

*На правах рукописи*



Назарова Шохиста Шукурилла кизи

**Оценка сейсмостойкости сооружений при проектировании сценариев  
накопления повреждений**

Специальность: **2.1.9.** – **Строительная механика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

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:** **Лалин Владимир Владимирович**  
доктор технических наук, профессор, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства (ВШ ПГ и ДС), Инженерно-строительного института (ИСИ), ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого», профессор

**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 диссертации состоится «18» мая 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.295.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дагестанский государственный технический университет» по адресу: 367026, РД, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» <http://www.dstu.ru/>.

Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ <http://vak.ed.gov.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Х.Р. Зайнулабидова

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Значительная часть урбанизированных территорий во всем мире расположена в высокосейсмичных районах. В России сейсмически опасными являются около четверти всей территории. В Узбекистане около 55% территории республики подвержены сильным землетрясениям. В связи с этим, вопросам сейсмостойкого строительства, уделяется большое внимание. В настоящее время сложилась концепция, согласно которой, при сильных землетрясениях допускаются серьезные повреждения застройки, а требования сейсмостойкости должны обеспечить сохранность жизни людей и ценного оборудования. По мере развития теории и практики сейсмостойкого строительства требование к сейсмостойкости сооружений уточняются. В настоящее время в мире складывается подход многоуровневого проектирования. При этом рассматривается минимум 2 уровня обеспечения сейсмостойкости, это - сохранность жизни людей и ценного оборудования при редких и сильных землетрясениях и обеспечение нормальной эксплуатации объектов при частых и относительно слабых землетрясениях. Однако многие специалисты приходят к выводу, что и этих требований недостаточно. В нормах Франции и Италии рассматривается уже 4 предельных состояний. В мировой практике развивается подход проектирования поведения сооружения при землетрясении получившее в литературе обозначение PBD (Performance Based Designing – проектирование базирующаяся на поведении). В перспективе этот подход должен перейти в проектирование сценариев накопления повреждений в сооружении. Такой подход требует развития расчетного обоснования сейсмостойкости сооружений. Именно этому вопросу посвящается настоящая диссертационная работа, что определяет ее актуальность.

**Степень разработанности темы исследования.** Современное состояние теории сейсмостойкости сложилось исторически, собрав по пути своего развития множество ошибок и заблуждений. Основные проблемы развития сейсмостойкого строительства связаны с заданием сейсмического воздействия. Как хорошо известно, пиковое ускорение грунта, или PGA (peak ground acceleration), было определено для 9-балльных землетрясений японским ученым Омори в 1900 г, как  $1 \text{ м/с}^2$ . Это ускорение вошло в первые нормы расчета сейсмостойкости сооружений. При этом расчеты по теории Омори удовлетворительно зарекомендовали себя: здания, запроектированные без антисейсмических мероприятий, разрушались при сильных землетрясениях, а здания, рассчитанные и запроектированные на действие землетрясения с  $\text{PGA}=1 \text{ м/с}^2$  удовлетворительно перенесли эти землетрясения, хотя и имели определенные повреждения. Выдающийся японский ученый Киоджи Сюэхиро в 1923 году впервые замерил ускорение при 9-балльном землетрясении, и оно составило около  $4 \text{ м/с}^2$ . Если это ускорение заложить в используемые в то время расчеты, то здания превратятся в бомбоубежища. Таким образом, в теории сейсмостойкости возникло противоречие между значениями расчетных и фактических ускорений. В начале второй половины прошлого века для смягчения этого противоречия в нормы разных стран вместо расчетного ускорения  $1 \text{ м/с}^2$  (для 9 баллов) вводится произведение  $A_g K_1$ . Здесь  $A$  – ускорение основания в долях ускорения силы тяжести  $g$ , а  $K_1$  – некоторый коэффициент, приводящий

фактическое ускорение к расчетному. В литературе появились различные трактовки такой замены. Поскольку эти трактовки достаточно важны, мы приводим их ниже:

1) Трактовка, наиболее четко высказанная И.И. Гольденблатом, исходит из того, что мы производим расчет на некоторое слабое землетрясение. Ветровые, волновые, ледовые и другие нагрузки, принимаемые в расчет, имеют повторяемость раз в 100-300 лет. Поэтому нет смысла учитывать сейсмические воздействия с большей повторяемостью. Сильные землетрясения с повторяемостью раз в 1000-5000 лет имеют  $PGA > 4 \text{ м/с}^2$ , но в расчет мы должны вводить более частые события с ускорениями  $PGA = AgK_1$ . Таким образом, коэффициент  $K_1$  это коэффициент перехода от сильного воздействия, имеющего на площадке строительства повторяемость раз в 1000-5000 лет, к относительно слабому воздействию с повторяемостью раз в 100-300 лет. Этот коэффициент не зависит от свойств сооружения, а зависит от сейсмологических условий на площадке строительства.

2) Вторая трактовка принята в Европе и США для актуализации отечественных норм, начиная с 1981 года. Согласно этой трактовке расчет проводится на сильное воздействие, но при этом должны повышаться допустимые нагрузки. Коэффициент  $K_1$  является обратной величиной к коэффициенту повышения нагрузок. Эта величина определяется коэффициентом пластичности  $\mu$ , если трактовать  $K_1$  как отношение предела упругости по смещениям к предельным смещениям сооружения, то  $K_1 = 1/\mu$ . Чаще рассматривают  $K_1$  как отношение соответствующих энергий. Такая оценка получена Ньюмарком

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{2\mu + 1}} \quad (1)$$

Важно, что коэффициент  $K_1$  согласно этой трактовке не зависит от сейсмологических свойств площадки строительства, а полностью зависит от пластических свойств сооружения.

3) Третья трактовка, предложена основоположником линейно-спектрального метода (ЛСМ) в СССР профессором И.Л. Корчинским. Он также исходил из расчета на сильное воздействие. Но в качестве критерия сейсмостойкости рассматривал энергоемкость сооружения. Для разрушения сооружения необходимо совершить работу, а работа определяется не пиковыми значениями ускорений, а средней величиной пика. Тогда коэффициент  $K_1$  представляет собой отношение среднего пикового ускорения к максимальному и не зависит от свойств сооружения.

До конца прошлого века принятие той или иной трактовки не имело значения. Проектировщики работали с объектами массового строительства в средних сейсмологических условиях. 4-5 этажные здания, рассчитанные на упругую работу при ускорениях основания  $K_1 Ag$  при  $K_1 = 0.25$  переносили сильные воздействия с ускорениями  $Ag$  без обрушения. Как отмечал И.И. Голденблат, - «мы усиливали здания так, чтобы они упруго воспринимали ускорения  $K_1 Ag$ . Для этого приходилось закладывать в конструкцию дополнительный бетон и арматуру, при этом мы надеялись, что эти бетон и арматура обеспечат неупругую работу сооружения при редких сильных землетрясениях с повреждениями, но без обрушения. Опыт прошлых землетрясений подтверждал эту надежду».

Застройка новых территорий с высокой повторяемостью сильных воздействий и использование новых конструктивных решений сейсмозащиты привело к необходимости детального учета сформулированных гипотез. Например, сейсмоизолированные здания с фундаментами Ю.Д. Черепинского и А.В. Курзанова упруго работают при ускорениях основания до  $2 \text{ м/с}^2$ , но могут упасть с опор и разрушиться при ускорениях  $3 \text{ м/с}^2$ . Это значит, что коэффициент пластичности у них не 4, как закладывалось в нормы, а всего 1.5.

Разрешить сложившиеся противоречия удалось только в начале этого века, когда был предложен принцип многоуровневого проектирования сейсмостойких конструкций.

**Целью диссертации** является разработка методов оценки сейсмостойкости сооружений при многоуровневом проектировании и построении сценариев накопления повреждений от землетрясений с различной силы и повторяемости.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить **следующие задачи**:

1. Разработать методику оценки уровня расчетной сейсмической нагрузки в зависимости от принятого предельного состояния;
2. Предложить критерии сейсмостойкости для предельных состояний различной повторяемости, прежде всего на действие проектного землетрясения (ПЗ) и максимально-расчетного землетрясения (МРЗ);
3. Усовершенствовать линейно-спектральную методику (ЛСМ) расчета сооружений на воздействие различной повторяемости;
4. Разработать предложения по расчету сооружений на воздействие заданное акселерограммой землетрясения различной силы и повторяемости;
5. Разработать предложения по многоуровневому расчету сооружений с заданными параметрами предельных состояний.

**Объектом исследования** являются методы расчета сейсмостойкости сооружений на воздействия различной силы и повторяемости.

**Предметом исследования** являются методы расчета сейсмостойкости при проектировании сценариев накопления повреждений в зданиях и сооружениях.

**Научная новизна диссертации** состоит в следующем:

- Разработана методика задания расчетного уровня сейсмического воздействия в зависимости от его повторяемости и ситуационной сейсмичности на площадке строительства, и при этом уточнена известная зависимость повторяемости землетрясения от его силы;
- Установлены уровни расчетного сейсмического воздействия для ПЗ и МРЗ для всех возможных вариантов ситуационной сейсмичности по картам ОСР;
- Сформулированы требования сейсмостойкости сооружений при воздействии ПЗ, включающее как требование по обеспечению прочности, так и по требованиям эксплуатационной надежности и психологическому воздействию на людей;
- Представлено обобщение расчетных нормативных формул ЛСМ для их использования при расчете на действие землетрясения различной силы и повторяемости;

- Предложен подход для оценки сейсмостойкости сооружений при действии МРЗ, основанный как на предельных неупругих перемещениях, так и на его энергоемкости;
- Предложена новая спектральная характеристика сейсмического воздействия – спектр повреждаемости сооружения;
- Обоснован переход на проектирование сооружений с заданными параметрами предельных состояний.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования сейсмических колебаний, строительной механики и динамики сооружений. Результаты исследований сопоставлялись с известными результатами расчетов других исследователей.

**Теоретическая значимость диссертации** состоит в разработке расчетных методов, обеспечивающих проектирование сценариев накопления повреждений в сейсмостойких конструкциях.

**Практическая значимость диссертации** обусловлена тем, что она позволяет поэтапное совершенствование нормативной базы сейсмостойкого строительства, первоначально для перехода на двух уровневое проектирование с использованием ПЗ и МРЗ и далее для перехода на многоуровневое проектирование и проектирование сценариев накопления повреждений.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. При проектировании сценариев накопления повреждений для каждого предельного состояния необходимо назначать свой уровень расчетного воздействия, в зависимости от допустимой повторяемости предельного состояния и ситуационной сейсмичности на площадке строительства. При этом понятие целочисленного расчетного балла для расчета сооружения теряет смысл. Базовым для расчетов являются повторяемости принятых предельных состояний, который должен согласовывать собственник объекта;
2. Известная линейная зависимость между логарифмом повторяемости и силой землетрясения в баллах оказывается не вполне корректной. В работе предложены уточненные варианты такой зависимости;
3. При расчете на действие ПЗ основными являются требования обеспечения нормальной эксплуатации сооружения. В большинстве случаев условие прочности несущих элементов выполняются при ПЗ, и на первое место выходит требования работоспособности оборудования и психологического воздействия на людей. Для этого возникает необходимость построения поэтажных спектров ускорений и скоростей и их рассмотрение в различных октавных диапазонах.
4. ЛСМ может выступать в качестве основной методики для оценки сейсмостойкости, но вместо коэффициента  $K_1$  необходимо использовать 2 коэффициента, это  $K_{PЗ}$  (коэффициент расчетного землетрясения) - переводящий пиковое значение PGA к расчетной величине с учетом повторяемости воздействия, и  $K_{ПС}$  (коэффициент предельных состояний) - показывающий во сколько раз может быть превышена упругое смещение

или работа сил пластического деформирования для заданного предельного состояния.

5. При оценке поведения сооружения на действие МРЗ наиболее эффективным представляется использование критерия энергоемкости сооружения, когда оценке подлежит работа сил пластического деформирования или повреждаемости. Для упругопластических систем следует использовать спектр работ сил пластического деформирования, предложенный ранее, а для систем с хрупкой диаграммой разрушения предлагается использовать спектр повреждаемости, предложенной в настоящей работе.
6. Сценарии накопления повреждений на действие сильного землетрясения можно реализовать при использовании конструкций с ЗППС. В этом случае, предельные состояния могут возникать в ограниченном числе известных элементов, для которых можно с высокой точностью задать диаграмму деформирования и которые определяют критерии предельных состояний сооружения в целом.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности ВАК: 2.1.9. – Строительная механика, а именно п. 7 «Теория и методы расчета зданий и сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы, пожары, аварии и так далее)».

**Степень достоверности и апробации результатов.** Достоверность результатов исследований подтверждается использованием апробированных методов динамики сооружений и опытом сейсмостойкого строительства. При обосновании уровня воздействия автор использует известные данные по значениям пиковых ускорений землетрясений, вошедших в действующий ГОСТ 2017 «Землетрясение. Шкала сейсмической интенсивности». Результаты исследований соответствуют данным других авторов, имеющимся по отдельным вопросам, затронутым в диссертации.

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

- Научный семинар с международным участием, посвященный 110-летию со дня рождения О.А. Савинова. Санкт-Петербург, 3-6 февраля 2020г.

- Международная научно-практическая конференция «Проблемы прочности материалов и конструкций в транспортном строительстве», посвященная 175-летию со дня рождения Н.А. Белелюбского, Санкт-Петербург, 18-20.05.2021.

- XXIV межвузовская научно-практическая конференция «Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства», ВИТУ, Санкт-Петербург, 08.04.2021.

- The International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering (autumn season) (CONMECHYDRO 2021 AS), 7-9 September, 2021

- Международная научно-практическая конференция «Железнодорожный транспорт и технологии (Railway Transport and Technologies, RTT- 2021)», Екатеринбург, 24-25 ноября 2021.

- 12th International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition (APMAS 2022), Mugla, Turkey, 13-19 october 2022

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 18 научных работах, в том числе восемь в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК и пять статей в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science. По материалам исследований получен один патент на полезную модель.

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

Диссертационная работа изложена на 120 страницах печатного текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 85 источников, в том числе 21 на иностранном языке. В работе представлено 38 рисунков, 20 таблиц и 38 формул.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, дана оценка научной и практической значимости диссертационной работы.

В первой главе представлен краткий обзор развития теории сейсмостойкости. Рассмотрено развитие многоуровневого проектирования в сейсмостойком строительстве, а также существующие методы расчета сейсмостойкости сооружений при различных уровнях воздействий

Во второй главе проанализирована связь расчетных пиковых ускорений, повторяемости воздействия и сейсмологических условий площадки строительства при проектировании сооружений с заданными параметрами предельных состояний. Введены изменения в методику расчета уровней сейсмического воздействия для сооружений разной степени свободы.

В третьей главе рассмотрены основные особенности расчета сооружений на действие проектного землетрясения по линейно-спектральной теории. Приведены критерии сейсмостойкости при расчете сооружений на действие проектного землетрясения. Отмечено, что для выполнения требований к оборудованию и безопасности людей при ПЗ возникает необходимость построения поэтажных велосиграм и акселерограмм, а также их спектров.

В четвертой главе рассмотрены основные особенности расчета сооружений на действие умеренного и сильного землетрясения по линейно-спектральной теории. Приведен расчет сооружения на действия максимально расчетного землетрясения с использованием расчетной акселерограммы. Рассмотрены расчеты сооружений на действие МРЗ по энергоемкости сооружения с использованием спектров работ сил пластического деформирования. Введено понятие спектра повреждаемости воздействия.

В пятой главе рассмотрена необходимость использования конструкций с заданными параметрами предельных состояний (ЗПС) и отмечено существенное упрощение расчета таких конструкций. В качестве примера рассматриваются сценарии накопления повреждений в морском причале эстакадного типа. Отмечено, что при слабых воздействиях причал работает, как единое целое. А при сильных воздействиях происходят отдельные колебания береговой и морской частей, взаимодействующих силами трения в соединении. При этом сваи не повреждаются, а в качестве повреждения выступает остаточная подвижка во фрикционно-подвижном соединении. После землетрясения подвижки легко устраняются, и причал занимает исходное положение.

В заключении изложены основные итоги выполненного исследования, сделаны предложения о возможных направлениях продолжения исследования.

## **II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

*1. При проектировании сценариев накопления повреждений для каждого предельного состояния необходимо назначать свой уровень расчетного воздействия, в зависимости от допустимой повторяемости предельного состояния и ситуационной сейсмичности на площадке строительства. При этом понятие целочисленного расчетного балла для расчета сооружения теряет смысл. Базовым для расчетов являются повторяемости принятых предельных состояний.*

В настоящее время проектирование ведется по картам сейсмического районирования. Выбор карты, определяет повторяемость расчетного воздействия. Исходя из этой повторяемости можно определить расчетную балльность и расчетное ускорение на площадке. Расчетный балл  $I$  определяется по формуле

$$I = \frac{\text{Log}T - b}{a} \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – константы, характеризующие сейсмическую опасность площадки строительства.

При использовании формулы (1) расчетный балл получается дробным. Величина PGA вычисляется для полученного значения балла по формуле, имеющейся в ГОСТ

$$PGA = 10^{\frac{I-1.89}{2.5}} \quad (2)$$

Таким образом, задание воздействия, так же как и по действующим СП начинается с назначения карты, по которой ведется проектирование. Карта определяет повторяемость расчетного воздействия и представляет собой исходную информацию для многоуровневого проектирования.

Отметим, что изложенный подход существенно уточняет уровень воздействия за счет учета не одной, а всех карт ОСР для рассматриваемой площадки строительства. В таблице 1 приведены значения расчетного балла и PGA для трех регионов с ситуационной сейсмичностью 8-9-9, 8-9-10 и 9-9-10. При проектировании по карте В все три региона имеют по действующим нормам одинаковый уровень сейсмической нагрузки. Учет же полной ситуации о сейсмической опасности изменяет эту нагрузку.

Таким образом, первая задача многоуровневого проектирования – задание расчетного уровня сейсмического воздействия решается достаточно легко.

Как отмечалось в литературе, эти пиковые ускорения можно откорректировать с учетом преобладающего периода воздействия, поскольку шкала балльности построена для периодов в диапазоне 0,3-0,5 сек. Если мы рассчитываем более длиннопериодные сооружения и хотим подобрать длиннопериодные воздействия, то мы должны снижать ускорения в соответствии с преобладающим периодом. Соответствующие поправки даны в диссертации.

Зависимость расчетного балла и PGA от ситуационной сейсмичности

Ситуационная сейсмичность	Повторяемость воздействия, годы	Расчетный балл	PGA
8-9-9	100 лет (ПЗ)	6,401	0,459
	500 лет (УЗ)	7,799	1,685
	1000 лет (МРЗ)	8,401	2,938
8-9-10	100 лет (ПЗ)	6,734	0,626
	500 лет (УЗ)	8,132	2,293
	1000 лет (МРЗ)	8,734	3,989
9-9-10	100 лет (ПЗ)	7,068	0,854
	500 лет (УЗ)	8,465	3,118
	1000 лет (МРЗ)	9,068	5,411

**2. Известная линейная зависимость между логарифмом повторяемости и силой землетрясения в баллах оказывается не вполне корректной. В работе предложены уточненные варианты такой зависимости;**

Формула (1) предполагает линейную связь между силой землетрясения в баллах и повторяемостью воздействия.

$$\text{Log}T(I) = a \cdot I + b \quad (3)$$

где  $T$ - повторяемость землетрясения силой  $I$  баллов,

$a, b$ - константы характеризующие сейсмическую опасность в площадке

К сожалению, использование формулы (3) связано с некоторыми трудностями. Во-первых, у нас имеются районы с одинаковой сейсмичностью по разным картам. Например, Усть-Камчатск имеет ситуационную сейсмичностью  $I_A=10, I_B=10, I_C=10$  для такого района инженеру трудно получить зависимость типа (3). Однако, возникают и более серьезные возражения против использования формулы (3). На рисунке 1 приведены зависимости логарифма повторяемости от силы землетрясения  $I$  для двух районов - с ситуационной сейсмичностью  $I_A=7, I_B=8, I_C=8$  (Тауйск, Магаданская обл.) и  $I_A=8, I_B=8, I_C=10$  (Сусуман, Магаданская обл.). Представляется очевидным, что второй район более опасен для строительства.

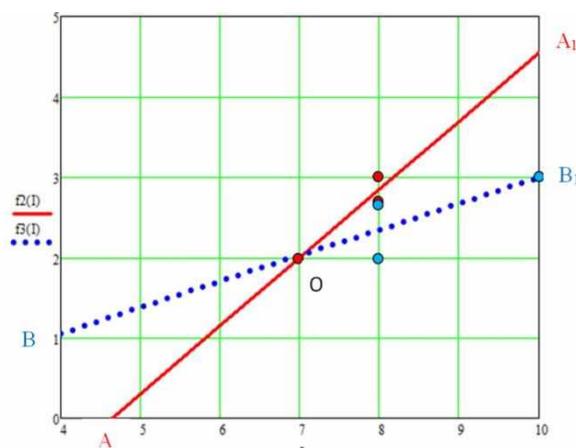


Рисунок 1. Зависимости логарифмов повторяемости для двух районов для территории с ситуационной сейсмичностью  $I_A=7, I_B=8, I_C=8$  и  $I_A=8, I_B=8, I_C=10$  данные по картам ОСР отмечены точками

Более высокая опасность региона Сусуман подтверждается графиком: на участке  $OB_1$  график повторяемости лежит ниже аналогичного графика для региона Тауйск. Однако для слабых воздействий картина оказывается обратной, что противоречит здравому смыслу. В диссертации показано, что использование формулы (3) для прогноза воздействий разной повторяемости также ведет к противоречивым результатам.

Чтобы исключить полученный парадокс авторы пытались заменить зависимость (3) другими похожими зависимостями. При этом учитывалось, что сейсмические данные имеют большой разброс.

Авторы рассмотрели 2 аппроксимацию

$$\text{Log}T(I) = 0.5 \cdot I + b \quad (4)$$

$$\text{Log}T(I) = a \cdot e^{-\alpha I} + b \quad \text{при } \alpha = 0,7 \quad (5)$$

Формула 3 и 4 предполагают, что интервал изменения логарифма повторяемости между баллами не зависит от самих баллов. Формула 5 предполагает, что этот интервал уменьшается. На рисунке 2 приведены аппроксимации  $\text{Log}T(I)$  соответственно при использовании формул (4)-(5), при тех же параметрах, что и на рисунке 1.

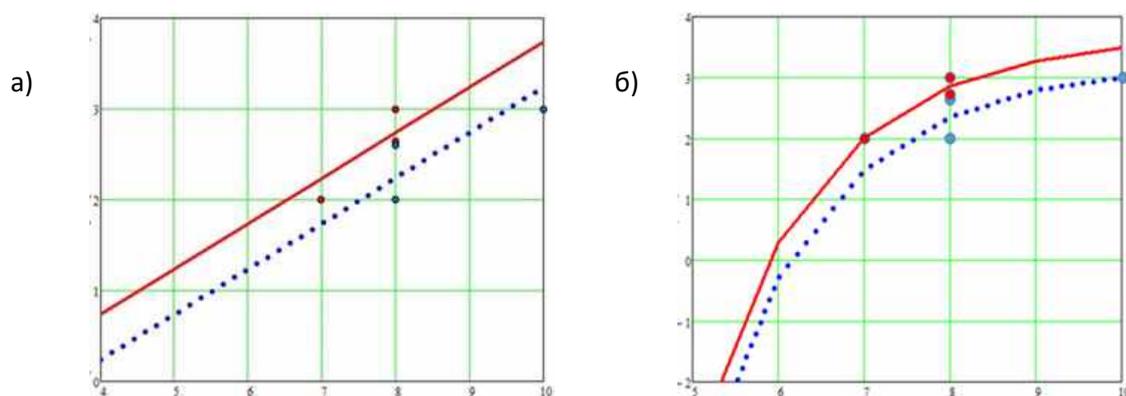


Рисунок 2. Зависимости логарифмов повторяемости для двух районов для территорий ситуационных сейсмичностей  $I_A=7, I_B=8, I_C=8$  и  $I_A=8, I_B=8, I_C=10$ : данные по картам ОСР отмечены точками: а- приведен по формуле (4), б- приведен по формуле (5)

В диссертации рассмотрено использование обеих зависимостей и отмечено, что при расчете по формуле (4) и (5) зависимости расчетного балла от ситуационной сейсмичности и допустимой повторяемости сотрясений дают близкие и разумные с инженерной точки зрения результаты.

Приведенные данные являются основой для многоуровневого проектирования сооружений. Если остановиться на зависимости (4), как более простой, то нетрудно от расчетных баллов перейти к пиковым ускорениям (PGA), используя формулы шкалы балльности (2).

**3. При расчете на действие ПЗ основными являются требования обеспечения нормальной эксплуатации сооружения. В большинстве случаев условие прочности несущих элементов выполняются при ПЗ, и на первое место выходит требования работоспособности оборудования и психологического**

*воздействия на людей. Для этого возникает необходимость построения поэтажных спектров ускорений и скоростей и их рассмотрение в различных октавных диапазонах.*

В процессе исследований проводились расчеты различных сооружений на действие ПЗ. При этом оказалось, что в большинстве случаев прочность элементов конструкции обеспечивается без дополнительного усиления. Однако требование безопасной эксплуатации приводит к необходимости проверки работоспособности оборудования и безопасности людей. Для оценки работы оборудования приходится строить поэтажные акселерограммы и спектры, как это делается при проектировании АЭС.

Ниже приводятся примеры построения ПА для 9-этажного здания при наличии и отсутствии сейсмоизолирующего фундамента. Параметры колебаний зданий приведены в таблице 2. Расчетная схема 9-этажного здания приведена на рис. 3.

В диссертации для анализа было выбрано 5 реальных воздействий, которые отнормированы на  $0.175 \text{ м/с}^2$ . Формально это соответствует силе воздействия 5 баллов по шкале Ф.Ф. Аптикаева.

Расчет сейсмоизолированного здания подтвердил известные результаты исследования систем сейсмоизоляции, отмечающих, что сейсмоизолированные системы не чувствительны к характеристикам грунтового основания и сейсмоизоляция служит фильтром для высокочастотных воздействий.

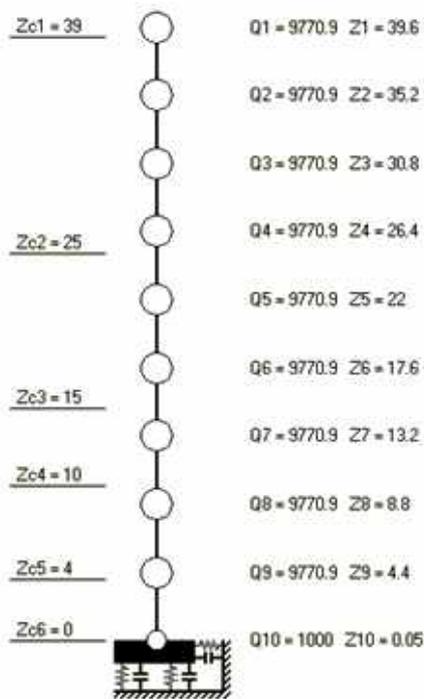


Рисунок 3. Расчётная модель 9-этажного здания

Таблица 2

Параметры колебаний рассматриваемых зданий

Изолированное 9 –этажное здание						
Тип основания	Период $T$ , с			Модальное затухание		
Нескальное $E_0 = 330 \text{ МПа}$	3,938	0,39	0,071	0,295	0,144	0,103

Скальное	3,887	0,249	0,067	0,298	0,108	0,102
Неизолированное 9 –этажное здание						
Нескальное $E_0 = 330$ МПа	0,818	0,141	0,062	0,145	0,141	0,12
Скальное	0,433	0,105	0,051	0,1	0,1	0,1

Однако ситуация кардинально изменилась при рассмотрении колебаний неизолированного здания: оказалось, что на последних этажах здания, ускорения могут в 4 раза превосходить ускорения основания. В примере, представленном на рисунке 4 ускорения основания возросли с  $0.175 \text{ м/с}^2$  до  $0.5 \text{ м/с}^2$ , что соответствует 7 балльным воздействиям.

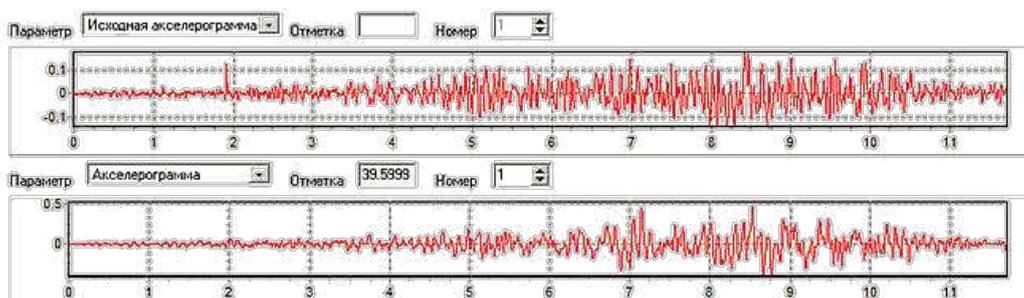


Рисунок 4. Поэтажные акселерограммы для неизолированного сооружения на скальном основании. Высокочастотное воздействие

Для оценки опасности воздействия на людей возникает необходимость работать с поэтажными велосигмами (ПВ). Пример ПВ для 5-этажного здания от акселерограммы Линкольн показан на рисунке 5. По медицинским требованиям уровни ПВ должны быть ограничены. В рассмотренном примере максимум виброскорости составил  $0.053 \text{ м/с}$  или примерно 140 дБ, что превышает допустимый медицинский уровень и может привести к неадекватному поведению людей.

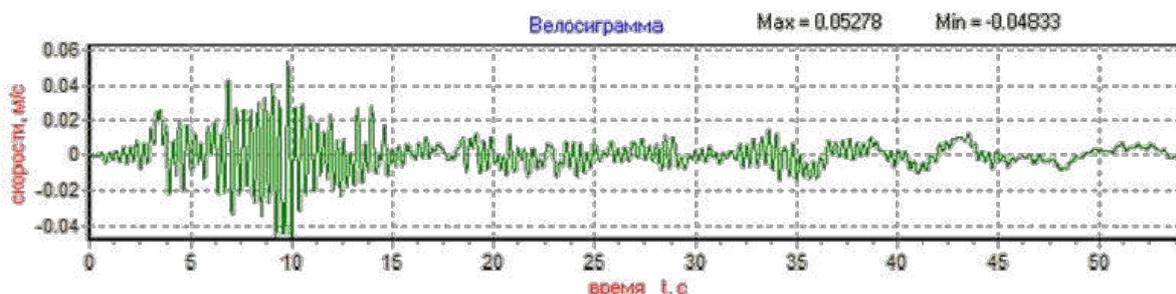


Рисунок 5. Велосигма для 5 этажа неизолированного 5-этажного здания

Таким образом, при расчете сооружения на действие ПЗ возникает необходимость проводить расчёт поэтажных акселерограмм (ПА) и поэтажных спектров (ПС).

Особо следует отметить психологическое воздействие землетрясений на людей. В культовых, зрелищных и других сооружениях с массовым скоплением людей слабый толчок безопасный для сооружения, может вызвать панику у людей

**4. ЛСМ может выступать в качестве основной методики для оценки сейсмостойкости, но вместо коэффициента  $K_1$  необходимо использовать 2 коэффициента, это  $K_{P3}$  (коэффициент расчетного землетрясения), переводящий пиковое значение PGA к расчетной величине с учетом повторяемости воздействия, и  $K_{ПС}$  (коэффициент предельных состояний), показывающий во сколько раз может быть превышена упругое смещение или работа силы пластического деформирования для анализируемого предельного состояния.**

Расчет по ЛСМ может применяться для оценки возникновения различных предельных состояний. При расчете на частые слабые землетрясения (ПЗ) расчет имеет ясный физический смысл и строго обоснован. Однако вместо коэффициента  $K_1$ , который строго говоря в этом случае равен 1, необходимо введение коэффициента, обозначенного нами как  $K_{P3}$  (расчетное землетрясение), который осуществляет переход от PGA при сильном землетрясении к PGA расчетного слабого землетрясения. Этот коэффициент не зависит от свойств сооружения, а зависит только от ситуационной сейсмичности на площадке строительства. При расчете сооружения по ЛСМ на действие сильного землетрясения (МРЗ) расчет является в некотором смысле условным, по существу он является кинематическим, так как прочность элементов конструкции заведомо нарушается. Как известно, в расчетные формулы ЛСМ в этом случае вводится коэффициент  $K_1$ , который показывает во сколько раз предельные неупругие перемещения или энергия пластического деформирования может превосходить упругие характеристики системы. Имеются многочисленные исследования по оценке коэффициента  $K_1$ , но в основном его задание базируется на опыте прошлых землетрясений. Следует отметить, что коэффициент  $K_1$  зависит только от свойств сооружения и не зависит от сейсмологических условий на площадке строительства.

Для расчета на умеренные и сильные землетрясения формулу для расчета сейсмических сил предлагается записать в виде:

$$s_{i,j} = m_i Ag \beta(T_j) K_{\Psi}(\gamma_j) K_{ПС} K_{P3} \quad (6)$$

В формуле (6)  $m_i$  - масса,  $Ag$  - расчетное ускорение и  $\beta(T_j)$  - коэффициент динамичности соответствуют действующим нормам сейсмостойкого строительства. Коэффициент  $K_{\Psi}$  определяется по формуле:

$$K_{\Psi}(\gamma_j) = \sqrt{\frac{\gamma_{эм}}{\gamma_j}} \quad (7)$$

Где  $\gamma_{эм} \approx 0.15$  эталонное значение затухания характерное для 4-ех, 5-ти этажных кирпичных зданий на грунтах 2-й категории.

Принципиальным в формуле (6) является наличие двух коэффициентов. Коэффициент  $K_{P3}$  осуществляет переход от максимального ускорения к расчетному значению, имеющему заданную повторяемость на площадке строительства. Коэффициент  $K_{ПС} \leq 1$  коэффициент предельных состояний, учитывающий возможный выход конструкции за пределы упругости.

*5. При оценке поведения сооружения на действие МРЗ наиболее эффективным представляется использование критерия энергоемкости сооружения, когда оценке подлежит работа сил пластического деформирования или повреждаемости. Для упругопластических систем следует использовать спектр работ сил пластического деформирования, предложенный ранее, а для систем с хрупкой диаграммой разрушения предлагается использовать спектр повреждаемости, предложенной в настоящей работе.*

Для обеспечения сейсмостойкости необходимо, чтобы энергоемкость сооружения превосходила энергию, передаваемую ему от землетрясения. Аналитически эту идею можно представить следующим образом.

Уравнение сейсмических колебаний одномассовой системы имеет вид

$$m\ddot{y} + R(\dot{y}) + cy = -m\ddot{y}_0 \quad (8)$$

Здесь  $m$  – масса системы;  $y$  – смещение системы;  $c$  – жесткость системы,  $\ddot{y}_0$  – ускорение основания;  $R(\dot{y})$  – силы сопротивления, зависящие от скорости.

Если помножить обе части уравнение на  $dy = \dot{y}dt$  и проинтегрировать по времени, то получим

$$m \int_0^{\tau} \ddot{y}\dot{y}dt + \int_0^{\tau} \dot{y}R(\dot{y})dt + c \int_0^{\tau} \dot{y}ydt = -m \int_0^{\tau} \ddot{y}_0 \dot{y}dt \quad (9)$$

Первое и третье слагаемые представляют собой работу сил инерции и упругости. Как показывают расчеты, эти слагаемые малы, и энергоемкость системы определяется вторым интегралом в левой части уравнения (9), а энергия, передаваемая сооружению, будет определяться правой частью уравнения (9). Если второе слагаемое не может уравновесить работу сил инерции от землетрясения на перемещениях сооружения, то сооружение разрушится. Вопрос оценки составляющих уравнения (9) принципиален для оценки сейсмостойкости сооружения.

По мнению автора, решение вопроса возможно при использовании спектров работы сил пластического деформирования, предложенных ранее проф. А.М. Уздином и к.т.н. С. Прокоповичем, значения которых сопоставляются с работой монотонного разрушения. Возникновение предельного состояния при этом не связано непосредственно с PGA, а определяется энергетическими характеристиками воздействия. Наиболее удачной энергетической характеристикой воздействия можно считать спектр работы сил пластического деформирования. Это зависимость работы сил пластического деформирования от начального периода колебаний маятника с диаграммой Прандтля.

На рисунке 6 приведены спектры для двух землетрясений – Табас и Бухарест. Такого рода спектры удобны для оценки сейсмостойкости сооружений при действии МРЗ. В этом случае прочность элементов сооружения заведомо нарушается. Критерием сейсмостойкости становится как раз работа сил пластического деформирования. При оценке сейсмостойкости должна проверяться малоцикловая усталость или прогрессивное разрушение основных несущих

элементов. Для этого работа сил пластического деформирования  $W_{pl}$  сопоставляется с работой монотонного разрушения  $W_0$ .

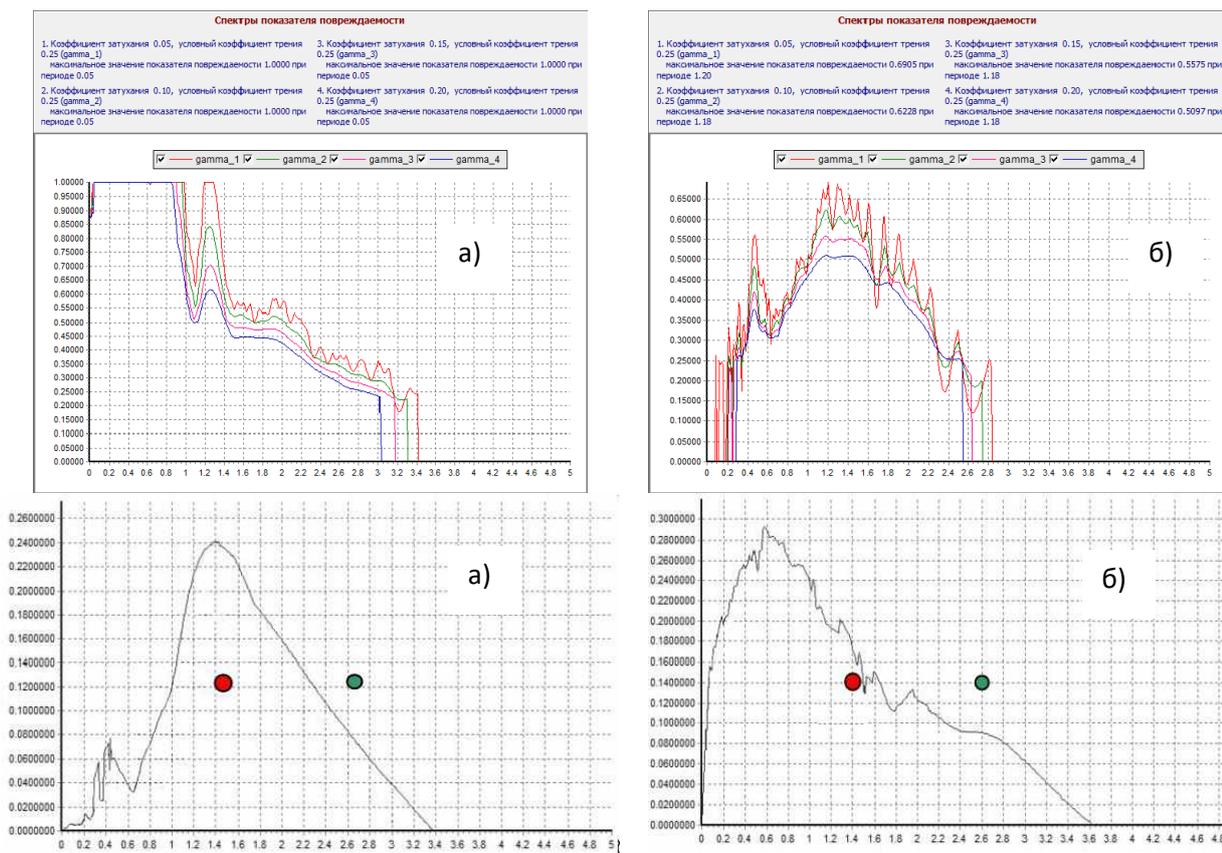


Рисунок 6. Спектры повреждаемости и спектры работы сил пластического деформирования для Табасского землетрясения с пиковым ускорением  $0.863g$ ,  $\gamma=0.1$ (а) и для Бухарестского землетрясения с пиковым ускорением  $0.2g$ ,  $\gamma=0.1$  (б);Красной и зеленой точкой отмечены возможные значения работы монотонного нагружения в аварийном (красная точка) и приемлемом (зеленая точка) случаях

Если  $W_{pl} > W_0$ , возможно разрушение сооружения. Если работу монотонного разрушения обозначить точкой на спектре, то в случае, если точка попадет внутрь спектра, сооружение разрушится. В приведенном примере будут разрушительным сооружения, отмеченного на спектре красной точкой и, наоборот, сохраняются сооружения, отмеченного зеленой точкой.

Величины PGA у Табасского землетрясения составляет почти  $9m/s^2$ , а у Бухарестского – всего  $2m/s^2$ , спектры ускорений у них тоже совершенно не похожи. Однако спектры повреждаемости и спектры работ сил пластического деформирования у них близки. Одна акселерограмма разрушает за счет больших ускорений, вторая за счет сосредоточения всей энергии на одном периоде, опасном для сооружения.

Изложенный подход относится к упругопластическим системам. Это, прежде всего сооружения с металлическим каркасом. Для бетонных и каменных конструкций характерен хрупкий механизм разрушения, обусловленный возникновением в ней трещин и падением жесткости системы. Такого рода сооружения относятся к классу адаптивных систем с деградирующей жесткостью. Для них невозможно построить АЧХ, а их поведение зависит от всей предыдущей

истории нагружения. В работе предложено использовать для анализа таких систем спектр повреждаемости сооружения - это зависимость повреждаемости от начальной собственной частоты колебания системы. Для этого авторами использована простейшая модель нелинейности Кирикова-Аманкулова, в которой свойства системы зависят от максимального за историю нагружения перемещения, т.е. фактически от развития трещины в системе. При этом, жесткость системы линейно падает, а демпфирование системы линейно растет с ростом максимального за историю нагружения перемещения. Если перемещение не превосходит исторического максимума, то свойства системы не меняются.

Для данного типа накопления повреждений восстанавливающая сила описывается уравнением

$$R(u, y) = \frac{r(u)y}{1 + \kappa(u)y^2} \quad (10)$$

где  $y$  – смещение опоры;  $u$  – максимальное за историю нагружения перемещение опоры;  $\kappa$  - параметр нелинейности (повреждаемость).

Жесткость системы постоянна, пока величина смещения  $u$  меньше предела упругости  $u_{упр}$ . Когда предел упругости превышен, жесткость начинает линейно падать с увеличением значения максимального за историю смещения системы. Перемещение, соответствующее нулевой жесткости системы, названо условным перемещением разрушения  $u_{усл}$ . Фактически, перемещение, при котором происходит разрушение сооружения, считается перемещением  $u_{разр}$ , при котором реакция системы достигает максимального значения. Колебания системы с деградирующей жесткостью описываются уравнением:

$$m\ddot{y} + \gamma(u)\sqrt{mr(u)y} + R(u, y) = -m\ddot{y}_0, \quad (11)$$

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

Интегрирование уравнения (11) 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 колебаний системы и коэффициента повреждаемости системы от начального периода ее колебаний  $T$ , т.е. спектры периодов и спектры повреждаемости системы.

В соответствии с рассматриваемой постановкой задачи расчет сейсмостойкости сооружения существенно упрощается. Зная спектр можно нанести на него точку с работой монотонного разрушения, характерную для сооружения, если она попала внутрь спектра, то сооружение разрушится. Что касается спектров повреждаемости, то там видно какие сооружения разрушит землетрясение; для них повреждаемость становится равной единице.

Изложенный подход непосредственно применим к сооружениям, у которых поведение сооружения определяется первой формой колебаний. Для сложных объектов необходим детальный расчет системы, однако, при этом для анализа

поведения фрагментов сооружения сохраняются те же подходы к анализу предельных состояний: расчет элементов сооружения не является силовым, а является кинематическим для адаптивных систем или энергетическим для упругопластических систем.

**6. Сценарии накопления повреждений можно реализовать при использовании конструкции с ЗППС. В этом случае, предельные состояния могут возникать в ограниченном числе известных элементов, для которых можно с высокой точностью задать диаграмму деформирования и которые определяют предельные состояния сооружения в целом.**

В конструкциях ЗППС заранее проектируются слабые места, причем проект должен быть таким, чтобы конструкцию после землетрясения можно было легко восстановить. Характерным примером конструкции с ЗППС может служить причальное сооружение эстакадного типа (рисунок 7), предложенное коллективом с участием автора диссертации и защищенном патентом №2020105802.

Сценарий разрушения типового сооружения, это последовательное разрушение свай в разных рядах, причем первыми выходят из строя короткие береговые сваи и затем, по очереди, все длинные. При этом расчет сооружения относительно не громоздок, т.к. не требуется проверка прочности всех свай после каждого шага интегрирования, а необходимо проверять прочность коротких свай и, если они вышли из строя, перестраивать матрицу жесткости системы. По мере разрушения коротких свай нужно проверять следующий ряд свай. Однако ремонт такого сооружения чрезвычайно сложный. Необходимо в подводной части восстанавливать узлы соединения свай с плитой ростверка.

В связи с этим предлагается новая конструкция – причал разрезается продольным швом, и части соединяются фрикционно-подвижными соединениями (ФПС). Причем, соединения подбираются так, чтобы подвижки в них начинались раньше, чем разрушение свай. Тогда все повреждения после землетрясения будут состоять в том, что возникнут подвижки в соединении, а после землетрясения нужно будет соединение разболтить, и установить болты на место. При этом предполагается, что сваи останутся неповрежденными.

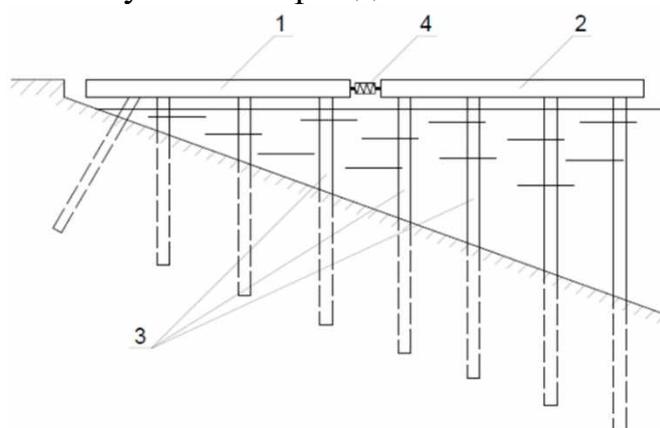


Рисунок 7. Схематичный чертеж причального сооружения эстакадного типа.  
1 - береговая часть, 2 - морская часть, 3-сваи, 4 - упругопластическая связь

На рисунке 8 приведен пример расчета платформы рассматриваемой конструкции на действие землетрясения заданной акселерограммой Эль-Центро. Акселерограмма имеет пиковое ускорение  $9\text{ м/с}^2$ , и приводит к разрушению голов свай. Включение в систему элементов ФПС кардинально меняет ее работу. Как видно из рисунка (рисунок 8) до момента времени  $t=6.35\text{ сек}$  система работает как единое целое, т.е. трение в ФПС не преодолевается. При  $t=6.35\text{ сек}$  происходит проскальзывание в ФПС и движение береговой и морской частей разделяется. При этом сдвиг в ФПС достигает 23мм.

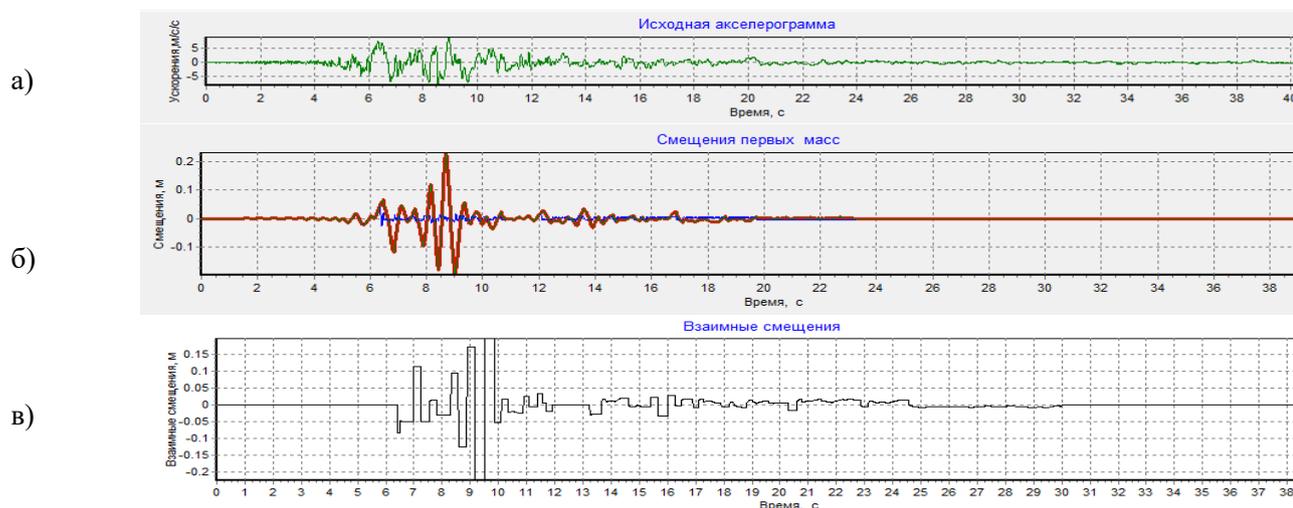


Рисунок 8. Результаты расчета конструкции причального сооружения акселерограммы Lcentro (Эль-Центро) а) исходная акселерограмма Lcentro (Эль-Центро) б) хронограмма смещения морской (красный цвет) и береговой (синий цвет) частей платформы в) сдвиг в ФПС

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. При установлении связи между повторяемостью землетрясений и расчетным баллом на площадке строительства предлагается модифицировать известную формулу  $\text{Log}T(I)=aI+b$ , которая приведет к противоречивым результатам при оценке силы воздействий. Для связи повторяемости и расчетного балла в работе предлагается принять  $a=0.5$  и использовать следующую формулу:

$$\text{Log}T(I)=0.5I+b$$

В работе приведены значения коэффициента  $b$  в зависимости от ситуационной сейсмичности на площадке строительства.

2. Автором модернизировано программное обеспечение на языке C++ в среде Windows, позволяющая быстро определять уровень расчетного воздействия и вероятность его превышения в зависимости от повторяемости воздействия и ситуационной сейсмичности на площадке строительства;

3. На площадках с возможными 9-балльными землетрясениями расчет на ПЗ может, в отдельных случаях, потребовать некоторого усиления несущих конструкций. В большинстве случаев расчет на ПЗ необходим для обеспечения работы оборудования, исключения травмирования или паники людей;

4. Силовой расчет несущих конструкций на действие ПЗ может выполняться по линейно спектральной методике при коэффициенте предельных состояний

(редукции)  $K_1=1$ , но с введением коэффициента  $K_{P3}$  перехода от расчетных ускорений МРЗ к расчетным ускорениям ПЗ;

5. Для выполнения требований к оборудованию и безопасности людей при ПЗ возникает необходимость построения поэтажных акселерограмм и их спектров. Важным может быть также оценка виброскорости в местах нахождения людей, ограничение которой должно быть предусмотрено в нормах оценки сейсмостойкости сооружений;

6. Расчет сооружения на МРЗ в первом приближении следует рассматривать как кинематический, ограничивающий неупругие перемещения сооружения. Расчет сооружения с использованием линейно-спектральной теории предполагает, что ограничения упругих смещений сооружения, которые можно посчитать по ЛСМ, обеспечивает ограничения неупругих перемещений сооружения и энергии его пластических деформаций. Этот факт учитывается в нормах введением коэффициента  $K_1$ , который определяет по существу во сколько раз могут быть превышены упругие деформации. Для объектов массового строительства система расчетных коэффициентов сложилась на основе 100 летнего опыта и анализа последствий прошлых землетрясений. Хотя отдельные коэффициенты нормативного варианта ЛСМ не соответствуют их физическому смыслу, ошибки в коэффициентах в целом сбалансированы, что гарантирует нам возможность проектирования. Для уникальных зданий и сооружений, динамические характеристики которых существенно отличаются от аналогичных характеристик для объектов массового строительства, необходим анализ коэффициента  $K_1$  и в конечном итоге переход на расчеты по акселерограммам землетрясений.

7. Расчет по акселерограмме землетрясения оказывается необходимым при проектировании специальных зданий и сооружений, для которых не отработана система расчетных коэффициентов ЛСМ. Наиболее сложными аспектами расчета по акселерограммам являются задания расчетного сейсмического воздействия и анализ результатов расчетов. При задании сейсмического воздействия следует исходить из известного принципа, принимая воздействия опасным для сооружения в запас прочности и исходя из возможного предельного состояния сооружения. При этом не следует забывать об экономичности принимаемых решений и трудоемкости проводимых расчетов. Само воздействие при этом не должно быть внешне похоже на реальное, но должно иметь характеристики близкие к характеристикам реальных воздействий. Важность тех или иных характеристик должна назначаться исходя из возможного предельного состояния сооружения в результате землетрясения.

8. Предельными состояниями при расчете на действие МРЗ для большинства инженерных объектов является прогрессивное обрушение сооружения или малоцикловая усталость основных несущих конструкций сооружения. В качестве критериев возникновения этих предельных состояний можно рассматривать работу сил пластического деформирования и повреждаемость несущих элементов сооружения. Первый критерий следует применять для расчета упругопластических систем, а второй для систем с хрупкой диаграммой накопления повреждений.

9. Для использования предложенных критериев для оценки сейсмостойкости сооружений в работе использован спектр работ сил пластического деформирования для упругопластических систем, для систем с хрупкой диаграммой разрушения в

работе предложен спектр повреждаемости, использующий понятие коэффициента повреждаемости конструкции. В этом случае жесткость системы падает с ростом максимального за историю перемещения конструкции.

10. Сейсмостойкие конструкции, запроектированные по принципу равнопрочности, характеризуются непредсказуемыми повреждениями при землетрясениях и сложностью восстановления. Кроме того, их расчеты вызывают большие сложности, поскольку при шаговом интегрировании необходимо проверять возможность возникновения предельного состояния для каждого элемента после каждого шага интегрирования.

Для прогнозирования повреждаемости сооружений при землетрясениях и упрощения ликвидации их последствий целесообразно использование конструкции ЗППС. К этому классу сооружений относятся сооружения, в которых зоны повреждения элементов сосредоточены в определенных местах. В результате основные несущие конструкции сооружения после землетрясения остаются неповрежденными. Расчет конструкции ЗППС существенно упрощается, поскольку нелинейный анализ необходим для узкого круга элементов, предельное состояние которых предусмотрено при проектировании.

#### **IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, перечень которых размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:**

1. Назарова Ш.Ш. Задание пиковых ускорений для многоуровневого проектирования сейсмостойких конструкций / Ш.Ш. Назарова, А.М.Уздин // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2019г. Т. 46, №3. – С. 123-136.

2. Назарова Ш.Ш. Конструкция для управления сценарием разрушения причала эстакадного типа / Ш.Ш. Назарова, А.М. Уздин, А.Ю. Симкин, П.В. Ус, С.А. Шульман // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2020г. Т. 48, №5. – С. 29-32.

3. Назарова Ш.Ш. Некоторые особенности оценки сейсмостойкости медицинских комплексов / Ш.Ш. Назарова // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2020г. Т. 48, №5. – С. 37-41.

4. Назарова Ш.Ш. Некоторые принципы нормирования многоуровневого проектирования сооружения с заданными параметрами предельных состояний / Ш.Ш. Назарова // Вестник гражданских инженеров– 2020г. Т.83, №6. – С. 104-116.

5. Назарова Ш.Ш. Выбор шага при оцифровке акселерограмм / А.А. Назаров, Ш.Ш. Назарова, А.М. Уздин, А.М. Масленников // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2022г. №1(56), – С. 21-24.

6. Назарова Ш.Ш. Особенности расчета сооружений на действия слабых частых землетрясений / А.М. Уздин, А.В. Бенин, Ш.Ш. Назарова, О.Б. Сабирова, М.С. Белашов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2022г. Т. 19, №2. – С. 390-404.

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

8. Назарова Ш.Ш. Проблемы использования динамических методов расчета сейсмостойкости сооружений по акселерограммам землетрясений / А.М. Уздин, Х.Н. Мажиев, Л.Н. Смирнова, Г.В. Сорокина, Х.Р. Зайнулабидова, Ш.Ш. Назарова, А.А.Назаров // Строительная механика и расчет сооружений. – 2023г. №6. – С. 54-61.

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

1. Шульман С.А., Уздин А.М., Ус П.В., Симкин А.Ю., Назарова Ш.Ш., Фролова Е.Д., Арещенко Т.С. Патент на полезную модель №2034444 «Верхнее строение причального сооружения». РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2020136450 от 03.11.2020.

**Публикации в изданиях, индексируемых международной системой цитирования (Scopus и Web of science)**

1. Nazarova Sh. Designing Scenarios of Damage Accumulation / A. Benin, Sh. Nazarova, A. Uzdin // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Vol 983. – P. 600-610.

2. Nazarova Sh.Sh. Setting peak ground accelerations for performance-based design of earthquake-resistant constructions / Sh.Sh. Nazarova, A.M. Uzdin // Seismic instruments. 2020. Vol. 56, №2. – P. 225-236

3. Nazarova Sh.Sh. Setting the level of design inputs for the seismic stability structures / A.M Uzdin et al 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2388 012080

4. Nazarova Sh.Sh. Analysis of the behaviour of seismic isolated structure on bearings connected to the structure with a dry friction damper / A.M. Uzdin; I.O. Kuznetsova; M. Frese; Sh.Sh. Nazarova; A.A. Nazarov // The third international scientific conference construction mechanics, hydraulics and water resources engineering (CONMECHYDRO 2021 AS) AIP Conf. Proc. 2023. Vol.2612, Issue 1.

5. Nazarova Sh.Sh. Features of calculating structures for frequent weak earthquakes / M Belashov et al 2023 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1231 012069

**Статьи в других изданиях**

1. Назарова Ш.Ш. Оценка сейсмостойкости при проектировании сценариев накопления повреждений / Ш.Ш. Назарова, А.М. Уздин // Сборник трудов Международной научно-практической конференции "Проблемы прочности материалов и конструкций в транспортном строительстве", посвященная 175-летию со дня рождения Н.А. Белелюбского - СПб: ПГУПС, 2020г. С. 100-109.

2. Назарова Ш.Ш. Проектное землетрясение: обоснование, параметры, особенности применения при расчетах сооружений / А.М. Уздин, Ш.Ш. Назарова, С.В. Прокопович, С.Т. Акбиев // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений – 2019г. Т. 40, №3. – С. 40-45.

3. Назарова Ш.Ш. Актуализация действующих СП с учетом новой шкалы балльности / А.М. Уздин, Никонова Н.В., Ш.Ш. Назарова, Сабирова О.Б. // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений – 2019г. Т. 43, №6. – С. 26-28.

4. Назарова Ш.Ш. Еще раз о задании расчетного сейсмического воздействия / А.М. Уздин, Ш.Ш. Назарова, С.В. Прокопович, Д. Румянцева // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений – 2019г. Т. 43, №6. – С. 39-44.