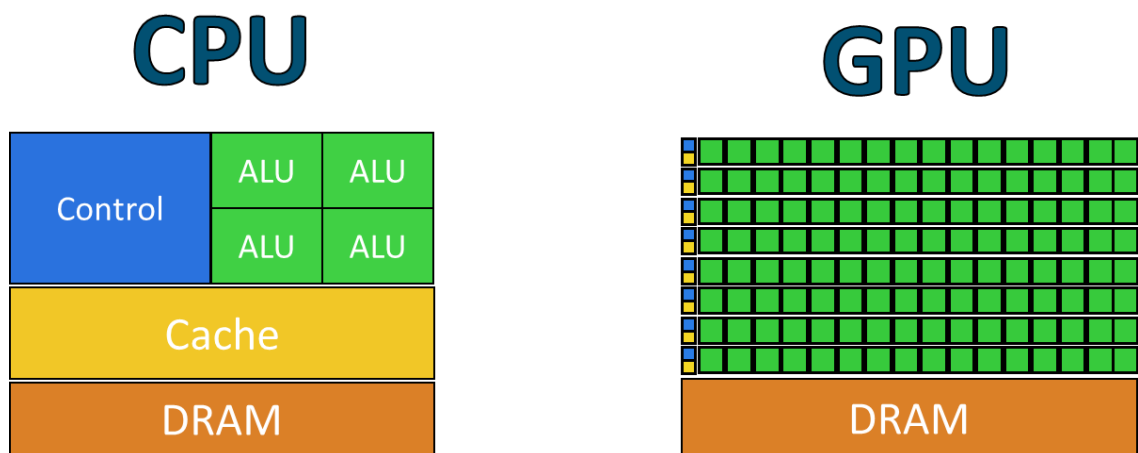


Рисунок 4.13 — Сравнение архитектуры процессора и видеокарты

Программирование происходит на языке C++ в программной среде Windows Visual Studio с применением CUDA (Compute Unified Device Architecture – архитектура унифицированного вычислительного устройства), которая позволяет использовать стандартную библиотеку C++ для программирования на видеокарте.

4.3.4. Описание программы для моделирования воздействия Дмитровской Л.Н.

Пользовательский интерфейс состоит из окон для ввода данных (рис. 4.14). Окна ввода данных делятся на две целевые категории:

- 1) Задание границ параметров воздействия и шага сетки параметров;
- 2) Задание расчётных характеристик воздействия и соответствующих им весовых коэффициентов.

Принцип использования весовых коэффициентов и алгоритм учёта этих весовых коэффициентов не отличается от заложенных в программе, реализующей модель Долгой А.А., что подробно описано в разделе 4.2.

Входные данные

Загрузить Сохранить	Магнитуда	Эпицентральное расстояние	Амплитуда скоростей			Начало Прошло
			1	2	3	Категория грунта
Минимум	6	1	0,8	0,1	0,6	☒ 1
Максимум	8	20	0,9	0,41	0,7	☐ 2
Мин. шаг	1	5	0,02	0,2	0,02	☐ 3

	Альфа			Бетта		
	1	2	3	1	2	3
Минимум	0,01	0,01	0,54	0,6	0,8	0,01
Максимум	0,5	0,5	0,65	0,8	1	0,1
Мин. шаг	0,2	0,2	0,02	0,02	0,02	0,02

Рассчётные параметры					Частоты воздействия		
Амплитуда	Ариас	CAV	SED	KAPPA	1	2	3
7	52,6	30	8	4,8995817	18,29	15,326	14,98

Вес						Соотношение пиковых параметров	Бетта	Начать расчёт
Амплитуда	Ариас	CAV	Вес	SED	Бетта			
0,2	0,5	0	0	0	0,3	0	100000	Отменить
0.00%								

Рисунок 4.14 — Пользовательский интерфейс

Результаты

Показать Сохранить	Магнитуда	Эпицентральное расстояние	Амплитуда скоростей			Категория грунта
			1	2	3	
Минимум	6,000	1,000	0,800	0,100	0,600	☒ 1
Максимум	8,000	20,000	0,900	0,410	0,700	☐ 2
Оптимум	6,000	6,000	0,900	0,100	0,680	☐ 3

	Альфа			Бетта		
	1	2	3	1	2	3
Минимум	0,010	0,010	0,540	0,600	0,800	0,010
Максимум	0,500	0,500	0,650	0,800	1,000	0,100
Оптимум	0,210	0,410	0,540	0,640	0,800	0,010

Рассчётные параметры					Частоты воздействия		
Амплитуда	Ариас	CAV	SED	KAPPA	1	2	3
7,000	52,600	30,000	8,000		18,290	15,326	14,980

Полученные параметры					Соотношение пиковых параметров	Бетта	Опт. лаг 4,023
Амплитуда	Ариас	CAV	SED	Бетта			
8,384	145,238	39,356	0,436	0,990	0,000		

Ошибка					Соотношение пиковых параметров	Бетта	Сумма
Амплитуда	Ариас	CAV	SED	Бетта			
0,008	1,551	0,000	0,000	0,191	0,000	1,749694	

Рисунок 4.15 — Окно результатов

Окно результатов позволяет пользователю выполнять проверку подобранных параметров воздействия и вычисленные погрешности.

Погрешность вычисляется по формуле

$$\Delta = \sum_{i=1}^6 \Delta_i, \quad (4.14)$$

где $\Delta_i = \left(\frac{X_i - X_0}{X_0} \right)^2 \cdot p_i$.

На сетке значений перебираются параметры:

$$\begin{pmatrix} X_1 & \cdots & X_{11} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1 + n_1 \cdot x_1 & \cdots & X_{11} + n_{11} \cdot x_{11} \end{pmatrix}, \quad (4.15)$$

где x_i – выбранный пользователем шаг элемента X_i , $n_i = X_i / x_i$ – количество шагов перебора элемента.

Фиксируется один или несколько параметров, а оставшиеся параметры перебираются с выбранным шагом до тех пор, пока суммарная погрешность с учётом весовых коэффициентов p не станет минимальной.

4.4. Результаты расчёта

Выше описаны методика и программное обеспечение, позволяющие реализовать предлагаемую модель расчётного сейсмического воздействия. Эта модель имеет достаточно простое аналитическое представление, а с другой стороны, позволяет достаточно полно учесть особенности реальных воздействий. Ниже даётся сопоставительная оценка предложенного воздействия с известной моделью А.А.Долгой и записями прошлых сильных землетрясений.

В таблице 4.7 представлены две модели, сгенерированные по рассмотренным методикам для расчета сооружения с периодом основного тона колебаний $t=0,3$ с. Обе модели построены для одинаковых значений весовых коэффициентов $P_{IA}=0,3$, $P_{PGA}=0,4$, $P_k=0,3$. На рисунке представлены сгенерированные акселерограммы, их сейсмограммы, спектры ускорений, работы сил пластического деформирования и повреждаемости.

Отметим, что обе модели узкополосные. Это связано с относительно небольшим коэффициентом гармоничности обеих моделей. Можно сделать модель более «хаотичной», увеличив значение k и его весовой коэффициент, но такое решение нарушает принцип консервативности модели. При этом модель А.А. Долгой не позволяет получить заданное значение показателя гармоничности. Если

здать ему большой приоритет, то исчезает соответствие значений PGA и интенсивности по Ариасу и модель становится не столь опасной для сооружения. В предлагаемой модели удаётся обеспечить достаточную близость всех контролируемых параметров расчётного воздействия и натурных данных. По этой причине предлагаемая модель оказывается для рассматриваемой конструкции более опасной, чем модель А.А. Долгой. Так, ускорения сооружения (спектр ускорений) оказываются на 47% больше, а спектр упругих смещения – на 34% больше. На 85% поднялась работа сил пластического деформирования.

Таблица 4.7 — Сравнение спектральных характеристик двух сгенерированных моделей

Название функции	Модель А.А. Долгой	Модель Л.Н. Дмитровской
Сгенерированные акселерограммы		
Спектр упругих ускорений		
Спектр упругих смещений		
Спектр работ сил пластического деформирования		
Спектр повреждаемости		

В качестве другого примера, иллюстрирующего возможности предлагаемой методики, рассмотрена генерация МРЗ с теми же условиями, которые были использованы ранее в [115] по методике А.А.Долгой. Преобладающие частоты воздействия $\omega_1=18,29$, $\omega_2=15,326$, $\omega_3=14,98$. Значения параметров воздействия и их весовые коэффициенты приведены в таблице 4.8. Варьирование весовых коэффициентов обусловлено генерацией воздействий под разные предельные состояния. Так, для оценки малоциклового усталости элемента важным является среднеквадратичное ускорение, которое в свою очередь определяется интенсивностью по Ариасу I_A , и коэффициент для I_A принят большим ($P_{IA}=0,6$), а коэффициент к пиковым ускорениям (PGA) принят маленьким ($P_{PGA}=0,1$). Генерация аналогичной акселерограммы для проверки сброса пролётного строения моста с опор определяется величиной PGA , поскольку единоразовое превышение хода опорной части на сколь угодно малый промежуток времени приведёт к сбросу. Поэтому рассмотрен вариант $P_{PGA}=0,6$ и $P_{IA}=0,1$. Во всех случаях для коэффициента гармоничности $P_k=0,3$. Следует отметить, что так же, как в [115], для коэффициента гармоничности принята расчётная величина $k=3,356$. Это меньше, чем рекомендуемая в нормах США величина $k=5$ [14]. При задании k мы руководствовались, во-первых, тем, что эта величина существенно снижается с ростом преобладающего периода [119, 139], а во-вторых, тем, что статистика по этой величине имеет большой разброс, причём в запас надо задавать нижнюю границу возможных значений k .

Таблица 4.8 — Сравнение величин характеристик двух сгенерированных моделей

Весовые коэффициенты			Параметры модели, сгенерированной по методике А.А. Долгой				Параметры модели, сгенерированной по методике Л.Н. Дмитриховской			
P_{Ia}	P_k	P_{PGA}	PGA, (м/с ²)	I_a , (м ² /с ³)	CAV, (м/с)	Смещение, (м)	PGA, (м/с ²)	I_a , (м ² /с ³)	CAV, (м/с)	Смещение, (м)
0	0,3	0,7	7,04	24,4	7,44	0,095	7,49	51,55	16,3	0,071
0,1	0,3	0,6	6,88	33,94	11,78	0,065	7,46	51,22	16,26	0,082
0,2	0,3	0,5	7,07	32,88	9,84	0,123	7,24	48,77	15,85	0,064
0,4	0,3	0,3	7,5	32,25	12,25	0,127	8,01	48,79	15,19	0,152
0,5	0,3	0,2	7,57	32,58	9,44	0,14	7,07	45,7	15,38	0,060
0,6	0,3	0,1	5,13	34	16,25	0,149	7,19	48,5	15,82	0,063
El Centro			7,63		37,27		17,98		0,135	
Tabas			7,31		51,27		27,76		0,167	
Northridge			8,27		31,29		14,71		0,307	
Chili			6,98		88,54		47,59		0,109	
Заданные величины			7		52,6		30		отс.	
			PGA, (м/с ²)		I_a , (м ² /с ³)		CAV, (м/с)		смещение, (м)	

Результаты выполненных расчетов приведены в таблице 4.8. Как видно из таблицы, реализация рассмотренной методики существенно приближает параметры модели к натурным данным.

Далее было проведено сопоставление сгенерированного воздействия с натурными воздействиями. Автор имел в распоряжении базу данных из 103 акселерограмм реальных воздействий, любезно представленную участниками Российско-Китайского гранта №16-58-53095, При этом все акселерограммы разделились на 3 группы: узкополосные с опасным для рассматриваемого сооружения периодом, широкополосные и акселерограммы, включающие резонансный для сооружения период. К первой группе акселерограмм относятся длиннопериодные процессы, в частности, акселерограммы землетрясений в Мехико (1995), Эрзеруме (1983) и Бухаресте (1978). Значение k для них невелико,

например для Бухарестского землетрясения $k \approx 1.2$. Эти акселерограммы должны использоваться для расчета сейсмоизолированных длиннопериодных объектов и расчётные модели рассматриваемого типа нуждаются в дополнительной проверке. Для рассматриваемого сооружения воздействия этой группы безопасны. Ко второй группе моделей относятся подавляющее большинство из имеющихся. Они по воздействию на сооружения относятся к 9-балльным, но для рассматриваемого сооружения безопасны. Интерес представляют воздействия третьей группы. Это либо относительно узкополосные процессы с частотой резонансной для рассматриваемого сооружения, либо очень мощные землетрясения, опасные для широкого круга сооружений, благодаря высоким пиковым ускорениям и большой продолжительности. К первому типу третьей группы воздействий относится землетрясение в Нортридже (США, Калифорния, 1994). Ко второму типу мы относим землетрясения в Чили (1960), Иране (Табасское землетрясение 1978). Эти землетрясения по всем показателям относятся к категории «выше 9 баллов». Характеристики этих землетрясений и предлагаемой модели приведены в таблице 4.8, а основные спектральные характеристики – на рис. 4.16-4.18. Отметим только, что, как отмечалось ранее, «резонансность» воздействия весьма неустойчивая характеристика. Так для Табасского землетрясения на участке от 0,1 до 0,25 с расположено три высоких пика и две глубоких «ямы», и маленькое изменение в данных по сооружению может вывести сооружение из ямы на пик и наоборот. Полностью аналогичная картина наблюдается и для чилийского землетрясения.

Сопоставление реакции сооружения на предлагаемое и реальные воздействия показывает, что предлагаемая модель по спектрам абсолютных ускорений, как и предполагалось в работе, значительно более опасна для сооружения. Это связано с тем, что воздействие строго настроено на собственную частоту колебаний сооружения, и основная часть энергии воздействия сосредоточена на этой частоте.

В значительной мере это относится и к энергетическому отклику сооружения. Среди всех опасных воздействий только Чилийское землетрясение, относящееся к сильнейшим в мире, дало некоторое небольшое превышение работы сил пластического деформирования на рассматриваемой частоте. Но здесь следует

иметь в виду два обстоятельства. Во-первых, Чилийское землетрясение относят к воздействиям силой более 9 баллов, а во-вторых, спектры работ сил пластического деформирования имеют пик, несколько сдвинутый в сторону больших периодов. Если настраивать воздействие на период 0,35 с (вместо 0,3 с), то спектр упругих смещений несколько упадет, а спектр работы сил пластического деформирования возрастет.

Приведенное сопоставление спектров позволяет подчеркнуть используемый нами принцип генерации воздействия под сооружение. На рис. 4.16-4.18 хорошо видно, что рассмотренные нами сильные землетрясения ведут к массовому разрушению застройки в целом. Нортриджское землетрясение вызывает повреждения застройки с периодами от 0,1 до 3 с, причём в диапазоне от 0,15 с до 1,4 с - необратимые повреждения железобетонных и каменных зданий. С точки зрения сейсмического районирования оно намного более опасно, чем предлагаемое нами расчётное землетрясение. Однако наше воздействие «нацелено» именно на наше сооружение и для него оно более опасно. По этой же причине в литературе и ряде нормативных документов [21, 110, 149] требуют рассмотрения пакета опасных воздействий, поскольку одно воздействие, будучи достаточно интенсивным, на резонансной частоте может иметь минимум спектрального значения (яму). Вместе с тем, предлагаемый подход требует регенерации воздействия после усиления сооружения, поскольку его резонансные частоты после усиления могут измениться.

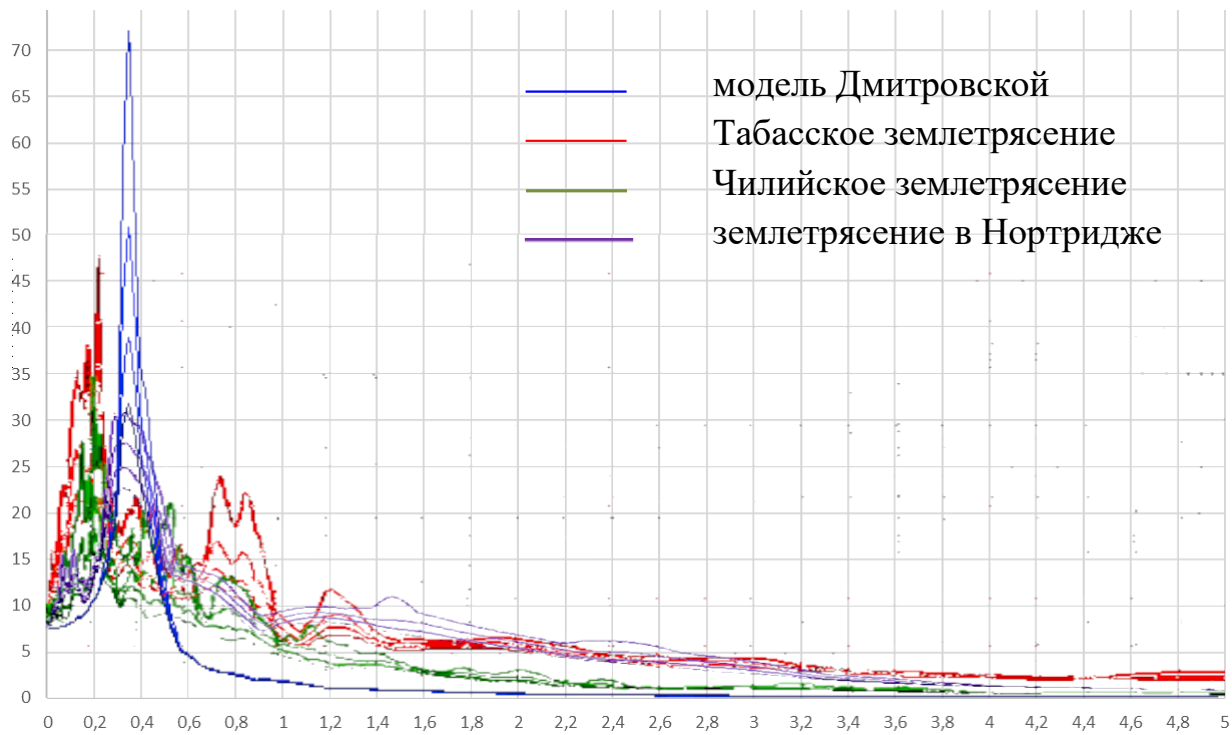


Рисунок 4.16 — Сопоставление спектров абсолютных ускорений модели и реальных землетрясений

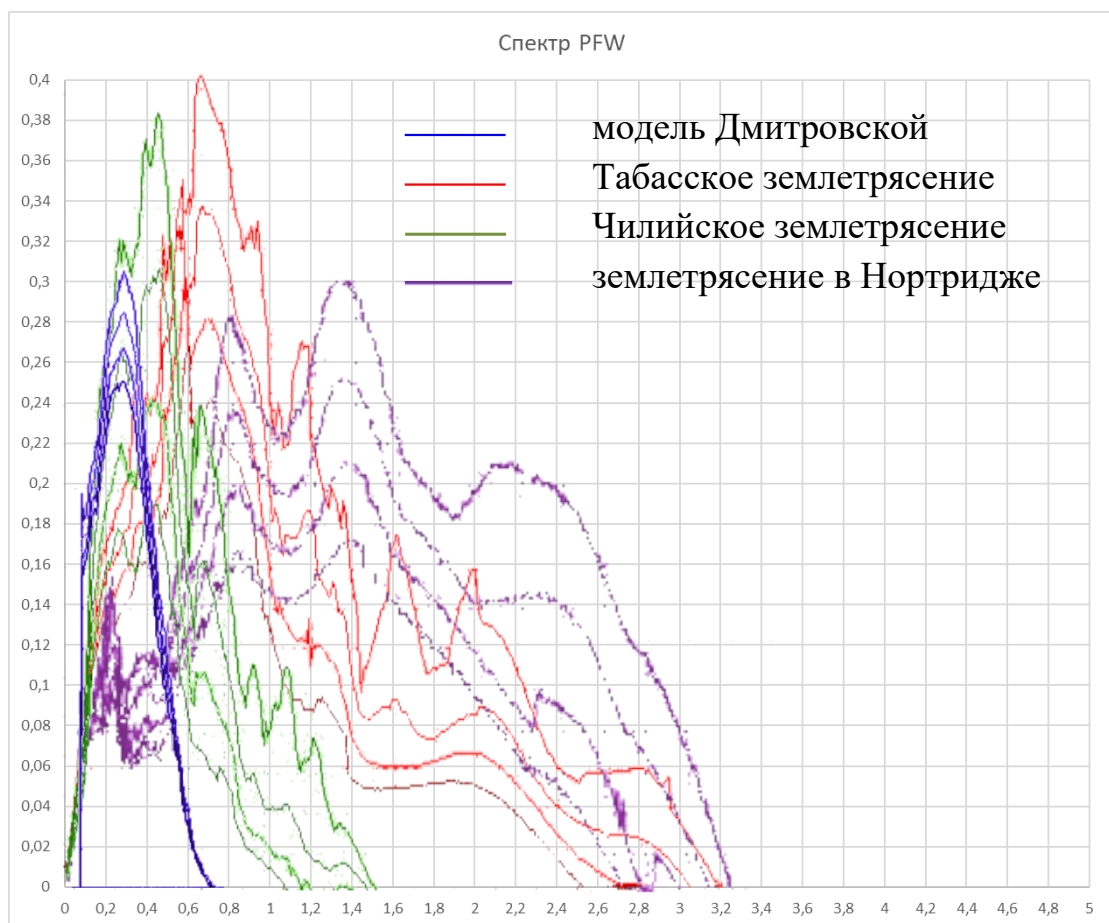


Рисунок 4.17 — Сопоставление спектров PFW сгенерированного воздействия и реальных землетрясений



Рисунок 4.18 — Сопоставление спектров повреждаемости сгенерированного воздействия и реальных землетрясений

4.5. Выводы по главе IV

В настоящем разделе диссертации была поставлена задача генерации сейсмического воздействия, исходя из известных принципов моделирования нагрузки при расчёте сооружений. Это принцип консервативности нагрузки, т.е. она должна давать результаты в запас прочности, принцип учёта предельного состояния, принцип экономичности, т.е. расчётная нагрузка не должна приводить к слишком большим запасам и принцип удобства реализации при выполнении инженерных расчётов.

В рамках выполненных исследований были проанализированы различные модели сейсмического воздействия в виде относительно короткого временного процесса. При этом установлено, что в оригинальном виде большинство моделей не могут обеспечить необходимых величин энергетических и кинематических

характеристик реального землетрясения. Модели сейсмологов вообще не принимают во внимание принцип учёта предельного состояния. Происходит отрыв моделей воздействия от расчета сооружения. Например, для сброса пролётного строения с опор достаточно кратковременного пикового воздействия, а для расчета прогрессивного обрушения или малоциклового усталости такие пики не опасны, а существенна длительность процесса.

Учёт особенностей поведения сооружения под нагрузкой при ПЗ и МРЗ могут быть явно учтены в рамках моделей, ориентированных на рассчитываемое сооружение. К их числу относится модель, предложенная А.А.Долгой и представляющая собой набор из 3 затухающих синусоид, резонансных для сооружения. Амплитуды синусоид и показатели их затухания должны подбираться так, чтобы максимально приблизить параметры модели и реальных воздействий. Всего в модели используется 6 неопределённых параметров. в разделе детально проанализирована

Однако, как показали исследования, эта модель не позволяет реализовать расчёты при многоуровневом проектировании, так как не обладает достаточной гибкостью. Чтобы решить задачу моделирования воздействия при многоуровневом проектировании была реализована модель, предложенная А.М.Уздиным и содержащая 11 неопределённых параметров. Попытки реализации этой модели имелись в работах Л.Н.Смирновой, Н.В.Никоновой и О.П.Нестеровой. Эти параметры должны были по замыслу авторов обеспечить соответствие характеристик модели и реальных воздействий. Однако эти попытки оказались неудачными из-за большого числа параметров модели, найти которые не позволяло быстрое действие ЭВМ. Кроме того, в известных попытках ответ зависит от начального приближения, т.е. авторы не могли получить однозначно сгенерированной модели воздействия.

Как и в известных моделях, в диссертации для каждой характеристики устанавливался весовой коэффициент, на который умножалась погрешность, с которой эта характеристика обеспечивается в модели. Для определения параметров минимизировалась сумма погрешностей с их весовыми коэффициентами.

Минимизация осуществлялась поиском абсолютного минимума путем перебора параметров на сетке их возможных значений. Подбор этих параметров удалось реализовать в диссертации, используя технологию CUDA и низкоуровневый язык Open CL, основанный на языке C++. Это позволило на два порядка повысить быстродействие разработанной в диссертации программы по сравнению с используемыми ранее аналогами и решить поставленную задачу. При этом снимается и вопрос о неоднозначности решения. В разделе показано, что функция погрешности приближения параметров полиэкстремальная, что и может приводить к неоднозначному результату. В выполненном исследовании имеется возможность задания достаточно частой сетки, на которой ищется решение и обеспечивается поиск глобального минимума погрешности.

С помощью весовых коэффициентов в работе реализован процесс генерации воздействия при многоуровневом проектировании, так как они позволяют выбирать из всего ряда характеристик те, которые имеют значимость в рамках заданного расчёта, т.е. соответствие воздействия рассматриваемому предельному состоянию. В главе приведены примеры генерации воздействий под разные предельные состояния.

Сопоставление предложенной модели воздействия с известной моделью А.А.Долгой показало, что предлагаемая модель дает значительно меньшую погрешность с точки зрения приближения характеристик модели к реальным воздействиям. Для сооружений, работающих в упругой области предлагаемая модель дает увеличение спектра ускорений на 35-50%. Это позволяет рекомендовать использование предлагаемой модели для оценки предельных состояний при расчете упругих систем, при оценке сейсмостойкости оборудования, сброса сооружений с опор и т.п. Для расчета повреждаемости сооружений предложенная модель даёт близкие результаты с моделью А.А.Долгой.

Для сопоставления расчётов с использованием предлагаемой модели и расчётов по ансамблю акселерограмм использован пакет из 103 воздействий, отнесённых по макросейсмическим признакам к 9-балльным. Выполненное сопоставление показало, что предлагаемая модель по спектрам абсолютных

ускорений, как и предполагалось в работе, более опасна для сооружения, чем реальные воздействия. Для всех воздействий пиковые спектральные ускорения модельного воздействия на 20-40% выше аналогичных величин для реальных акселерограмм.

Важным свойством предлагаемого воздействия является тот факт, что оно настроено на частоту сооружения. Реальные же воздействия по преобладающей частоте могут несколько отличаться от резонансной частоты сооружений. При этом небольшое отличие в 3-5% может в 1,5-2 раза изменить реакцию сооружения.

Ориентация на сооружение прослеживается и на спектрах повреждаемости – он достаточно узкополосный. Однако, полка на спектре повреждаемости шире, чем диапазон задаваемых частот воздействия, что позволяет корректировать параметры сооружения в немного более широком диапазоне, чем в случае с упруго пластичными системами, опасность воздействия для которых, как было сказано выше, характеризуется спектрами работ сил пластического деформирования.

Таким образом, в результате выполненных исследований разработана универсальная модель сейсмического воздействия, ориентированная на расчёт проектируемого сооружения. Универсальность модели состоит в том, что она пригодна для расчета как упругих, так и упругопластических конструкций, при этом ориентация модели на возможное предельное состояние осуществляется соответствующим подбором весовых коэффициентов.

В рамках предлагаемой модели легко учитывается ответственность сооружения путём соответствующего назначения характеристик модели (PGA, интенсивности по Ариасу, коэффициента гармоничности и др.) с заданной вероятностью их превышения.

Важным с нашей точки зрения является то, что предложенная модель удобна для типового проектирования.

Следует отметить, что форма генерации предлагаемого воздействия позволяет задать и специфические условия площадки строительства: сейсмогеологические характеристики и преобладающий период воздействия.

Однако, по нашему мнению, такое воздействие может оказаться неконсервативным, т.е. давать нагрузки не в запас прочности.

Заключение

1. Анализ исследований в области моделирования расчётных воздействий показал, что в настоящее время сложилось два подхода к решению проблемы: моделирования воздействия для сооружения и моделирование сооружения для площадки строительства. Вторым подход становится во многих случаях основным, особенно при проектировании ответственных сооружений. Однако при этом нарушаются основные принципы моделирования расчётных воздействий, сформулированные классиками современной строительной механики. В работе выделено 4 таких принципа.

- расчётное воздействие должно быть консервативным, т.е. обеспечивать некоторый запас прочности для сооружения;
- воздействие должно ориентироваться на предельное состояние конструкции;
- воздействие не должно приводить к излишне затратным инженерным решениям;
- воздействие должно давать возможность проведения инженерных расчётов.

2. Расчётные воздействия, полученные для площадки строительства, не удовлетворяют инженерным требованиям к расчётному воздействию. При большой затратности на создание модельных воздействий, они не гарантируют консервативности результатов и не учитывают возможных предельных состояний сооружения. Иногда заметно более слабое воздействие, чем прогнозируемое сейсмологами, но с другими частотными и кинематическими характеристиками может быть более опасным для рассматриваемой конструкции. Кроме того, моделирование воздействия для площадки строительства не имеет смысла при типовом проектировании

3. Для моделирования сейсмического воздействия под сооружение важным является учёт, как свойств сооружения, так и свойств воздействия. В

работе были выделены кинематические, спектральные и энергетические свойства воздействия.

4. Исследование характеристик сейсмического воздействия показало, что

- Кинематические характеристики имеют явную зависимость от спектрального состава воздействия.
- Среди энергетических характеристик зависимость от преобладающего периода воздействия прослеживалась только у плотности сейсмической энергии SED
- Интенсивность по Ариасу, абсолютная кумулятивная скорость CAV, среднеквадратическое ускорение и скорость σ_A не зависят от преобладающего периода воздействия. А
- Разброс любых характеристик сейсмического воздействия хорошо описывается законом распределения Вейбула.

Эти данные надо учитывать при задании сейсмического воздействия. Величины энергетических характеристики I_A , CAV, SED, а также значения коэффициента гармоничности k и ускорений основания PGA следует задавать таким образом, чтобы они соответствовали величинам этих же характеристик на площадке строительства с заданной обеспеченностью. Оценка опасности воздействия для сооружения выполняется с помощью спектров кинематических величин и спектров работ сил пластического деформирования

5. Предложена методика оценки опасности воздействия для адаптивных систем с деградирующей жёсткостью. Основная идея методики в исследовании степени повреждения осциллятора с деградирующей жёсткостью при сейсмических колебаниях. В качестве критериев накопления повреждений (силы землетрясения) используется показатель повреждаемости χ и текущий период основного тона колебаний сооружения T . Предполагается, что по мере накопления повреждений χ линейно возрастает, а период колебаний линейно падает с ростом максимального за историю нагружения

перемещения системы $u_{\max}$. В момент обрушения жёсткость превращается в 0. Понятие повреждаемости было введено Л.М. Качановым [56] и Ю.Н. Роботновым [91] и характеризуется площадью части сечения занятого трещиной. В начале колебаний $\chi=0$, а в момент обрушения $\chi=1$.

6. При расчёте сооружения на действие ПЗ достаточно использовать кинематические характеристики сейсмического воздействия. Расчёт на МРЗ подразумевает оценку нелинейной работы сооружения и, как следствие, учёт и дополнительное использование энергетических характеристик воздействия.

7. Для реализации вышеописанных принципов была реализована модель, предложенная А.М.Уздиным и рассмотренная в работах Л.Н.Смирновой, Н.В.Никоновой и О.П.Нестеровой, которая содержит 11 неопределённых параметров, в числе которых импульс скорости. Импульс скорости, наряду с другими характеристиками модели, позволяет сгенерировать модель таким образом, чтобы величины характеристик сгенерированного воздействия соответствовали величинам реального воздействия. Моделирование 11-параметрического воздействия – ресурсоёмкий процесс, В выполненных ранее исследованиях эта модель не была доведена до практического применения из-за большого количества параметров, определение которых не удавалось реализовать даже на мощных ЭВМ. В диссертации процесс генерации воздействия был реализован на видеокарте, которая позволила уменьшить время генерации в 10-15 раз.

8. Для учёта уровня воздействия также, как и в программе, реализующей модель Долгой А.А. используются весовые коэффициенты. Если выполняется расчёт на ПЗ рекомендуется задавать наибольший весовой коэффициент для PGA. Если генерируется МРЗ, то наибольшие весовые коэффициенты рекомендуется задавать для I_A и CAV. Весовой коэффициент для коэффициента гармоничности позволяет регулировать степень распределения энергии между частотными компонентами расчетного воздействия.

9. В результате выполненных исследований разработана универсальная модель сейсмического воздействия, ориентированная на расчёт проектируемого сооружения. Универсальность модели состоит в том, что она пригодна для расчета как упругих, так и упругопластических конструкций, при этом ориентация модели на возможное предельное состояние осуществляется соответствующим подбором весовых коэффициентов.

В рамках предлагаемой модели легко учитывается ответственность сооружения путём соответствующего назначения характеристик модели (PGA, интенсивности по Ариасу, коэффициента гармоничности и др.) с заданной вероятностью их превышения.

Важным с нашей точки зрения является то, что предложенная модель удобна для типового проектирования.

10. Следует отметить, что форма генерации предлагаемого воздействия позволяет задать и специфические условия площадки строительства: магнитуда; эпицентральное расстояние; глубина очага; преобладающая частота(-ы) генерируемого воздействия. Однако, по нашему мнению, такое воздействие может оказаться неконсервативным, т.е. давать нагрузки не в запас прочности.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рекомендованных ВАК изданиях:

1. Прокопович С.В. Абсолютная кумулятивная скорость как показатель силы землетрясения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2019. - №5. - С. 41-44.
2. Прокопович С.В. Оценка зависимости энергетических характеристик сейсмического воздействия от его преобладающего периода // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2018. - №4. - С. 50-55.
3. Ivanova, T.V., Guan J., Nesterova, O.P., Prokopovich, S.V., Smirnova, L.N., Uzdin A.M., Ivashintzov, D.A. Modeling the design seismic input in conditions of limiting seismological information [Моделирование расчётного сейсмического воздействия в условиях ограниченной сейсмологической информации]. Инженерно-строительный журнал. - 2017. - №7 (75). - С. 129-138.
4. Смирнова Л.Н., Уздин А.М., Прокопович С.В. Уточнение модели сейсмического воздействия для статистического моделирования работы конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2018. - №3. - С. 24-31.
5. Уздин А.М., Смирнова Л.Н., Сорокина Г.В., Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р., Прокопович С.В. Статистическое моделирование сейсмических воздействий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2019. - №5. - С. 19-27.
6. Уздин А.М., Сибуль Г.А., Прокопович С.В., Долгая А.А. Энергетическая характеристика силы сейсмического воздействия // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. - 2020. - №2 (45). - С. 18-23.

Патенты, базы данных и программы для ЭВМ, имеющие госрегистрацию:

7. Уздин А.М., Прокопович С.В., Арещенко Т.С., Фролова Е.Д., Сабирова О.Б. Программа определения пиковых ускорений сейсмического воздействия. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2018664350 от 19.10.2018.

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

8. Uzdin A., Prokopovich S. Some principles of generating seismic input for calculating structures //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – Vol. 157. – р. 06021.

Другие публикации по теме диссертации:

9. Прокопович С.В., Уздин А.М. Оценка зависимости интенсивности по Ариасу от преобладающего периода сейсмического воздействия // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. - 2018. - №3 (34). - С. 27-30.
10. Уздин А.М., Назарова Ш.Ш., Прокопович С.В., Румянцева Д.А. Еще раз о задании расчетного сейсмического воздействия // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. - 2019. - №6 (43). - С. 39-44.

11. Уздин А.М., Назарова Ш.Ш., Прокопович С.В., Акбиев Р.Т. Проектное землетрясение: обоснование, параметры, особенности применения при расчетах сооружений // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. - 2019. - №3 (40). - С. 40-45.
12. Сабирова О.Б., Фролова Е.Д., Арещенко Т.С., Прокопович С.В., Уздин А.М. Задание коэффициентов сочетаний при многоуровневом проектировании сейсмостойких конструкций // Сборник трудов LXXXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - СПб: ПГУПС, 2019. - С. 272-275.
13. Арещенко Т.С., Прокопович С.В., Сабирова О.Б., Фролова Е.Д. Задание уровня сейсмического воздействия для оценки сейсмостойкости сооружений при многоуровневом проектировании // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. - 2018. - №4 (35). - С. 25-27.
14. Уздин А.М., Нестерова О.П., Прокопович С.В., Долгая А.А., Чанг Ю., Гуань Ю., Ван Х. Моделирование сейсмических воздействий для динамического расчета зданий и сооружений // Содружество. - 2017. - №20. - С. 59-66.

Библиографический список

1. Абакаров, А.Д. Исследование оптимальных параметров системы сейсмозащиты с выключающимися связями и ограничителем перемещений по критерию надежности на ЭВМ методом Монте – Карло // Расчет и проектирование зданий для сейсмостойких районов: сб. ст. / отв. ред. Я. М. Айзенберг. – М.:Наука.– 1988. – С.108-114.
2. Айзенберг, Я.М. Спектры состояния систем с деградирующей жесткостью и их применение для оценки сейсмической реакции сооружений / Я.М. Айзенберг // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер. 14. Сейсмостойкое строительство. – 1979. – №. 6. – С. 3.
3. Айзенберг, Я.М. Генерирование расчетного ансамбля синтетических акселерограмм и исследование влияния их параметров на сейсмическую реакцию сооружения / Я.М. Айзенберг, К.Ю. Залилов // Расчет и проектирование зданий для сейсмостойких районов: сб. ст. / отв. ред. Я. М. Айзенберг. – М.: Наука. – 1988. – С. 5-14.
4. Айзенберг, Я.М. О критериях предельных состояний и диаграммах "восстанавливающая сила – перемещения" при расчетах на сейсмические воздействия / Я.М. Айзенберг, Л.Ш. Килимник // Сейсмостойкость зданий и инженерных сооружений: сб. ст. / Под ред. д-ра техн. наук, проф. И.И. Гольденבלата. – М.: Стройиздат, 1972. – С. 46-61.
5. Айзенберг, Я.М. Регулирование сейсмической реакции сооружений с деградирующей жесткостью путем регулирования их спектров состояний / Я.М. Айзенберг, В.И. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. – 1981. – №10. – С. 14-19.
6. Альберт, И.У. Расчетное сейсмическое воздействие для сооружения с динамическим гасителем колебаний / И.У. Альберт [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2017. – №8(76). – С. 98-105.
7. Аманкулов, Т. Исследование поведения одномассовой системы с нелинейностью гистерезисного типа при сейсмическом воздействии / Т. Аманкулов, Б.А. Кириков // Сейсмостойкое строительство. 1980. – №8. – С. 16-23.
8. Аптикаев, Ф. Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности / Ф.Ф. Аптикаев ; Рос. акад. наук, Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. – Москва : Наука и образование, 2012. – 175 с.
9. Аптикаев, Ф.Ф. Прогноз параметров сейсмических колебаний, построение локального спектра и синтетической акселерограммы / Ф.Ф. Аптикаев // Сейсмостойкое строительство в эпоху могущества и счастья: сб.ст.. – Ашхабад, Ылым. – 2013. – С.285 – 304.
10. Аптикаев, Ф.Ф. Проектные и реальные спектры реакции: проблема точности задания сейсмических воздействий / Ф.Ф. Аптикаев, О.О. Эртелева // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. – №1. – С.43 – 45.
11. Арещенко, Т.С. Задание уровня сейсмического воздействия для оценки сейсмостойкости сооружений при многоуровневом проектировании / Т.С.

- Арещенко, С.В. Прокопович, О.Б. Сабирова, Е.Д. Фролова // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2018. – №4. – С.25 – 27.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018664350. Программа определения пиковых ускорений сейсмического воздействия / Арещенко Т.С., Прокопович С.В., Сабирова О.Б., Фролова Е.Д., Уздин А.М. ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС. – 2018661425 ; заявл. 19.10.2018 ; опубл. 14.11.2018.
13. Аубакиров, А.Т. Особенности задания сейсмического воздействия для обоснования проекта сейсмоизолирующих фундаментов / А.Т. Аубакиров // Известия ВНИИГ имени Б.Е.Веденеева / АО "Всерос. НИИ гидротехники им.Б.Е.Веденеева". Т.212 : Динамика грунтов и сейсмостойкость энергетических сооружений. – 1989. – С.102 – 109.
14. Бирбраер, А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А.Н. Бирбраер. – СПб : Наука, 1998. - 254 с.
15. Бирбраер, А.Н. Анализ нормативных спектров отклика на основе записи реальных землетрясений / А.Н. Бирбраер, Е.Б. Старостин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – №4. – С. 30 – 35.
16. Богданова, А.М. Числовые характеристики сейсмических воздействий / А.М. Богданова [и др.] // Наука и мир. – 2017. – Т. 1. – Вып. 3 (43). – С. 49 – 55.
17. Болотин, В.В. Статистические методы в строительной механике. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.В. Болотин. – Москва : Стройиздат. – 1965. – 279 с.
18. Бородин, Н.А. Учет пластической энергоемкости элементов жесткости(связей, диафрагм) при расчете каркасов зданий на сейсмическую нагрузку / Н.А. Бородин // Сейсмостойкое строительство. – 1980. – №2. – С.1 – 5.
19. Ботвинкин, Н.Н. Руководство по сейсмостойкости сооружений / Н.Н. Ботвинкин. – Москва ; Ташкент: Саогиз. – 1933. – 160 с.
20. Бриске, Р. Сейсмостойкость сооружений : 2-е изд. / Р. Бриске ; пер. с нем. М. Д. Зворыкина ; Под ред. проф. Н. К. Лахтина. – Москва ; Ленинград: Гос. науч.-техн. изд-во строит. индустрии и судостроения, 1932. – 84 с.
21. Бугаев, Е.Г. Выбор ограниченного набора акселерограмм для проектирования унифицированной АЭС и типового оборудования // Экспресс – информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство.– 1982. – №9. – С. 4 – 9.
22. Костарев, В.В. Обеспечение сейсмостойкости и повышения надежности и ресурса трубопроводов с использованием технологии высоковязкого демпфера / Д.Ю. Павлов, П.С. Васильев, А.Ю. Щукин, А.М. Берковский // Труды заседания рабочей группы международного общества по системам сейсмозащиты (ASSISi), 2011. – С. 31-35.
23. Вахрина, Г.Н. Развитие моделей расчетных акселерограмм сейсмических воздействий / Г.Н. Вахрина, В.И. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – №1. – С.29 – 39
24. Ветошкин, В.А. Вопросы практического использования современных методов расчетов энергооборудования на сейсмостойкость / В.А. Ветошкин,

- В.В. Костарев, А.Ю. Щукин // В сб. Расчет сейсмостойкости энергетического оборудования. – 1984. – №. 212. – С. 3 – 13.
25. Власов, Д.Ю. Влияние ошибок в длиннопериодной области акселерограммы на расчетные смещения сейсмоизолирующих фундаментов / Д.Ю. Власов, А.А. Долгая // Экспресс – информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. – 1995. – №2. – С.32 – 37.
26. Воронец, В.В. Проблемы обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте в сейсмически опасных районах / В.В. Воронец, Ю.И. Ефименко, А.Е. Красковский, А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. – №5. – С.55 – 57
27. Воронец, В.В. Учет конечного срока службы сооружения при оценке сейсмического риска / В.В. Воронец, А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2001. – №2. – С. 43 – 44
28. Гельфанд, В.А. Уточнение модели среды с помощью синтетических сейсмограмм / В.А. Гельфанд // Нефтегазовая геология и геофизика. – 1977. – №5. – С.32 – 36
29. Гиман, Л.Н. К вопросу расчета на сейсмические воздействия протяженных сооружений с дискретными опорами / Л.Н. Гиман, А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2002. – №2. – С. 18 – 23.
30. Гиман, Л.Н. Об одной форме представления сейсмического воздействия для оценки корреляции колебаний точек дневной поверхности при расчете многоопорных конструкций / Л.Н. Гиман, А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2006. – №2. – С. 22 – 25.
31. Гольденблат, И.И. Современные проблемы науки о сейсмостойком строительстве / И.И. Гольденблат, Н.А. Николаенко, С.В. Поляков // Совершенствование методов расчета и конструирования зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах : Материалы конф. / Под ред. д-ра техн. наук проф. И. И. Гольденבלата и д-ра техн. наук проф. С. В. Полякова. – Москва : ЦНИИ строит. конструкций, 1976. – С.9 – 15.
32. Поляков, С.В. Модели сейсмостойкости сооружений / И.И. Гольденблат, Н.А. Николаенко, С.В. Поляков [и др.]. – Москва: Наука, 1979. – 252 с.
33. ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – Введ. впервые с 01. 09.2017. – М. : Стандартиформ, 2017. – 27 с. – (Национальный стандарт).
34. ГОСТ 6249-52. Шкала для определения силы землетрясения в пределах от 6 до 9 баллов. – Взамен ОСТ 4537 ; введ. с 26.05.1952. – М.: Стандартгиз, 1959. – 3 с. – (Национальный стандарт).
35. Грайзер, В.М. "Истинное" движение почвы в эпицентральной зоне / В. М. Грайзер. – М. : ИФЗ, 1984. – 198 с.
36. Грюнталь, Г. Европейская макросейсмическая шкала EMS-98. Предисловие к русскому зданию / Г. Грюнталь // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2008. – Т. 35. – №. 3. – С. 58 – 76.

37. Гусев, А.А. Некоторые вопросы сейсмологического обоснования норм сейсмостойкого проектирования / А.А. Гусев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. – №1. – С.32 – 37.
38. Давыдова, Г.В. Генерация расчетных акселерограмм для оценки сейсмического риска / Г.В. Давыдова, С.В. Огнева, А.М. Уздин, М.Ю. Федорова // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2011. – №4. – С.42 – 47.
39. Долгая, А.А. Моделирование сейсмического воздействия коротким временным процессом / А.А. Долгая // Экспресс-информация ВНИИТПИ. Сер." Сейсмостойкое строительство". – 1994. – №. 5-6. – С. 56 – 63.
40. Долгая, А.А. Статистический анализ интенсивности по Ариасу и скорости для реальных землетрясений. / А.А. Долгая, А.В. Индейкин // Сейсмостойкое строительство. – 2002. – № 2. – С.32 – 33.
41. Долгая, А.А. Методика оценки и рекомендации по заданию уровня расчетного сейсмического воздействия для оценки сейсмостойкости зданий и сооружений различной степени ответственности / А.А. Долгая, А.В. Индейкин, А.М. Уздин // Экспресс-информация ВНИИТПИ. Сер." Сейсмостойкое строительство". – 1996. – № 4. – С.16 – 22.
42. Елисеев, О. Н. Сейсмостойкое строительство: учебник / О. Н. Елисеев, А. М. Уздин ; ПВВИСУ. – СПб. – 1997. – 371с.
43. Жгутова, Т.В. Сейсмоизоляция железнодорожных мостов в Сочи / Т.В. Жгутова, И.О. Кузнецова, А.М. Уздин, С.А. Шульман // Труды заседания рабочей группы международного общества по системам сейсмозащиты (ASSISi), 2011. – С.119 – 132.
44. Завриев, К.С. Динамическая теория сейсмостойкости / К.С. Завриев. – Тифлис : Б. и., 1936. – 206 с.
45. Завриев, К. С. Динамическая теория сейсмостойкости / К.С. Завриев. – Тбилиси: Закавказский институт сооружений, 1936. – 258 с.
46. Назаров, А.Г. Основы теории сейсмостойкости зданий и сооружений / А.Г. Назаров [и др.] ; под ред. К.С. Завриева. – Москва: Стройиздат, 1970. – 224 с.
47. Завриев, К. С. Расчет инженерных сооружений на сейсмостойкость / К. С. Завриев // Известия Тифлисского государственного политехнического института В.И. Ленина. – 1928. – Вып. 3. – С. 115 – 132.
48. Иванова, Т.В. Моделирование расчетного сейсмического воздействия в условиях ограниченной сейсмологической информации / Т.В. Иванова, Ю. Гуань, О.П. Нестерова, С.В. Прокопович, Л.Н. Смирнова, А.М. Уздин, Д.А. Ивашинцов // Инженерно – строительный журнал. – 2017. – №7(75). – С. 129 – 138.
49. Ильина, Д.А. Один аспект проблемы задания расчетных акселерограмм / Д.А. Ильина, А.М. Уздин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2017. – №1. – С.40 – 43.
50. Ильичев, В.А. Динамическое взаимодействие сооружений с основанием и передача колебаний через грунт / В.А. Ильичев // Динамический расчет

- сооружений на специальные воздействия : справочник / под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. – М. : Стройиздат, 1981. – С.114 – 128.
51. Ильясов, Б.И. Простая модель сейсмического воздействия для динамического расчета сооружений / Б.И. Ильясов, Г. Аннаев, Т.В. Жгутова, О.А. Сахаров, А.М. Уздин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2014. – №1. – С.24 – 27.
52. Индейкин, А.В. Оценка параметров максимумов сейсмических ускорений в зависимости от преобладающего периода воздействия / А.В. Индейкин, А.А. Долгая // Экспресс – информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. – 1995. – №5. – С.19 – 24.
53. Инструкция по оценке сейсмостойкости эксплуатируемых мостов на сети железных и автомобильных дорог : РСН-44-88. – Введ. впервые с 01.04.88. – Ашхабад : Ылым, 1988. – 105 с. – (На территории ТССР).
54. Карапетян, Б.К. Сейсмические воздействия на здания и сооружения / Б.К. Карапетян, Н.К. Карапетян. – М. : Наука, 1978. – 159 с.
55. Карцивадзе, Г.Н. Сейсмостойкость дорожных искусственных сооружений / Г.Н. Карцивадзе. – М. : Транспорт, 1974. – 263 с.
56. Кейлис – Борок, В.И. Методы оценки экономического эффекта сейсмостойкого строительства / В.И. Кейлис – Борок, И.А. Нерсесов, А.М. Яглом. – М. : изд. АН СССР, 1962. – 48 с.
57. Килимник, Л.Ш. Методы целенаправленного проектирования в сейсмостойком строительстве / Л.Ш. Килимник. – М. : Наука, 1980. – 155 с.
58. Килимник, Л.Ш. О проектировании сейсмостойких зданий и сооружений с заданными параметрами предельных состояний / Л.Ш. Килимник // Строительная механика и расчет сооружений. – 1975. – №2. – С.40 – 44.
59. Кириков, Б.А. Статистический метод расчета конструкций на сейсмические воздействия как нелинейных систем / Б.А. Кириков. // Сейсмостойкое строительство. – 1978. – Вып.4. – С.4 – 11.
60. Клаф, Р.В. Динамика сооружений / Р.В. Клаф, Д. Пензиен ; пер. с англ. Л.Ш. Килимника, А.В. Швецов. – М. : Стройиздат, 1979. – 320 с.
61. Клячко, М. А. Землетрясение и мы / М.А. Клячко. – СПб. : Интеграф, 1999. – 233с.
62. Сейсмостойкое строительство зданий / И.Л. Корчинский [и др.]; под ред. И.Л. Корчинского. – М. : Высшая школа, 1971. – 320 с.
63. Корчинский, И.Л. Кардинальные вопросы сейсмостойкого строительства : метод. рекомендации / И.Л. Корчинский, Т.Ж. Жунусов. – Алма-Ата : КазЦНТИС, 1988. – 131 с.
64. Основы проектирования зданий в сейсмических районах : Пособие для проектировщиков / С.В. Поляков [и др.] ; под ред. И.Л. Корчинского. – М. : Госстройиздат, 1961. – 488 с.
65. Корчинский, И.Л. Расчет сооружений на сейсмические воздействия / И.Л. Корчинский // Научное сообщение ЦНИИПС. – М. : Стройиздат, 1954. – 76 с.

66. Корчинский, И.Л. Совершенствование метода расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия / И.Л. Корчинский, М.Ф. Барштейн // Снижение стоимости и улучшение качества сейсмостойкого строительства [Материалы совещания] / под ред. И.И. Гольденבלата [и др.]. – М. : Госстройиздат, 1961. – С. 30 – 37.
67. Курбацкий, Е.Н. Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения : теория и приложение / Е. Н. Курбацкий. – Москва : Сросэкспертиза, 2018. – 155 с.
68. Медведев, С.В. Инженерная сейсмология / С. В. Медведев ; Акад. наук СССР. Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – Москва : Госстройиздат, 1962. – 284 с.
69. Мкртычев, О. В. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости : (гипотезы и заблуждения) / О.В. Мкртычев, Г.А. Джинчвелашвили ; М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГБОУ ВПО "Моск. гос. строит. ун-т". – Москва: Московский гоударственный строительный университет, 2012. – 190 с.
70. Москвитин, В.В. Циклические нагрузки элементов конструкций / В.В. Москвитин. – М.: Наука, 1981. – 344 с.
71. Пузырев, Н.Н. О фазовых искажениях и амплитудных характеристиках при группировании сейсмографов на больших базах / Н.Н. Пузырев // Прикладная геофизика. – 1957. – Вып. 17. – С. 3–15.
72. Назаров, А.Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил / А.Г. Назаров ; Акад. наук Арм. ССР. Арм. ин-т стройматериалов и сооружений. – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1959. – 286 с.
73. Николаенко, Н.А. Динамика и сейсмостойкость сооружений / Н.А. Николаенко, Ю.П. Назаров. – М. : Стройиздат, 1988. – 308 с.
74. Немчинов, Ю.И. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости / Ю.И. Немчинов [и др.]. – Киев, 2012. – 384 с.
75. Нестерова, О.П. К вопросу о задании уровня сейсмического воздействия в шкалах балльности и нормах проектирования / О.П. Нестерова и [др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2018. – Т. 45. – №. 1. – С. 73–80.
76. Никонова, Н.В. Особенности задания воздействия и расчета нелинейных систем сейсмоизоляции / Н.В. Никонова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – №3. – С.430–438.
77. Новиков, В.Л. Экспериментальные исследования энергоемкости связевых панелей сейсмостойких стальных каркасов / В.Л. Новиков, Г.М. Остриков // Экспресс – информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. – 1979. – Вып.12. – С.11–17.
78. Ньюмарк, Н. Основы сейсмостойкого строительства : Сокр. пер. с англ. / Н. Ньюмарк, Э. Розенблюэт ; Под ред. Я.М. Айзенберга. – М. : Стройиздат, 1980. – 344 с.
79. Ойзерман, В. И. Расчет конструкций на сейсмические воздействия по методу предельных состояний / В. И. Ойзерман // Реферативная информация ЦИНИС ; Сер. XIV Сейсмостойкое строительство. – 1978. – №. 9. – С. 4–7.

80. Окамото, Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений / Ш. Окамото; Перевод с англ. Л. Ш. Килимника. – М. : Стройиздат, 1980. – 344 с.
81. Павленко, О. В. Характеристики излучения и распространения сейсмических волн в Байкальской рифтовой зоне, оцененные посредством моделирования акселерограмм зарегистрированных землетрясений / О. В. Павленко, Ц. А. Тубанов // Физика Земли. – 2017. – №. 1. – С. 20–33.
82. Перельмутер, А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : УкрНИИпроектстальконструкция, 2000. – 215 с.
83. Перельмутер, А.В. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Киев : «Сталь», 2002. – 600 с.
84. Рекомендации по расчету протяженных и высотных металлических конструкций на сейсмические и динамические ветровые воздействия / Союзметаллостройиниипроект, Центр. н.-и. и проект. ин-т строит. металлоконструкций им. Н.П. Мельникова. – М. : ЦНИИпроектстальконструкция, 1988. – 60 с.
85. Петров, А.А. Оценка сейсмостойкости конструкций на основе использования энергетической меры воздействия / А.А. Петров // Экспресс-информация ВНИИНТПИ. Сер. " Сейсмостойкое строительство". – 1993. – №. 6. – С. 2–7.
86. Руководство по расчету на сейсмические воздействия зданий с учетом их протяженности и перегрузок / Госстрой СССР. Главпромстройпроект. Союзметаллостройиниипроект. Центр. науч.-исслед. и проектный ин-т строит. металлоконструкций. ЦНИИПроектстальконструкция. – Москва: б. и., 1976. – 19 с.
87. Сейсмическое районирование и сейсмическое строительство (Методы, практика, перспективы) / С.И. Полтавцев [и др.] ; под ред. Е.В. Басина. – М. : ГУП ЦПП, 1998. – 259с.
88. Поляков, С.В. Руководство по проектированию сейсмостойких зданий и сооружений. В 4 т. Т. 3. Проектирование сейсмостойких зданий / С.В. Поляков [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1971. – 256 с.
89. Поляков, С.В. Карпатское землетрясение 4 марта 1977 года и его последствия на территории СРР / С.В. Поляков [и др.] //Сейсм. строительство.1977. – 8. – с.39 – 43.
90. Попова, Е.А. Некоторые проблемы применения энергетических методов для оценки сейсмостойкости сооружений / Е.А. Попова, А.С. Ткаченко, А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2000. – №2. – С. 28–30.
91. Райзер, В.Д. Вероятностная оптимизация уровня надежности сооружений / В.Д. Райзер // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – №3. – С. 39–42.
92. Райзер, В. Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций / В. Д. Райзер. – М. : Стройиздат, 1986. – 190 с.

93. Рекомендации по заданию сейсмических воздействий для расчета зданий разной степени ответственности. – С. – Петербург – Петропавловск – Камчатский : КамЦентр, 1996. – 12 с.
94. Рутман, Ю.Л. Анализ нагруженности сооружения на основе величины энергетического критерия интенсивности землетрясения / Ю.Л. Рутман // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – №2. – С. 61–63.
95. Рутман, Ю.Л. Выбор коэффициента редукции сейсмических нагрузок на основе анализа пластического ресурса конструкции / Ю.Л. Рутман, Э. Симборт // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 2 (27). – С. 78–81.
96. Рутман, Ю.Л. Оценка сейсмической энергии, поступившей в упругопластическую систему с одной степенью свободы / Ю.Л. Рутман, А.Д. Шивуа // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 2 (49). – С. 64–74.
97. Рутман, Ю.Л. Анализ возможностей применения энергетического критерия SAV для расчета сейсмостойкости сооружения / Ю.Л. Рутман, Э. Симборт // IX Всеукраинская науч. – техн. конф. «Строительство в сейсмических районах Украины». – Киев: ДП НДІБК, 2012. – С. 618–625.
98. Савинов, О.А. Сейсмоизоляция сооружений (концепция, принципа устройства, особенности расчета) / О.А. Савинов // Избранные статьи и доклады "Динамические проблемы строительной техники". – СПб. : 1993. – С.155 – 178.
99. Савинов, О.А. Назначение уровня расчетного воздействия при оценке сейсмостойкости крупных гидротехнических сооружений / О.А. Савинов, А.М. Уздин // Экспресс – информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. – 1980. – №.2. – С.21–25.
100. Савинов, О.А. О системе расчетных коэффициентов для определения сейсмических нагрузок на большие плотины / О.А. Савинов, А.М. Уздин, С.Г. Шульман // IV Всесоюзная школа семинар "Методы количественной оценки сейсмических воздействий и применение спектрального анализа в сейсмологии". Тезисы лекций 20 – 25 октября 1980 г., г.СигнахиТбилиси : Мецниерба, 1980. – С.168 – 182
101. Салганик, М. П. О моделировании сейсмических воздействий на строительные сооружения / М. П. Салганик // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1987. – №. 28. – С. 157–173.
102. Сахаров, О.А. Анализ сейсмостойкости металлической башни «Ramboll» системы сотовой телефонной связи / О.А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. – №2. – С. 10–14.
103. Сахаров, О.А. К вопросу задания сейсмического воздействия при многоуровневом проектировании сейсмостойких конструкций / О.А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2004. – №4. – С. 7–9.
104. Сахаров, О.А. Назначение расчетного ускорения с учетом новых карт сейсмического районирования / О.А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. – №2. – С.48 – 49.
105. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Ю.В. Ризниченко [и др.] ; под ред. Ю.В. Ризниченко. – М. : Наука, 1979. – 192 с.

106. Сорокин, Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин ; Акад. строительства и архитектуры СССР. Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций. – Москва: Госстройиздат, 1960. – 131 с.
107. Соснин, А.В. Об уточнении коэффициента допускаемых повреждений K_1 и его согласованности с концепцией редукции сейсмических сил в постановке спектрального метода / А.В. Соснин // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №1. – С. 92–114.
108. СП 14.13330.2011. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II – 7 – 81*. – Введ. 2011-05-20. – М. : ОАО "ЦПП", 2011. – 58 с.
109. СНиП II – 7 – 81*. Строительство в сейсмических районах. – Введ. 1982-01-01. – М. : Госстрой России, 2000. – 45 с.
110. Тяпин, А.Г. Современные нормативные подходы к расчету ответственных сооружений на сейсмические воздействия / А.Г. Тяпин. – М. : АСВ, 2018. – 517 с.
111. Уздин, А.М. Задание сейсмического воздействия. Взгляд инженера – строителя / А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. – №1. – С. 27–31.
112. Уздин, А.М. Оценка статистических характеристик расчетного воздействия при заданной сейсмичности площадки строительства / А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. – 2000. – №2. – С.3–4.
113. Уздин, А.М. Что скрывается за линейно – спектральной теорией сейсмостойкости / А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2009. – №2. – С. 18–23.
114. Экономика сейсмостойкого строительства / А.М. Уздин [и др.] ; под ред. А.М. Уздина. М. : ФГПУ ДПО «Учебно – методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». – 2017. – 176 с.
115. Уздин, А.М. Задание смещений при расчете сейсмостойкости сооружений и построении шкал балльности / А.М. Уздин, Л.Н. Гиман // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. – №5. – С. 12–16.
116. Уздин, А.М. Расчет элементов и оптимизация параметров сейсмоизолирующих фундаментов / А.М. Уздин, А.А. Долгая ; Строительство и архитектура. Серия: Строительные конструкции и материалы ; Вып. 1. – М. ; ВНИИНТПИ, 1997. – 76 с.
117. Уздин, А.М. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений : учеб. пособие / А.М. Уздин, С.В. Елизаров, Т.А. Белаш. – М. : ФГБОУ "Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте", 2012. – 501 с.
118. Уздин, А.М. Сейсмостойкость мостов / А.М. Уздин, И.О. Кузнецова. – Саарбрюккен : Palmarium, 2014. – 450 с.
119. Уздин, А.М. Моделирование сейсмических воздействий для динамического расчета зданий и сооружений / А.М. Уздин [и др.] // Российско

- китайский научный журнал «Содружество». Ежемесячный научный журнал научно – практической конференции. – 2017. – № 20. – С. 59–66.
120. Уздин, А.М. Универсальный численный показатель силы землетрясения / А.М. Уздин [и др.] // Известия российской Академии ракетных и артиллерийских наук. – 2018. – Вып. 2. – С. 152–156.
121. Уздин, А.М. Универсальная энергетическая характеристика землетрясения / А.М. Уздин [и др.] // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2018. – №3. – С. 23–26.
122. Уздин, А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А.М. Уздин, Т.А. Сандович, аль-Насер-Мохомад Самих Амин. – СПб. : Изд-во ВНИИГ, 1993. – 175 с.
123. Уломов, В.И. Комплект новых карт общего сейсмического районирования территории Российской федерации / В.И. Уломов, Л.С. Шумилина // Сейсмостойкое строительство. – 1998. – №4. – С. 30–34.
124. Уломов, В.И. Новый комплекс карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР – 2012) / В.И. Уломов, М.И. Богданов // Инженерные изыскания. – 2013. – №8. – С. 30–39.
125. Храпков, А.Л. Расчетно – теоретические исследования сейсмостойкости оборудования АЭС / А.Л. Храпков, А.М. Цыбин, Б.Д. Кауфман // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. – 1981. – Т.148. – С. 9–18.
126. Храпков, А.А. О построении математической модели арочно – гравитационной плотины Саяно – Шушенской ГЭС / А.А. Храпков [и др.] // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2011. – Т. 264. – С. 56–69.
127. Цшохер, В.О. Антисейсмическое строительство / В.О. Цшохер, В.А. Быховский ; Центр. строит. б-ка при постоянной Всес. строит. выставке. – Москва: Центр. строит. б-ка : Ред. журн. "Наше строительство", 1937. – 344 с.
128. Шивуа, А. Дж. Энергетический метод оценки сейсмостойкости с помощью удельной энергетической плотности (УЭП) / А. Дж. Шивуа, Ю.Л. Рутман // Актуальные проблемы современного строительства: Сборник докладов «68 – я Международная научно – практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых». – СПбГАСУ. – 2015. – ч. I. – С. 6–11.
129. Шивуа, А.Дж. Оценки сейсмической энергии, поступившей в упруго – пластическую систему с одной степенью свободы / Ю. Л. Рутман, А. Дж. Шивуа // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ. – 2015. – № 2. – С. 64 – 74.
130. Ang, A.H.S. Reliability Bases for Seismic Safety Assessment and Design / A.H.S. Ang // Proc., 4th US National Conf. on Earthquake Engineering. – Oakland, Calif. : Earthquake Engineering Research Institute, 1990. – Т. 1. – pp. 29-45.
131. Araya, R. Saragoni S.R. Earthquake Accelerogram Destructiveness Potential Factor / R. Araya, S.R Saragoni // Proc. 8th World Conference on Earthquake Engineering, 1985. 7. – 1985. – Т. 11. – pp. 835–843.
132. Arias, A. A measure of earthquake intensity / A. Arias // Seismic Design for Nuclear Power Plants / Ed. R.J. Hansen. – Cambridge, MIT Press, 1970. – pp. 438–483.

133. Barr, J.M. The Seismic Safety of Bridges: a View From the Design Office / J.M. Barr // Proc. of 12 – th European Conference on Earthquake Engineering. Oxford, UK. – 2002. – 1 optical disk CD-ROM.
134. Benin, A.V. Designing Scenarios of Damage Accumulation / A.V Benin, Sh.Sh. Nazarova, A.M. Uzdin // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. – Springer, Cham, 2018. – pp. 600–610.
135. A Criterion for Determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake: Final report (Technical Report) | OSTI.GOV [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osti.gov/biblio/6968267> (дата обращения: 2.03.2021).
136. Berlage, P.H. Seismometer / P.H. Berlage // Handbuch der Geophysik. Borntraege. – . Berlin: 1932. – pp. 299–526.
137. Biot, M.A. A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses / M.A. Biot // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1941. – T. 31. – No. 2. – pp. 151-171.
138. Biot, M. Theory of Elastic Systems Vibrating under Transient Impulse with an Application to Earthquake-Proof Buildings / M. Biot // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1933. – No. 2. – pp. 262–268.
139. Bogdanova, M.A. The Model of Seismic Impact as a Short Temporary Process for Calculating of the Seismoisolated Systems / M.A. Bogdanova, A.A. Dolgaya, J.V. Ivanova, O.A. Sakharov, A.M. Uzdin // 12th World Conference on Earthquake Engineering 2000. URL: <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/1358.pdf>
140. Bommer, J.J. The Effective Duration of Earthquake Strong Motion / J.J. Bommer, A. Martinez – Pereira // Journal of Earthquake Engineering. – 1999. – No. 2. – pp. 127–172.
141. Cabanas, L. Approach to measurement of the potential structural damage of earthquake ground motions / L. Cabanas, B. Benito, M. Herraiz // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. – 1991. – Vol. 26. – pp. 79–92.
142. Campbell, K.W. Cumulative Absolute Velocity (CAV) and Seismic Intensity Based on the PEER – NGA Database / K.W. Campbell, Y. Bozorgnia // Earthquake Spectra. – 2012. – Vol. 28, No. 2. – pp. 457–485.
143. Chopra, A.K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering / A.K. Chopra. – Prentice Hall, 2011. – 944 p.
144. Dmitrovskaya, L. N. Earthquake Displacements Setting for Calculating Structures and Building Earthquake Scales / L. N. Dmitrovskaya, A. M. Uzdin // First European Conf. on Earthquake Eng. and Seismology, Geneva, Switzerland. – 2006. – pp. 3–8.
145. Dolgaya, A.A. Earthquake Accelerations Estimation for Construction Calculating with Different Responsibility Degrees / A.A. Dolgaya, A.M. Uzdin, A.V. Indeykin // Structural Dynamics – EURO DYN'96. – 1996. – Vol. 2. – pp.143–147.
146. Dowrick, D.J. Earthquake Resistant Design: a Manual for Engineers and Architects / D.J. Dowrick. – Wiley, 1977. – 374 p.
147. Durseneva, N.V. Peculiarities of Calculating Bridges with Seismic Isolation Including Spherical Bearings and Hydraulic Dampers in Russia / N.V. Durseneva [et al.] // Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2015. – T. 9. – No.. 4. – pp. 401-409

148. Erberik, M.A. Energy – based Low – cycle Fatigue Characteristics of Degrading Structures / M.A. Erberik, H. Sucuoglu // Proc. of 12 – th European Conference on Earthquake Engineering. Oxford, UK. – 2002. – 1 optical disk CD-ROM.
149. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance: prEN 1998-1:2003 E. – Will supersede ENV 1998-1-1:1994; ENV 1998-1-2:1994 and ENV 1998-1-3:1995. – Brussels: CEN, 2003. – 215 p.
150. Faccioli, E. Displacement Spectra for Long Periods / E. Faccioli, R. Paolucci, J. Rey // Earthquake spectra. – 2004. – T. 20. – No. 2. – pp. 347-376.
151. Fajfar, P. A Measure of Earthquake Motion Capacity to Damage Medium-period Structures / P. Fajfar, T. Vidic, M. Fischinger // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 1990. – T. 9. – No. 5. – pp. 236-242.
152. Fardis, M.N. Code Developments in Earthquake Engineering / M.N. Fardis // Proc. of 12 – th European Conference on Earthquake Engineering. Oxford, UK. – 2002. – 1 optical disk CD-ROM.
153. Foravante, V. Performance Based Designing of High-rise Base Isolated Buildings / V. Foravante [et al.] // International workshop “Base isolated high – rise buildings”, Yerevan, 2008. – pp. 98 – 107.
154. Grünthal, G. (1998) European Macroseismic Scale / G. Grünthal. – Luxembourg: Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 1998. – 101 p.
155. Housner, G.W. Behaviour of Structures During Earthquakes / G.W. Housner // Journal of the Engineering Mechanics Division. – 1959. – Vol. 85, No. 4 – pp.109–129.
156. Housner, G. W. Characteristics of Strong-motion Earthquakes / G. W. Housner // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1947. – Vol. 37, No. 1. – pp. 19–31.
157. Housner, G.W. Limit Design of Structures to Resist Earthquakes / G.W. Housner // Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering. – Berkeley : Earthquake Research Institute and the University of California, 1956. – Vol. 5. – pp. 1–12.
158. Johnson, G. R. Short Duration Analytic Earthquake / G. R. Johnson, H. I. Epstein // Journal of the Structural Division. – 1976. – Vol. 102. – No. 5. – pp. 993-1001.
159. Campbell, K.W. Cumulative Absolute Velocity (CAV) and Seismic Intensity Based on the PEER – NGA Database / K.W. Campbell, Y. Bozorgnia // Earthquake Spectra. – 2012. – Vol. 28, No. 2. – pp. 457 – 485.
160. Der Kiureghian, A. CQC Modal Combination Rule for High-frequency Modes / A. Der Kiureghian, Y. Nakamura // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 1993. – No. 11. – pp. 943–956.
161. Koliopoulos, P.K. Duration and Energy Characteristics of Greek Strong Motion Records / P.K. Koliopoulos, B.N. Margaris, N.S. Klimis // Journal of Earthquake Engineering. – 1998. – Vol.2, No 3. – pp.391 – 417.
162. NTC 2018. Le Norme Tecnica per le Costruzioni. – D. Min. Infrastrutture e Trasporti 17 Gennaio 2018. – Roma: Legislazione Tecnica, 2018. – 400 p.

163. Mononobe, N. Die Eigenschwingungen eingespannter Stäbe von veränderlichem Querschnitt / N. Mononobe // ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. – 1921. – Vol. 1. – No. 6. – pp. 444-451.
164. Neumark, S. Concept of Complex Stiffness Applied to Problems of Oscillation with Viscous and Hysteretic Damping / S. Neumark. – Aero Research Council. R&M. – 1957. – No. 3269. – pp. 1–36.
165. Nicoletti, M. The Italian Seismic Observatory of Structures / M. Nicoletti, D. Spina, B.G. Lamonaca // Proc. of 12 – th European Conference on Earthquake Engineering. Oxford, UK. – 2002. – 1 optical disk CD-ROM.
166. Omori, F. Seismic Experiments on the Fracturing and Overturning of Columns / F. Omori // Rep. by the Earthquake Investigation Committee. – Tokyo, 1900. – Vol. 4. – pp. 69–141.
167. Park, R. Reinforced Concrete Structures / R. Park, T. Paulay. – New York, John Wiley & Sons, 1975. – 800 p.
168. Seismic Risk Assessment of Motorway Bridge Warth / R.G. Flesch [et al.]// 12th World Conference on Earthquake Engineering 2000. URL: <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0445.pdf>
169. Ricker, N. The form and laws of propagation of seismic wavelets / N. Ricker // Geophysics. – 1953. – Vol. 18. – No. 1. –pp. 10–40.
170. Trifunac, M.D. A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion / M.D. Trifunac, A.G. Brady // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1975. – Vol. 65. – No. 3. – pp. 581-626.
171. Uzdin, A.M. Setting the Level of Design Acceleration on the Basis of the Energy Theory of Earthquake Engineering / A.M. Uzdin, L.N. Dmitrovskaya, O.A. Sakharov // 14th European Conference on Earthquake Engineering 2010. – Vol. 1. – Ochrid, 2010. – pp.166–172.
172. Zaslavsky, Y. Earthquake Site Response Study for Designed Bridges in Israel / Y. Zaslavsky, A. Shapira, M. Kenigsberg // Proc. of 12 – th European Conference on Earthquake Engineering. Oxford, UK. – 2002. – 1 optical disk CD-ROM.
173. Zhou, Y. Effects of Magnitude, Epicentral Distance and Site Conditions on the Duration of Strong Ground Motion / Y. Zhou, T. Katayama // Seisan Kenkyu. – 1985. – No. 37. – pp. 10 – 13
174. Zhou, Y. A new definition of duration of strong ground motion / Y. Zhou, L. Xie// Proc. Chinese National Conf. on Earthq. Eng., Shanghai, 1984 (in Chinese).