

На правах рукописи



ПРОКОПОВИЧ Сергей Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ
СООРУЖЕНИЙ**

Специальность: 05.23.17 – Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Уздин Александр Моисеевич

Официальные оппоненты: **Заалишвили Владислав Борисович**
доктор физико-математических наук, профессор,
Геофизический институт – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук», директор;

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

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

Защита состоится «10» июня 2021 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220 главного корпуса).

Тел./факс: 8 (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/prokorporovich-sergey-vladimirovich>.

Автореферат разослан «05» мая 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Попов Владимир Минович

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Рассмотрены кинематические, спектральные и энергетические характеристики сейсмических воздействий. Установлена связь рассматриваемых характеристик с преобладающим периодом воздействия. Даны рекомендации по назначению характеристик воздействия при его моделировании. Разработаны рекомендации по моделированию сейсмических воздействий различной силы, необходимые при многоуровневом проектировании сооружений. Предложена модель сейсмического воздействия в виде колебательного процесса и импульса скорости, основанная на выполненном анализе характеристик воздействия.

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день в общемировой практике сейсмостойкого строительства остро стоит вопрос выполнения динамических расчётов конструкций и сооружений, используя в качестве входного процесса акселерограммы землетрясений. Такого рода расчёты необходимы при проектировании систем сейсмогашения и сейсмоизоляции, при расчёте высотных зданий, больших мостов и других ответственных объектов, при оценке повреждаемости сооружений и т.д. Особенно важными становятся динамические расчёты 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. Герсеванова, 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 расчётов сооружения на расчетное воздействие.

На данный момент при создании расчётных моделей воздействия эти требования часто нарушаются. При моделировании расчётных 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 расчётных, поскольку не отвечают ни одному из целеполагающих принципов формирования расчётных моделей.

В сейсмостойком строительстве расчётные модели ориентировались на их опасность для рассчитываемого сооружения и возможность проведения анализа поведения конструкции. Первые модели, использованные основоположниками сейсмостойкого строительства Ф. Омори, С. Суэхино 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 корреляция между пиковыми ускорениями основания и преобладающим периодом T 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.

Научная новизна 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 были использованы методы динамики сооружений, строительной механики, математической статистики, а также методы математического моделирования сейсмических колебаний на ЭВМ. Результаты исследований были сопоставлены с опубликованными результатами расчётов 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 расчёта 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. Причём кинематические характеристики существенно коррелируют с преобладающим периодом колебаний основания, а энергетические характеристики такой зависимости не проявляют.

При задании расчётного уровня сейсмического воздействия следует исходить из натуральных данных, представленных в инструментальной части шкалы балльности Ф.Ф. Аптикаева, но всегда необходимо 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 неопределённых 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.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Установлены основные характеристики землетрясений и получены оценки этих характеристик для моделирования сейсмических воздействий; предложены новые характеристики для оценки степени опасности сейсмического воздействия.

Анализ основных характеристик сейсмического воздействия выполнен на основе обработки записей около 100 акселерограмм 9-балльных воздействий, собранных российскими и китайскими специалистами в рамках работы по международному гранту № 16-58-53095.

К основным характеристикам воздействия в работе отнесены:

- пиковые ускорения основания PGA;
- коэффициент гармоничности, который оценивается следующим образом

$$\kappa = \frac{y_0^{(\max)} \cdot \dot{y}_0^{(\max)}}{y_0^{(\max)}}, \quad (1)$$

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

- интенсивность по Ариасу

$$I_A = \frac{\pi}{2 \cdot g_0} \int_0^T \dot{y}_0(t)^2 dt; \quad (2)$$

- абсолютная кумулятивная скорость

$$CAV = \int_0^T |\dot{y}_0(t)| dt; \quad (3)$$

- спектры ответа (ускорений, скоростей и смещений).

Дополнительно в работе использованы:

- спектр работ сил пластического деформирования PFW;
- спектр повреждаемости χ .

Исследования рассмотренных выше характеристик воздействия показали, что кинематические характеристики сильно зависят от преобладающего периода акселерограммы T_{eq} . В частности, установлено падение величины PGA с ростом преобладающего периода. Полученные зависимости оказались близкими к аналогичным зависимостям, предложенным А.А.Долгой на основе обработки записей 8-балльных воздействий. Важной с практической точки зрения оказалась полученная в работе зависимость коэффициента гармоничности от величины T_{eq} . Ранее эта величина исследовалась американскими специалистами, и они рекомендовали принимать её равной 5. Позднее О.А.Сахаров и А.А.Долгая отмечали наличие зависимости κ (T_{eq}). В диссертации показано, что величина κ хорошо описывается законом Вейбулла. В качестве примера на рис. 2 показана плотность распределения κ для преобладающего периода $T = 0,3$ с.

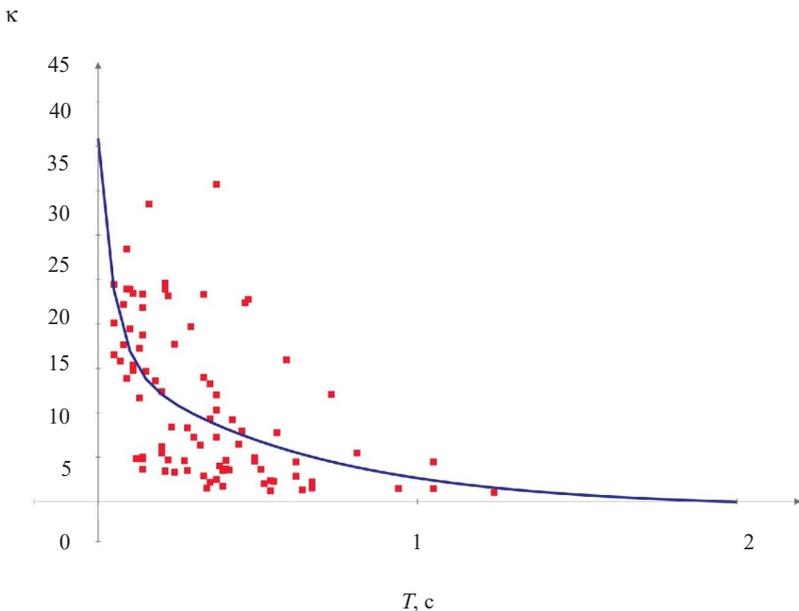


Рисунок 1 — Зависимость показателя гармоничности κ от преобладающего периода на акселерограмме T

На основе статистического анализа в работе предложены аппроксимирующие формулы для зависимости кинематических параметров от преобладающего периода на акселерограмме землетрясения.

Для оценки энергетических характеристик, в частности для I_A , и CAV были рассмотрены различные аппроксимирующие формулы для описания зависимости этих характеристик от преобладающего периода акселерограммы. Чёткой корреляции $I_A - T_{eq}$ и $CAV - T_{eq}$ выявлено не было. Погрешности гипотезы о независимости I_A и CAV от T_{eq} , т. е. $I_A = const$ и $CAV = const$, оказались в числе минимальных, поэтому представляется оправданным принимать I_A и CAV постоянными в рамках одного балла.

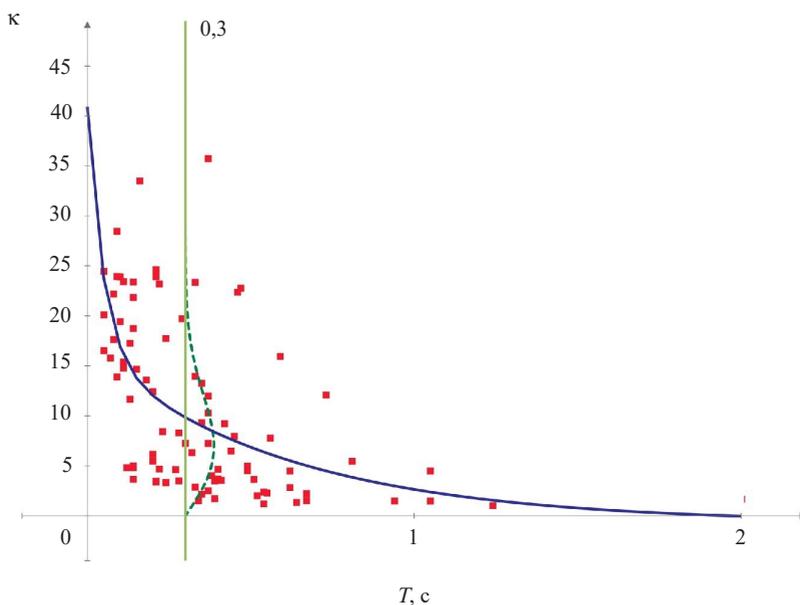


Рисунок 2 — Плотность распределения показателя гармоничности для $T = 0,3$

Как показал анализ, известные показатели не достаточны для полной характеристики опасности сейсмических воздействий. Для оценки опасности воздействия в диссертации использованы спектры работ сил пластического деформирования и предложен спектр повреждаемости. Спектр работ сил пластического деформирования представляет собой работу реакции упруго-пластического маятника с диаграммой Прандтля на площадке текучести.

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

- в зоне упругих деформаций

$$\ddot{y} + \gamma \cdot k \cdot \dot{y} + k^2 \cdot y = -\ddot{y}_0; \quad (4)$$

- на площадке текучести

$$\ddot{y} + g \cdot f \cdot \text{sign}(\dot{y}) = -\ddot{y}_0. \quad (5)$$

В уравнение (4) 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 0,05 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 $\gamma = 0,1$, характерное для объектов массового строительства – зданий средней этажности на грунтах II-ой категории.

Решения уравнений (4, 5) имеют стандартный вид и на участке интегрирования записываются аналитически. Интегрирование начинается в упругой зоне (уравнение 4), а переход в зону пластических деформаций происходит, если сила упругости S_u превысит предел упругости F_{el} . Возврат в зону упругих деформаций происходит при смене знака скорости массы относительно основания.

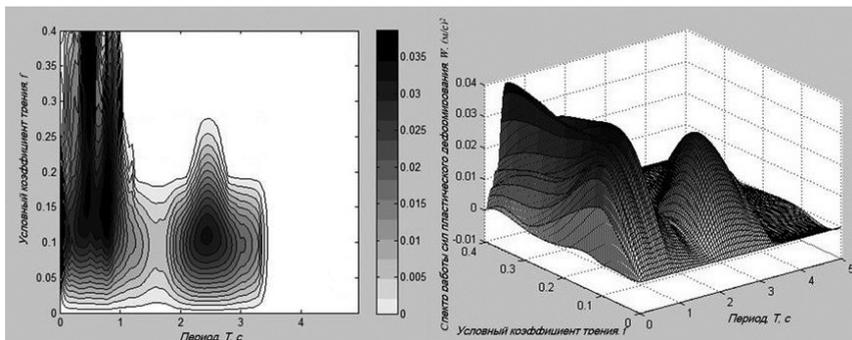


Рисунок 3 — Спектр работы сил пластического деформирования $W(T, f)$

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

Это зависимость работы от двух переменных: периода колебаний осциллятора и предела его упругости. $W(T, f)$. Ранее в качестве показателя опасности сейсмического воздействия предлагалось использовать объем под поверхностью $W(T, f)$. В работе это предложение реализовано и установлено, что этот показатель является устойчивой характеристикой, не зависящей от спектрального состава воздействия.

Однако рассмотренной характеристики опасности недостаточно. Она описывает повреждения упругопластических систем, прежде всего металлических конструкций. Для железобетонных и каменных конструкций характерен другой механизм накопления повреждений, связанный с развитием трещин и падением жёсткости. Для их описания в работе предложена новая характеристика опасности сейсмического воздействия – спектр повреждаемости.

Для построения спектра повреждаемости удобно использовать модель сооружения Кирикова-Аманкулова, 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 линейно 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 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

$$R(y) = \frac{r(u) \cdot y}{1 + \kappa(u) \cdot y^2}, \quad (6)$$

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

Жесткость 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.

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. Система приспосабливается к программе нагружения, если спектр состояний пересечёт в некоторой точке спектр реакции.

Колебания системы с деградирующей жёсткостью описываются уравнением:

$$m\ddot{u} + \gamma \cdot \sqrt{r \cdot m \cdot \dot{u}} + R(u) = -m \cdot \ddot{y}_0, \quad (7)$$

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.

Интегрирование уравнения (7) 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 ее колебаний, т. е. спектры периодов и спектры повреждаемости системы.

2. Разработана методика задания расчётного уровня сейсмического воздействия с учётом сейсмической опасности территории и срока службы сооружения для проведения расчётов на действие ПЗ и МРЗ.

В настоящий момент осуществляется переход на многоуровневое проектирование сейсмостойких сооружений. Особенностью такого перехода является необходимость расчёта минимум на два уровня сейсмических воздействий: на редкие, сильные землетрясения (МРЗ) с повторяемостью раз в 1000–5000 лет и на частые землетрясения (ПЗ) с повторяемостью раз в 30–300 лет.

Первый расчёт на МРЗ допускает накопление повреждений в сооружении вплоть до его разрушения в предельном состоянии. Это состояние обозначается в литературе как ULS (Ultimate limited state). В связи с работой материала за пределами упругости расчет на действие МРЗ является нелинейным.

Второй расчёт на действие ПЗ предполагает работу конструкции в штатном режиме при воздействиях более слабых, чем ПЗ. Предельным состоянием для ПЗ является нарушение нормальной эксплуатации, которое обозначается в литературе, как SLS (Serviceability limited state). При ПЗ сооружение работает упруго и расчет на действие ПЗ является линейным.

Поскольку поведение сооружения при ПЗ и МРЗ принципиально отличаются друг от друга, разными должны быть и критерии опасности

сейсмического воздействия. Этот вопрос в настоящее время совершенно не проработан, ни в отечественных нормах, ни в зарубежных. Предлагаемая работа посвящена решению этого вопроса

При моделировании ПЗ достаточно, зная амплитуду ускорения PGA, задаться величинами преобладающего периода T (или несколькими частотами, если моделируется полигармоническое воздействие) и показателем гармоничности k . Величина энергетических характеристик обеспечивается в данном случае косвенно. Основная задача при моделировании проектного воздействия – обеспечить бесперебойность работы оборудования, при этом наличие повреждений конструкции либо не предусмотрено вообще, либо степень повреждений достаточно мала и не влияет на результаты расчёта.

Так как PGA входят в правую часть уравнения колебаний системы, при расчёте на ПЗ они играют определяющую роль для модели воздействия. К важным характеристикам в этом случае также относится показатель гармоничности воздействия k . Обеспечение заданного значения k не позволяет сосредоточить всю энергию на одной резонансной частоте. Величина энергетических характеристик при моделировании ПЗ зачастую является неусущественной.

При моделировании МРЗ также следует обеспечивать кинематические характеристики воздействия, но при этом опасность определяется в первую очередь величиной энергетических характеристик, в частности величинами I_A и SAV. Величина SED обеспечивается соответствием величины пиковых ускорений основания расчётным (заданным значениям).

В настоящее время в РФ для обычных конструкций уровни воздействий устанавливаются по согласованию с заказчиком, который, в свою очередь, оперирует экономическими соображениями. Обязательный расчёт на все уровни проектирования установлен только для опасных объектов.

В странах ЕС и Запада нормы устанавливают до 4 уровней воздействия. При этом все сооружения рассчитываются минимум на два уровня воздействия – ПЗ и МРЗ.

Таким образом, предлагается задавать воздействие в зависимости от срока службы сооружения, т.е. используя карты ОСР и расчётный срок службы выбирать расчётную балльность, которая может оказаться меньше определённой по картам балльности. При этом для ПЗ должна обеспечиваться надёжность сооружений и возможность ремонта с минимальными экономическими потерями для промышленных и гражданских конструкций. Для МРЗ должна обеспечиваться безопасность людей и сохранность оборудования.

Выполненные исследования позволяют задать уровень сейсмического воздействия и другие его характеристики при проектировании инженерных сооружений.

При генерации воздействий требуется назначить величины основных характеристик воздействия. В российских ГОСТ регламентируется только величина пиковых ускорений основания - согласно инструментальной части шкалы Ф.Ф. Аптикаева. Однако шкала не учитывает зависимости $PGA(T)$. Процесс задания пиковых ускорений основания включает в себя несколько этапов:

1. Поиск параметров сейсмической опасности площадки строительства по заданной ситуационной сейсмичности. Для этого использовано известное соотношение между повторяемостью воздействия T и его интенсивностью в баллах I

$$\log T = aI + b. \quad (8)$$

Параметры a и b определяются, исходя из заданных значений интенсивности I и повторяемости T сейсмических воздействий, по методу наименьших квадратов

2. По найденным значениям a и b и заданной вероятности превышения $[P]$ определяется расчётная повторяемость воздействий, исходя из распределения потока землетрясений по закону Пуассона по формуле

$$T_{calc} = -\frac{T_{life}}{\ln(1-[P])}. \quad (9)$$

3. По полученным параметрам a и b и расчётной повторяемости T_{calc} , используя формулу (8) определяется расчётная балльность I_{calc}

$$I_{calc} = \frac{\log(T_{calc}) - b}{a}. \quad (10)$$

4. По полученному значению I_{calc} и новой шкале балльности определяем расчётную величину PGA. Для этого была использована следующая аппроксимирующая зависимость $PGA(I)$

$$PGA = 10^{\frac{I-1,89}{2,5}}. \quad (11)$$

Эта величина PGA соответствует преобладающему периоду воздействия $T = 0,3$ с. Далее по полученной в работе зависимости определяются пиковые ускорения основания для заданного преобладающего периода воздействия.

Полученное значение PGA следует рассматривать, как среднее значение ускорений, которые являются случайной величиной. Величины характеристик сейсмического воздействия хорошо описываются законом Вейбула. Однако, чтобы использовать данный вид распределения, требуется определить его параметры. Для значимых энергетических характеристик имеется всего одно соответствующее стационарное распределение. Параметры

распределения этих характеристик представлены в таблице. Для кинематических характеристик распределение определяется для каждого конкретного преобладающего периода.

Таблица 1 — Параметры распределения для энергетических характеристик

Характеристика	Среднее значение	Средне-квадратическое 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

Таким образом, зная обеспеченность величин характеристик воздействия, а также определив их зависимость от преобладающего периода, можно задать их расчётные значения.

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

В результате выполненных исследований реализована универсальная модель сейсмического воздействия, предложенная А.М. Уздиным и Л.Н. Дмитривской в более ранних работах. Такая модель ориентирована на расчет проектируемого сооружения. Универсальность модели состоит в том, что она пригодна для расчёта как упругих, так и упругопластических конструкций, при этом ориентация модели на возможное предельное состояние осуществляется соответствующим подбором весовых коэффициентов, которые используются при определении погрешности:

$$\Delta_1 = \left(\frac{X - X_0}{X_0} \right)^2 \cdot p_1, \quad (12)$$

где Δ_1 – величина погрешности параметра при весовом коэффициенте p_1 , X – вычисленная величина параметра, X_0 – требуемая величина параметра. Погрешность вычислялась по следующим параметрам:

- пиковые ускорения PGA;
- интенсивность по Ариасу I_A ;
- кумулятивная абсолютная скорость CAV;

- плотность сейсмической энергии SED;
- коэффициент гармоничности k .

При генерации воздействия по представленной методике общая погрешность величин характеристик воздействия

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n. \quad (13)$$

должна быть минимальной. То есть генерируется большое число воздействий и сравниваются их погрешности. Воздействие с минимальной общей погрешностью предоставляется пользователю в виде результата.

Как было отмечено выше, такая модель уже предлагалась ранее, однако реализовать её не удавалось из-за отсутствия необходимых ресурсов. Эта проблема была решена с внедрением технологий CUDA и языка программирования OpenCL, позволяющего выполнять вычисления на видеокарте.

В рамках предлагаемой модели легко учитывается ответственность сооружения путем 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 такие, как магнитуду, глубину очага и эпицентральное расстояние, а также преобладающую частоту воздействия. Однако, по нашему мнению, такое воздействие может оказаться неконсервативным: давать нагрузки не в запас прочности.

Предлагаемая модель была проверена сопоставлением спектров ускорений, работы сил пластического деформирования и повреждаемости модельного воздействия и 93 акселерограмм из имеющейся базы данных. Более опасным оказалось лишь по спектру работ сил пластического деформирования Чилийское землетрясение (рис.4–6), которое сейсмологи характеризуют силой выше 9 баллов.

На спектре абсолютных ускорений предлагаемая модель имеет существенно более высокий отклик. Несмотря на то, что на спектре работ сил пластического деформирования такой большой разницы между воздействиями не наблюдается, на рассматриваемой частоте предложенная модель не превосходит по опасности для данного сооружения только Чилийское землетрясение. Спектр повреждаемости заметно уже, чем у других воздействий. Тем не менее, отклик на нужных частотах, а также полка ярко выражены.

Таким образом, предложенная модель обеспечивает все требования, как с точки зрения опасности для данного сооружения, так и с точки зрения соответствия величин характеристик сейсмического воздействия реальным 9-балльным землетрясениям. Это даёт основания полагать, что модель может быть успешно применена в инженерной практике.

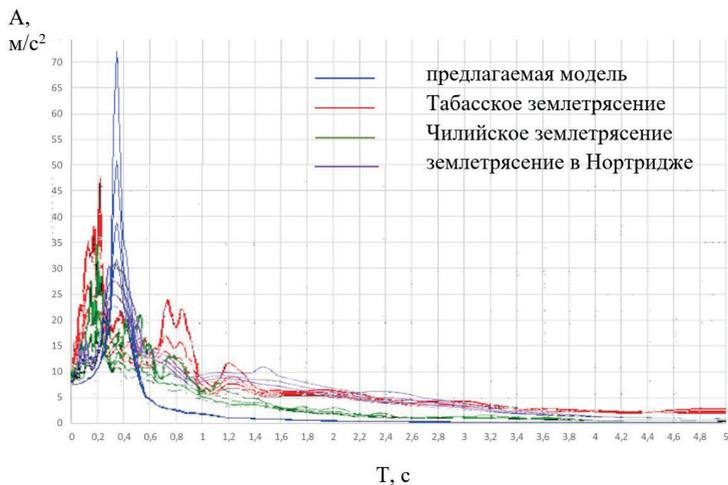


Рисунок 4 — Сопоставление спектров абсолютных ускорений модели и реальных землетрясений

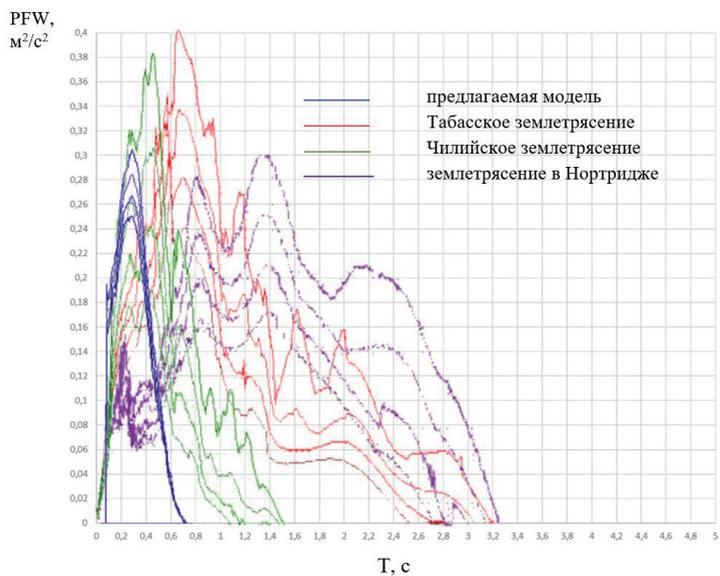


Рисунок 5 — Сопоставление спектров PFW сгенерированного воздействия и реальных землетрясений

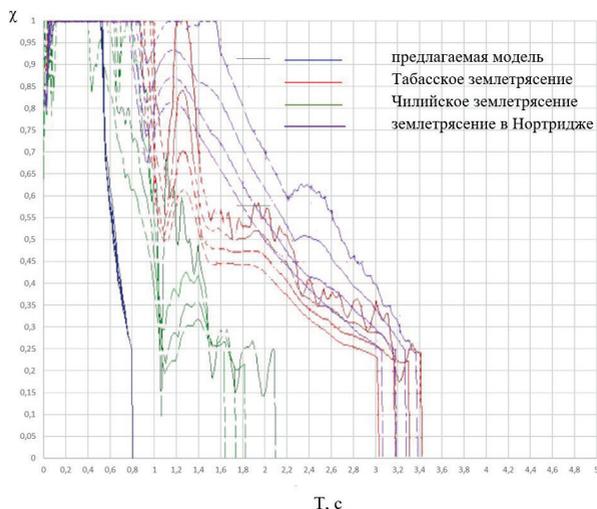


Рисунок 6 — Сопоставление спектров повреждаемости сгенерированного воздействия и реальных землетрясений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время сложилось два подхода к моделированию воздействия: для сооружения и для площадки строительства. Второй подход становится во многих случаях основным, особенно при проектировании ответственных сооружений. Однако при этом нарушаются основные принципы моделирования расчётных воздействий. 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. Для моделирования сейсмического воздействия под сооружение важным является учёт, как свойств сооружения, так и свойств воздействия. В работе выделены кинематические, спектральные и энергетические свойства воздействия.

Кинематические характеристики имеют явную зависимость от спектрального состава воздействия. Среди энергетических характеристик зависимость от преобладающего периода воздействия прослеживалась только у плотности сейсмической энергии SED

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

3. 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 s и текущий период основного тона колебаний сооружения T . Предполагается, что по мере накопления повреждений s линейно возрастает, а период колебаний линейно падает с ростом максимального за историю нагружения перемещения системы u_{\max} . В момент обрушения жёсткость превращается в 0.

4. 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.

5. Для реализации вышеописанных принципов была реализована модель, 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 видеокarte, которая позволила уменьшить время генерации в 10–15 раз.

6. Для учёта уровня воздействия 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 расчётного воздействия.

7. В результате выполненных исследований разработана универсальная модель сейсмического воздействия, ориентированная на расчёт проектируемого сооружения. Универсальность модели состоит в том, что она пригодна для расчёта 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.

III. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи, опубликованные в научных журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ

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. – p. 06021.

Статьи, опубликованные в прочих изданиях

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.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 08.04.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 18.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

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