

Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spb.ru



Системы сейсмоизоляции

В.А. Тарасов^{1*}, М.Ю. Барановский², А.В. Редькин³, Е.А. Соколов⁴, А.С. Степанов⁵

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Информация о статье

УДК

История

Подана в редакцию 13 апреля 2016

Ключевые слова

сейсмоизоляция;
сейсмоизолированные здания и сооружения;
сейсмостойкость;
эластомерные опоры;
пружинные опоры;

АННОТАЦИЯ

Обеспечение сейсмостойкости зданий и сооружений - фактор, который необходимо учитывать, особенно при строительстве в сейсмически-активных районах. В наше время одним из главных подходов к повышению сейсмостойкости является использование различных систем сейсмоизоляции. Не всегда выгодно и рационально повышать сейсмостойкость строительных конструкций или фундаментов под оборудование путём простого повышения прочности. Повышение прочности конструкций ведёт к увеличению их массы и, как следствие, к увеличению инерционных сейсмических нагрузок. В данной статье подробно рассмотрены различные виды сейсмоизоляторов, как наиболее часто используемое решение для достижения необходимой сейсмостойкости как в промышленном, так и в гражданском строительстве.

Содержание

| | | |
|----|--|-----|
| 1. | Введение | 118 |
| 2. | Обзор иностранной и отечественной литературы | 119 |
| 3. | Системы сейсмозащиты зданий и сооружений | 119 |
| 4. | Виды сейсмоизоляторов | 121 |
| 5. | Заключение | 129 |

Контактный автор:

- 1*. +7 (952) 201 0537, vtarasov3766@yandex.ru (Тарасов Владимир Александрович, студент)
2. +7 (921) 407 7354, bm_y@mail.ru (Барановский Михаил Юрьевич, студент)
3. +7 (921) 430 9040, redish132132@yandex.ru (Редькин Андрей Валерьевич, студент)
4. +7 (929) 101 4869, evgeniy.sokolov@nccr.ru (Соколов Евгений Александрович, студент)
5. +7 (921) 920 2600, a.s.stepanov1@gmail.com (Степанов Александр Сергеевич, студент)

1. Введение

Всё чаще при строительстве зданий и сооружений в сейсмически-активных районах применяется особый подход к обеспечению сейсмостойкости, а именно использование различных систем сейсмоизоляции. Все системы сейсмоизоляции можно разделить на общие и местные. Под общей сейсмоизоляцией понимается полное отделение всех конструкций здания или сооружения от основания. Схематично данный вид сейсмоизоляции показан на рисунке 2. Под местной сейсмоизоляцией понимается изоляция лишь некоторых конструкций, таких, например, как фундамент оборудования. Местная сейсмоизоляция широко распространена в промышленном строительстве по той причине, что обычно большие по размерам промышленные здания оказываются очень дорого и нерационально изолировать полностью. В некоторых сооружениях при сейсмическом воздействии возможно и экономически целесообразно допустить частичное повреждение части строительных конструкций, например ограждающих, но не допустить при этом повреждения и выхода из строя дорогостоящего оборудования. В данных случаях от сейсмического воздействия изолируют только оборудование, чтобы при землетрясении оно не разрушилось под действием сейсмических инерционных сил.

Существует несколько различных систем сейсмозащиты зданий, наиболее распространённой является **сейсмоизоляция**. Сам термин сейсмоизоляция обозначает снижение сейсмического воздействия на здания и сооружения, их части и оборудование путём введения в конструкции зданий и сооружений специальных конструктивных элементов, именуемых сейсмоизоляторами. Основной принцип действия данного способа повышения сейсмостойкости описан ниже. На рисунке 1 показана деформированная схема неизолированного здания при сейсмическом воздействии.

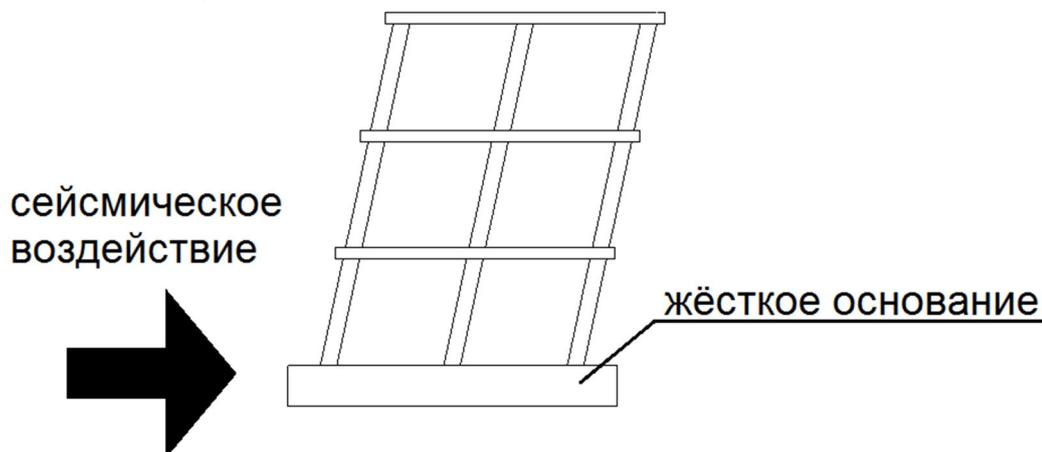


Рисунок 1. Деформированная схема неизолированного здания при сейсмическом воздействии

При использовании сейсмоизоляции, сейсмоизоляторы устанавливаются между конструкциями здания и жёстким основанием, тем самым изменяя собственные частоты здания в целом, а значит и значения сейсмических нагрузок. На рисунке 2 изображена деформированная схема изолированного здания при сейсмическом воздействии. Видно, что благодаря большей податливости в нижней части перемещения здания, в целом возрастают, а значит уменьшаются ускорения масс, и как следствие значения сейсмических инерционных сил становятся ниже.

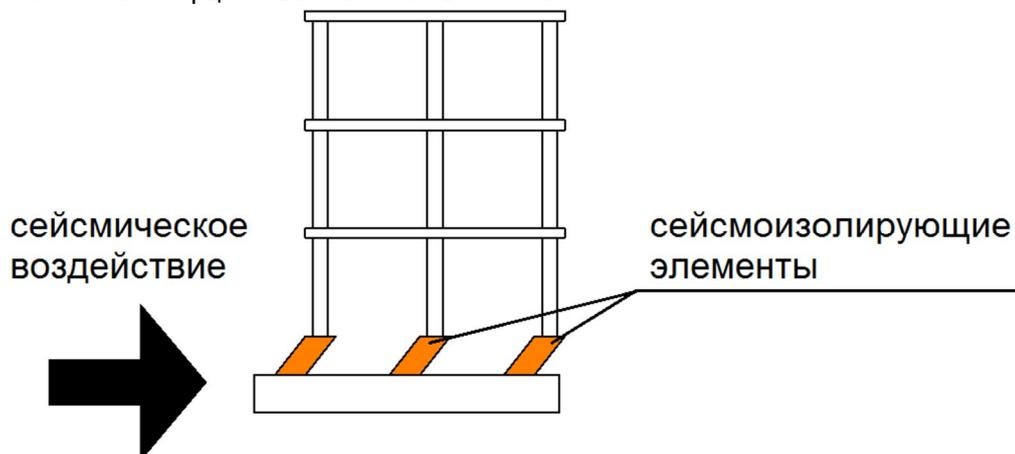


Рисунок 2. Деформированная схема изолированного здания при сейсмическом воздействии

2. Обзор иностранной и отечественной литературы

Вопросам сейсмоизоляции посвящено большое количество отечественных и зарубежных книг. В России практическими вопросами сейсмоизоляции активно начали заниматься в начале 70-х годов XX века в ЦНИИСКе, под руководством Айзенберга Я.М. [3,4]. Было проведено большое количество экспериментальных и теоретических исследований [1]. В конце 70-х годов 20 века началось первое массовое строительство зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции в виде включающихся и выключающихся связей при строительстве трассы БАМ. Город железнодорожников (82 здания) был застроен сейсмоизолированными зданиями на базе крупнопанельной серии 122. Это был первый в мире опыт по применению такой системы сейсмозащиты в жилых домах [100]. Россия занимает одно из лидирующих мест в мире по количеству построенных сооружений с различными системами сейсмоизоляции (более 600 объектов).

Изучение и разработка различных вариантов сейсмоизоляции конструкций неразрывно связано с развитием динамических расчётов (в частности сейсмических) [5-6,8-9,11-14,19-20,33-39], развитием различных способов математического моделирования в расчётах сооружений [2,7,15,21-25], совершенствованием теорий взаимодействия сооружение-основание, методики расчётов грунтов [16-18,26-29,40-45] и многим другим [56-57].

Среди отечественных и мировых деятелей науки по направлению сейсмических расчётов конструкций следует отметить таких ученых, как Айзенберг Я.М.[1], Бирбраер А.Н.[5-9], Гольденблат И.И.[11], Барштейн М.Ф.[13], Коронев Б.Г.[13-14], Рабинович И.М.[14], Константинов И.А.[20], Ньюмарк Н.[29], Розенблат Э.[29], Тимошенко С.Л. [53-55], Шульман С.Т. [45,58-59].

Зарубежная литература по теме данной статьи представлена широким спектром публикаций [60-129].

В Приложении №2 Приказа от 11 июня 2013 года № 249 Министерства регионального развития РФ: "Об утверждении планов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Министерства регионального развития РФ на 2013 год и плановый период 2014-2015 годов" под № 53 была запланирована разработка свода правил: "Здания сейсмоизолированные. Правила проектирования." Проект данного СП был подготовлен и представлен Центром исследований сейсмостойкости сооружений ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко ОАО "НИЦ"Строительство" в соответствии с техническим заданием. Проект СП был разработан впервые и явился новым документом [100]. На время написания статьи - апрель 2016 года данный свод правил не был утверждён и в силу не вступил.

Данный свод правил разрабатывается в дополнение к существующим, актуализирующимся редакциям нормативных документов, таких как [31-32,46-50].

3. Системы сейсмозащиты зданий и сооружений

Системы активной сейсмозащиты (АСЗ) зданий и сооружений разрабатываются как альтернативный подход к обеспечению сейсмостойкости конструкций и оборудования. В отличие от подхода простого повышения несущей способности конструкций, АСЗ снижает инерционные сейсмические нагрузки.

Активная сейсмоизоляция делится на общую и местную. Общая АСЗ подразумевает под собой полную сейсмоизоляцию здания - здание изолируется от основания полностью. Под местной АСЗ понимается защита отдельных конструкций или оборудования внутри здания или сооружения, без полной сейсмоизоляции здания в целом.

Чёткого и однозначного ответа на вопрос использование какого типа сейсмоизоляции в данном конкретном случае наиболее рационально с точки зрения затрат и безопасности возводимых конструкций нет. По этой причине тема, раскрываемая в данной работе, является актуальной.

Различают 4 способа АСЗ:

- сейсмоизоляция;
- адаптивные системы;
- системы с повышенным демпфированием;
- системы с гасителями колебаний.

Под способом **сейсмоизоляции** понимается специальное конструктивное решение фундамента здания или сооружения, снижающее инерционные сейсмические нагрузки на конструкции и оборудование. С древнейших времён производились попытки устройства такого типа сейсмоизоляции - между стенами и фундаментом укладывались мягкие прокладки, прослойки, например, из камыша. В большинстве случаев такие фундаменты устраивались, основываясь больше на интуиции. Научное подтверждение расчётами данная идея получила лишь в 30-х годах 20 века, благодаря появлению спектров отклика.

При повышении несущей способности увеличивается жёсткость здания, а значит, смещаются собственные частоты (с увеличением жёсткости они также увеличиваются). С помощью такого подхода

можно уйти в "зарезонансную" зону спектра. Однако в этом случае при любой частоте здания ускорение должно быть не менее УНП (ускорение нулевого периода).

В том случае, если идти в обратном направлении - не повышать, а понижать собственные частоты конструкции, путём внедрения в её конструктивную схему систем сейсмоизоляции, то при стремлении частоты к нулю, ускорение тоже стремится к нулю. Отсюда вытекает идея спроектировать сейсмоизолированный фундамент таким образом, чтобы как можно сильнее снизить собственную частоту здания или сооружения. Конструкции, защищающие сооружение от сейсмического воздействия по данному принципу, называются системами сейсмоизоляции (ССИ).

В наше время существует много различных вариантов конструкций ССИ, таких как гибкая нижняя часть здания, кинематические, скользящие, подвесные опоры зданий и т.п. Подробное рассмотрение некоторых из них будет представлено ниже.

Не смотря на многообразие конструктивного исполнения ССИ, принцип их работы одинаков: фундамент сооружения делится на 2 части - первая (обычно нижняя) опирается прямо на грунт, а вторая (обычно верхняя) является непосредственно фундаментной плитой здания, сооружений (или его части). Между данными двумя частями устанавливается ССИ, которая обеспечивает понижение частоты колебаний верхней, изолированной части сооружения.

При уменьшении значения собственной частоты конструкции абсолютные ускорения, а значит и инерционные сейсмические нагрузки также уменьшаются, однако при этом увеличиваются перемещения верхней (изолированной) части конструкции по отношению к основанию. При землетрясениях большой интенсивности взаимные перемещения двух частей фундамента может достигать нескольких дециметров. Есть 2 решения данной проблемы: либо фундамент должен быть спроектирован таким образом, чтобы он смог сохранять несущую способность при достаточно больших перемещениях, либо требуется эти перемещения уменьшить или вообще ограничить.

Уменьшение или ограничение перемещений достигается включением в ССИ различного рода демпферов, что увеличивает рассеивание энергии. Однако демпферы несколько повышают жёсткость системы, а значит, немного увеличиваются и инерционные сейсмические нагрузки.

Таким образом, проектирование ССИ сводится к разрешению задачи поиска наиболее оптимального конструктивного решения ССИ. Данное решение должно снизить сейсмические инерционные нагрузки на необходимый уровень с одной стороны, но при этом, с другой стороны, относительные перемещения двух частей фундамента, которые возникнут при сейсмическом воздействии не должны превышать определённого допустимого значения, назначенного исходя их конструктивных, технологических или иных требований, в зависимости от назначения данного сооружения.

Адаптивные системы сейсмозащиты - специальные конструкции в здании, которые непосредственно во время землетрясения меняют динамические характеристики конструкций, в том числе и собственные частоты. Если какие-то из собственных частот здания или сооружения близки к преобладающим частотам происходящего землетрясения, то благодаря работе адаптивных систем эти частоты меняются и "уходят" из зоны преобладающих частот землетрясения, исключая тем самым возникновение резонанса, и как следствие значительных разрушений. Данные системы сейсмозащиты начали разрабатываться в СССР с начала 60-х годов 20 века.

Адаптивные системы сейсмозащиты конструктивно могут быть представлены двумя типами связей: выключающимися связями и включающимися связями.

Выключающиеся связи представляют собой конструктивные элементы (обычно раскосы, панели и т.д.) малой жёсткости, которые при землетрясении разрушаются. При их отсутствии конструкция становится менее жёсткая, а значит собственные частоты уменьшаются. При кажущейся простоте и удобстве устройства таких связей у них имеются два значительных недостатка. Первый заключается в том, что для безопасной эксплуатации сооружения сразу же после землетрясения разрушенные связи необходимо восстановить, а это является не всегда возможным. Второй недостаток в том, что частотный спектр при землетрясении постоянно меняется с течением времени, а значит новая частота конструкции (с уже выключившимися связями) может в какой-то последующий момент опять оказаться в диапазоне преобладающих частот землетрясения.

Включающиеся связи - это такие связи, которые не участвуют в работе конструкции до начала землетрясения. Включаются в работу эти связи лишь при землетрясении, когда перемещения конструкции достигают определённых, наперёд заданных значений. Данные связи (обычно односторонние) могут быть осуществлены специальными упорами-ограничителями, установленными с зазорами, или, например, провисающими растяжками.

Системы с повышенным демпфированием - это конструкции, в которые были введены специальные элементы, увеличивающие рассеивание энергии. Увеличение диссипации энергии ведёт к уменьшению сейсмических ускорений, а значит и инерционных нагрузок.

В качестве примера можно привести такие элементы как вязкие демпферы, связи, выполненные из материалов, допускающих высокие пластические деформации, фрикционные устройства, в которых рассеивание энергии происходит за счёт сухого трения.

Системы с гасителями колебаний - это конструкции, в состав которых добавлены динамические гасители, ударные гасители или гасители активного типа.

В начале 20-го века был предложен динамический гаситель. Принцип его действия удобнее всего рассказать на примере системы с 1 степенью свободы.

Допустим рассматривается линейный осциллятор с собственной частотой ω , под действием гармонического возмущения с круговой частотой θ , при этом частоты ω и θ различны. Если прикрепить к данной системе вспомогательную динамическую систему (массу на пружинке), причём собственная частота вспомогательной системы $\omega_{\text{вспом}}$ будет равна θ (частоте внешнего воздействия), т.е. прикрепляемая система будет настроена на резонанс с возмущающим воздействием, то колебаться будет только вторичная система, а исходная система (линейный осциллятор с частотой ω) будет находиться в состоянии покоя. Если при прикреплении вспомогательной системы параллельно с пружиной установить демпфер, то она обеспечит не полное отсутствие колебаний исходной системы, но уменьшение её колебаний при настройке вспомогательной системы не только в резонанс, но и в определённом диапазоне частот около резонанса. Прикрепляемая система в данном случае именуется гасителем.

Особенность данных систем заключается в том, что масса вспомогательной системы должна быть соизмерима с массой исходной системы. Это требование продиктовано тем, что при массе гасителя значительно меньшей, чем масса исходной системы, перемещения при колебаниях данного гасителя оказываются настолько большими, что изготовить упругий элемент такого гасителя не представляется возможным. В связи с тем, что обычно масса конструкций, используемых в строительстве достаточно велика, использовать такие системы не эффективно. Основное распространение такого рода гасители колебаний получили в машиностроении. Существуют динамические, ударные и ударного типа гасители.

Главным недостатком систем с гасителями колебаний является конструктивная сложность таких систем и необходимость возможности их настройки исходя из характеристик определённой конструкции и внешнего динамического воздействия.

Применение АСЗ является перспективнейшим направлением обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений, особенно при их возведении в сейсмически-опасных районах. Однако при их использовании можно столкнуться с некоторыми серьёзными проблемами.

Во-первых, большинство АСЗ особо чувствительны к виду сейсмического воздействия. Если при одном частотном составе колебания сейсмоизолированных зданий и сооружений уменьшаются, то при другом колебания конструкций могут не уменьшаться, а увеличиваться. При современном развитии науки о земле с точностью предсказать динамические параметры будущего землетрясения пока не удаётся. Всё это влечёт за собой то, что практически невозможно создать универсальное устройство АСЗ.

Во-вторых, АСЗ - достаточно дороги и это также ограничивает их внедрение.

Несмотря на всё вышесказанное, использование сейсмоизоляции - практически единственное наиболее эффективное решение для обеспечения сейсмостойкости особо ответственных объектов, строящихся в сейсмически-активных районах.

Остановимся подробно на видах доступных на рынке сейсмоизоляторов.

4. Виды сейсмоизоляторов

Как уже говорилось раньше, в связи с возведением зданий и сооружений в сейсмически-опасных районах и повышением требований по надёжности и сейсмостойкости строительных конструкций теоретически возможны следующие варианты достижения необходимого уровня сейсмостойкости:

1. Повышение прочности, жёсткости и устойчивости строительных конструкций и оборудования;
2. Устройство системы сейсмоизоляции для снижения первых (низших) частот колебаний, при увеличении перемещений;
3. Увеличение демпфирования путём введения вязких демпферов и использования специальных поглощающих материалов;
4. Использование динамических гасителей (активных и пассивных).

Рассмотрим подробно устройства, использующиеся для осуществления сейсмостойкости по второму пункту: сейсмоизоляторы. Сейсмоизоляторы бывают эластомерные, пружинные и слайдерные (скользящие опоры фрикционно-подвижного типа).

Эластомерные опоры

Эластомерные опоры являются слоистыми конструкциями и конструктивно состоят из попеременно уложенных друг на друга листов резины и металла. Принципиальная схема эластомерного сейсмоизолятора представлена на рисунке 3.

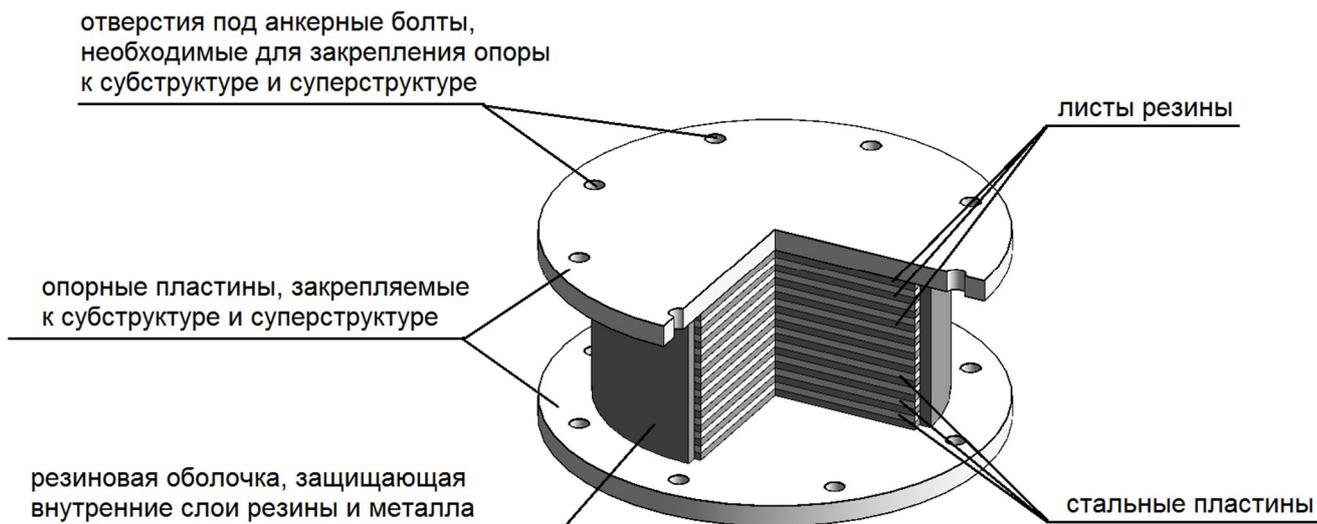


Рисунок 3. Схема эластомерного сейсмоизолятора

Толщина листа резины обычно колеблется в пределах 5.0-20.0 мм, толщина металлического листа 1.5-5.0 мм. Обычно толщины листов и количество слоёв, а так же физико-механические свойства материалов для их изготовления подбираются в зависимости от требований к эластомерным опорам по диссипации энергии, по прочности, по горизонтальной и вертикальной жёсткости, долговечности и по другим эксплуатационным требованиям. Между собой листы резины и металла соединяются путём вулканизации или при помощи особых материалов.

Металлические листы, выполняемые преимущественно из стали служат для предотвращения выпучивания резиновых листов под действием вертикальных сил. Таким образом, они отвечают за вертикальную прочность и жёсткость опор.

Полимерные листы могут выполняться как из натуральной, так и из искусственной резины. Они отвечают за горизонтальную податливость опор, в связи с небольшой сдвиговой жёсткостью резины. Благодаря этой податливости эластомерные опоры изменяют спектр собственных частот сейсмоизолированного здания при горизонтальных колебаниях. При деформации сдвига внутренние силы, возникающие в резине, пытаются вернуть изолированную конструкцию в начальное положение.

Данный вид сейсмоизоляторов может воспринимать многоцикловые усилия растяжения, сжатия, сдвига и кручения. При восприятии собственного веса конструкций и оборудования вертикальные перемещения эластомерной опоры, как правило, не превышают нескольких миллиметров, однако при горизонтальном колебании системы, деформации сдвига могут достигать нескольких десятков сантиметров, смотри рисунок 4.

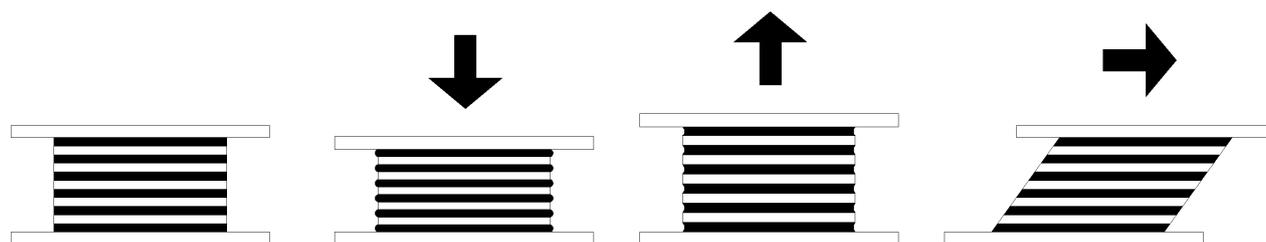


Рисунок 4. Деформирование эластомерной опоры при сжатии, растяжении и сдвиге

В разных конструкциях, при различных возможных характеристиках сейсмического воздействия требуются сейсмоизоляторы с различными характеристиками. Классификация эластомерных опор по диссипативным свойствам представлены в таблице 1.

Таблица 1. Классификация эластомерных опор по диссипативным свойствам

| | Опоры с низкой способностью к диссипации энергии | Опоры с высокой способностью к диссипации энергии |
|---|--|---|
| Коэффициент вязкого демпфирования ξ , в % от критического | Менее 5%, обычно 2-3% | 10-20% |

Продолжение таблицы 1

| | | |
|---|---|---|
| Изготовление резиновых пластин | Натуральные или искусственные пластины, без повышения их демпфирующих свойств | Пластины изготавливаются по специальной технологии, обеспечивающей повышение демпфирующих свойств резины до необходимого значения |
| Чувствительность к скорости и истории нагружения | Малочувствительны | Жёсткостные и диссипативные характеристики зависят от скорости и истории нагружения |
| Поведение при деформациях сдвига | Линейное | Нелинейное |
| Применение в конструкциях | Применяют обычно вместе с особыми демпферами вязкого типа, которые компенсируют низкую диссипацию энергии эластомерных опор | Могут применяться отдельно от демпферов |
| Горизонтальные сдвиговые деформации | До 100% и более | 200-350% |

Эластомерные опоры со свинцовыми сердечниками

Наряду с обычными эластомерными опорами существуют опоры со свинцовыми сердечниками. Они изготавливаются из обычной резины, с невысокими демпфирующими свойствами. Сердечник может помещаться в центр, как один стержень, или быть распределён по периметру опоры. Суммарный диаметр сердечника должен быть 15-33% от внешнего диаметра опоры. Схема такого сейсмоизолятора представлена на рисунке 5.

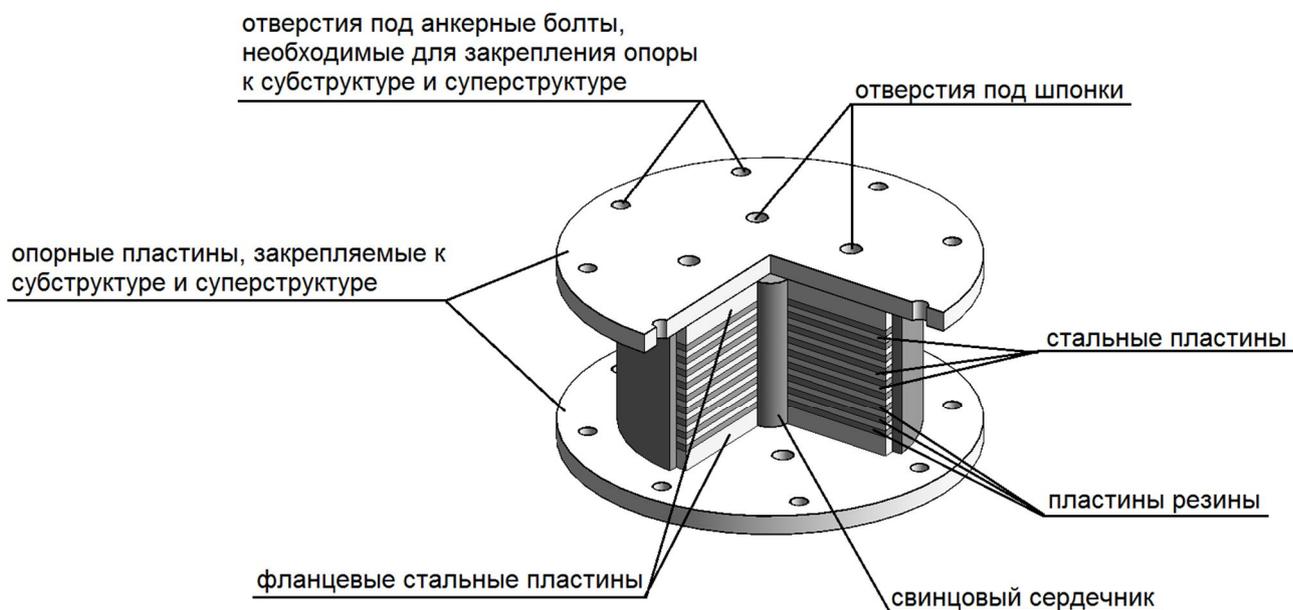


Рисунок 5. Схема эластомерного сейсмоизолятора со свинцовым сердечником

Эластомерная опора со свинцовым сердечником обладает следующими преимуществами:

1. Высокая вертикальная жёсткость за счёт свинцового сердечника;
2. Высокая горизонтальная жёсткость при слабых горизонтальных нагрузках (ветровая нагрузка, землетрясение малой интенсивности);
3. Низкая горизонтальная жёсткость при сильных горизонтальных нагрузках;
4. Высокая способность к диссипации энергии (ξ , в % от критического: 15-35%) [100].

Из вышесказанного видно, что при низких уровнях горизонтальной нагрузки данные сейсмоизоляторы работают как жёсткие элементы и в вертикальном и в горизонтальном направлениях. А при высоких уровнях

горизонтального воздействия они продолжают работать как жёсткие элементы в вертикальном направлении и начинают работать как податливые в горизонтальном. Горизонтальные сдвиговые деформации эластомерных опор со свинцовыми сердечниками могут достигать 400%.

Из всех эластомерных опор наибольшее распространение получили именно опоры со свинцовыми сердечниками.

Плоские скользящие опоры

Полное название данных опор - опоры фрикционно-подвижного типа с плоскими горизонтальными поверхностями скольжения. Принципиальные схемы двух возможных вариантов конструктивного исполнения данных опор представлены на рисунке 6 и рисунке 7.

Данные опоры конструктивно состоят из 2-х жёстких элементов (верхнего и нижнего), соприкасающиеся горизонтальные поверхности которых имеют низкий коэффициент трения скольжения. Понижение коэффициента трения между составными элементами опоры достигается путём покрытия зоны соприкосновения специальными материалами, такие как фторопласт.

Плоские скользящие опоры очень чувствительны и срабатывают даже при несущественном горизонтальном воздействии. Величину порога срабатываемости можно регулировать, варьируя коэффициент трения. Данные опоры имеют относительно большой коэффициент вязкого демпфирования ξ , в % от критического он составляет до 63,7% [100].

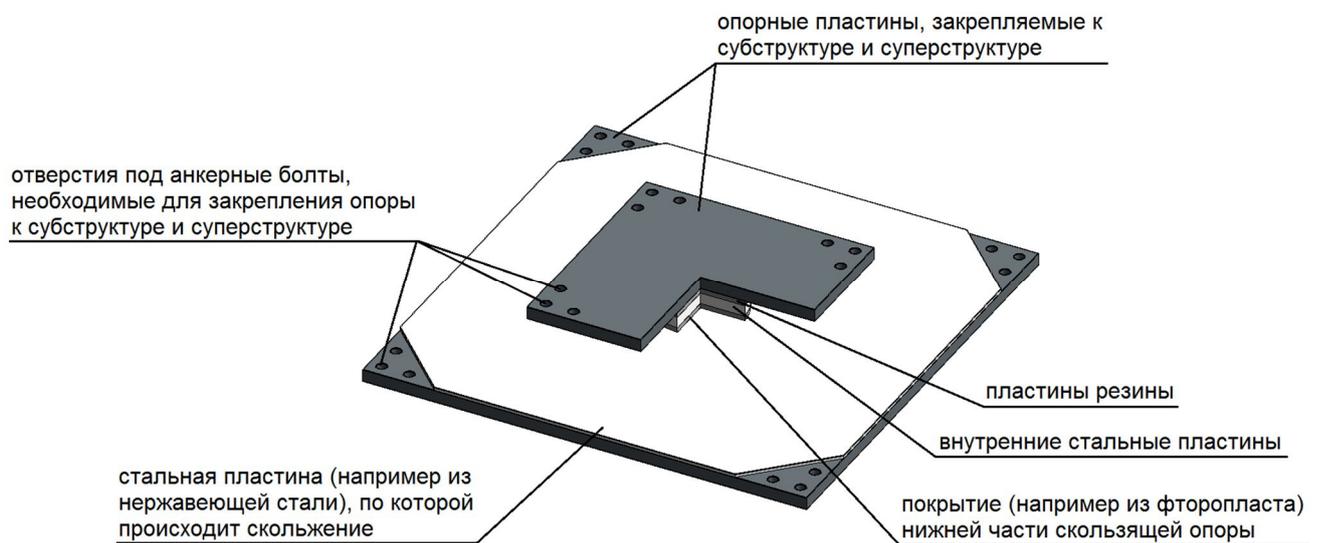


Рисунок 6. Плоская скользящая опора типа 1

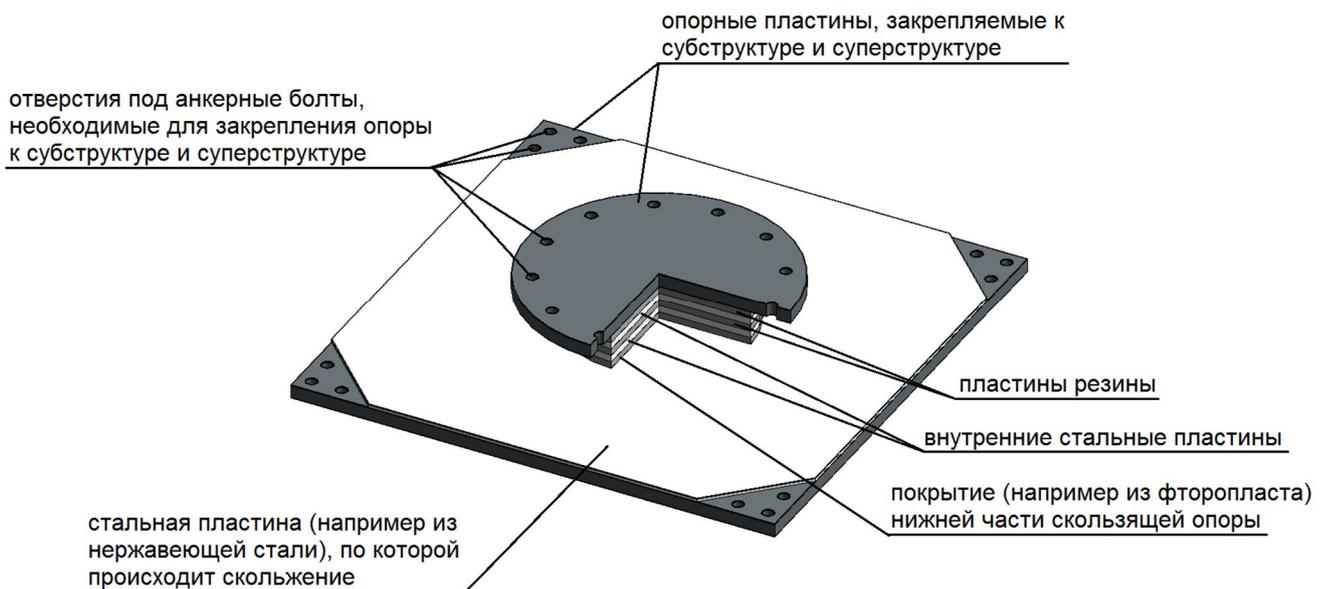


Рисунок 7. Плоская скользящая опора типа 2

Недостаток таких опор заключается в том, что после прохождения землетрясения суперструктура (сейсмоизолированная конструкция) может иметь конечные односторонние перемещения в пределах нижней плиты скольжения даже после прекращения действия инерционных сейсмических нагрузок. Это объясняется отсутствием в опорах данного типа восстанавливающих сил, которые стремились бы вернуть опору в начальное положение. По этой причине скользящие опоры с горизонтальными поверхностями скольжения обычно используются в паре с какими-либо ещё элементами, в которых при горизонтальном смещении возникают восстанавливающие силы, стремящиеся вернуть суперструктуру в начальное положение. Пример такой комбинации плоской скользящей опоры и эластомерной опоры представлен на рисунке 8.

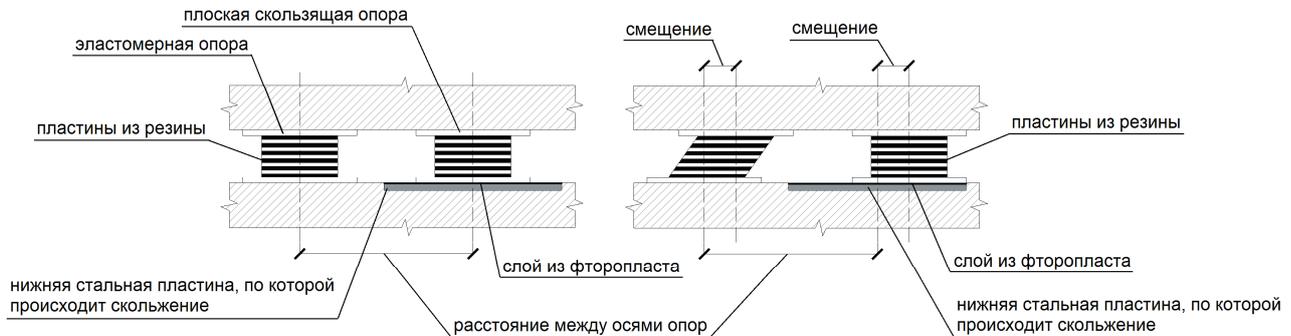


Рисунок 8. Совместное использование плоской скользящей опоры и эластомерной опоры

Маятниковые скользящие опоры

Маятниковыми скользящими опорами называются фрикционно-подвижные опоры со сферическими поверхностями скольжения. Конструктивно эти опоры устроены также, как и плоские скользящие опоры, однако одна или несколько поверхностей скольжения имеет сферическую форму. Название маятниковые эти опоры получили по той причине, что при сейсмическом воздействии расположенная на таких опорах изолированная конструкция совершает движения подобные движениям маятника с трением.

Обязательными составными частями маятниковой скользящей опоры любого типа являются одна или несколько вогнутых сферических поверхностей скольжения, один или несколько ползунов, ограждающие бортики на поверхностях скольжения (они ограничивают горизонтальное перемещение ползунов). Также как и плоские скользящие опоры, маятниковые опоры изготавливаются преимущественно из нержавеющей стали, а поверхности скольжения покрываются специальными материалами, обеспечивающими требуемый коэффициент трения.

В маятниковых опорах всех типов формы ползунов и плит-поверхностей скольжения выбираются таким образом, чтобы при движении ползуна распределение напряжений происходило равномерно, не появлялись концентраторы напряжений и другие нежелательные эффекты. Достоинством данной опоры, по отношению к плоским скользящим опорам является то, что при прекращении сейсмического воздействия опоры возвращаются в начальное положение. Это обусловлено тем, что при сейсмических перемещениях за счёт сферической скользящей поверхности, при отклонении от начального положения ползун, а вместе с ним и изолированная конструкция, приподнимается. Далее горизонтальная составляющая силы тяжести пытается вернуть ползун в положение устойчивого равновесия, т.е. в начальное положение.

Коэффициент вязкого демпфирования ξ , в % от критического для маятниковых скользящих опор обычно составляет от 10 до 30% [100].

На рисунке 9 представлена схема одномаятниковой скользящей опоры. Данная опора состоит из двух горизонтальных металлических пластин, одна из которых имеет сферическую форму, и расположенного между ними сферического шарнирного ползуна.

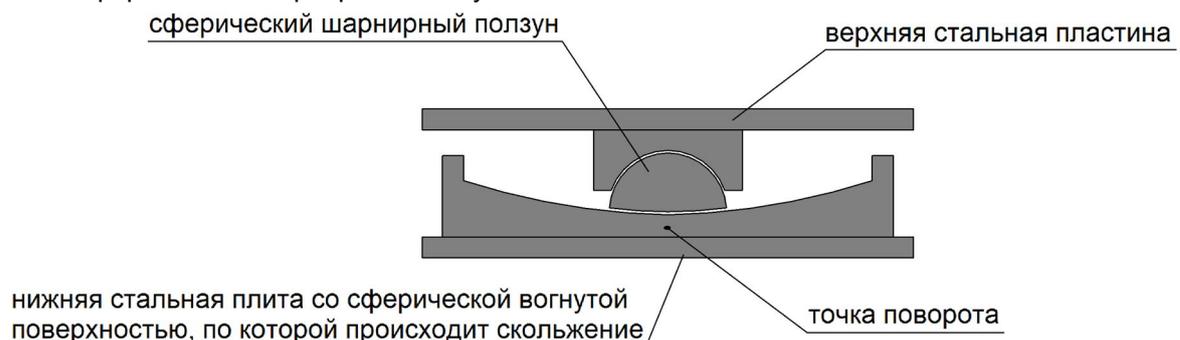


Рисунок 9. Одномаятниковая скользящая опора

Свойства одномаятниковой скользящей опоры зависят от радиуса кривизны сферической поверхности скольжения и коэффициента трения ползуна по ней. Спектр собственных колебаний изолированного объекта в основном зависит от радиуса кривизны поверхности скольжения.

С опор данного вида можно обеспечить увеличение периода собственных колебаний до 3 секунд и более, взаимные горизонтальные перемещения основания и сейсмоизолированного объекта до 1 м и более. Принцип действия одномаятниковой скользящей опоры представлен на рисунке 10.

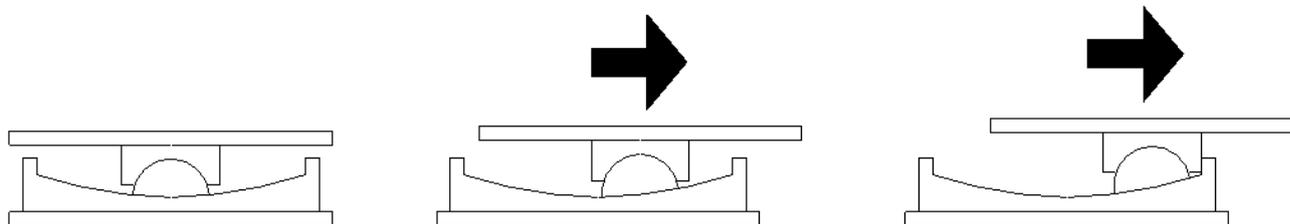


Рисунок 10. Принцип действия одномаятниковой скользящей опоры

На рисунке 11 представлена схема двухмаятниковой скользящей опоры. Эта опора состоит из двух горизонтальных пластин, каждая из которых имеет вогнутую сферическую поверхность скольжения, и расположенных между пластинами двух ползунов.

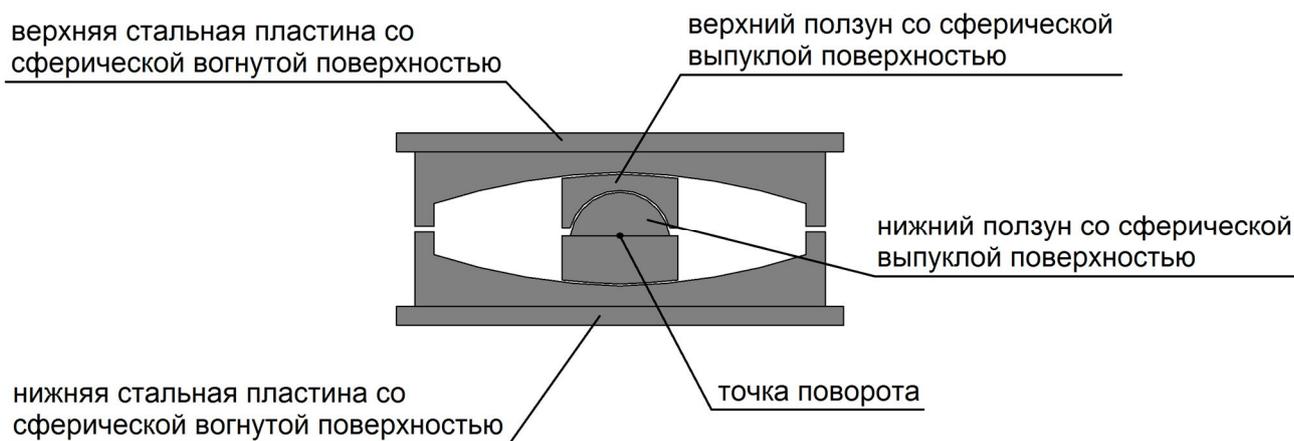


Рисунок 11. Двухмаятниковая скользящая опора

Свойства двухмаятниковой скользящей опоры также зависят от радиусов кривизны сферических поверхностей скольжения и коэффициентов трения. Данные параметры могут быть одинаковыми для верхних пластины и ползуна и для нижних пластины и ползуна, а могут быть различны. Достоинство двухмаятниковых скользящих опор перед одномаятниковыми заключается в том, что они имеют более компактные размеры.

Принцип действия двухмаятниковых скользящих опор представлен на рисунке 12. Благодаря тому, что в этих опорах скольжение может происходить и по нижней и по верхней поверхности, взаимное смещение двухмаятниковых скользящих опор будет в два раза больше, чем у одномаятниковых такого же размера. Возможность варьировать значение радиусов кривизны и коэффициентов трения для верхней сферической поверхности и для нижней позволяет увеличить сейсмоизолирующие свойства этих опор [100].

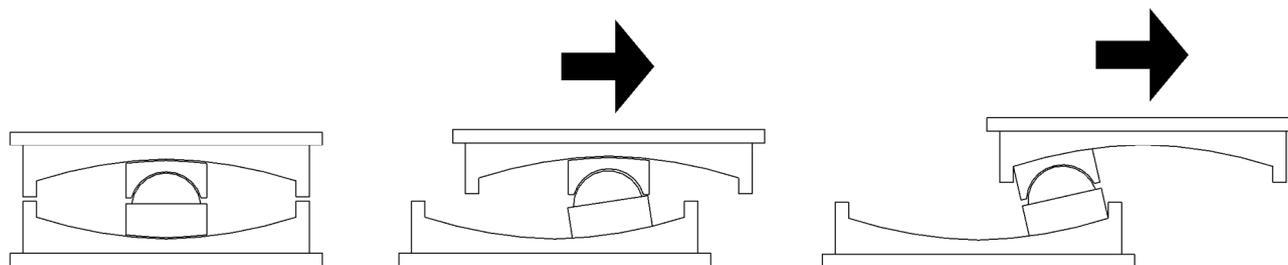


Рисунок 12. Принцип действия двухмаятниковой скользящей опоры

На рисунке 13 представлена трёхмаятниковая скользящая опора, которая имеет 4 сферические поверхности скольжения. В её состав входят две пластины (верхняя и нижняя) со сферическими вогнутыми поверхностями и три ползуна (верхний, внутренний и нижний). Также как и в двухмаятниковой опоре, свойства опоры зависят от радиусов кривизны сферических поверхностей скольжения и коэффициентов трения, которые могут быть одинаковые или разные.

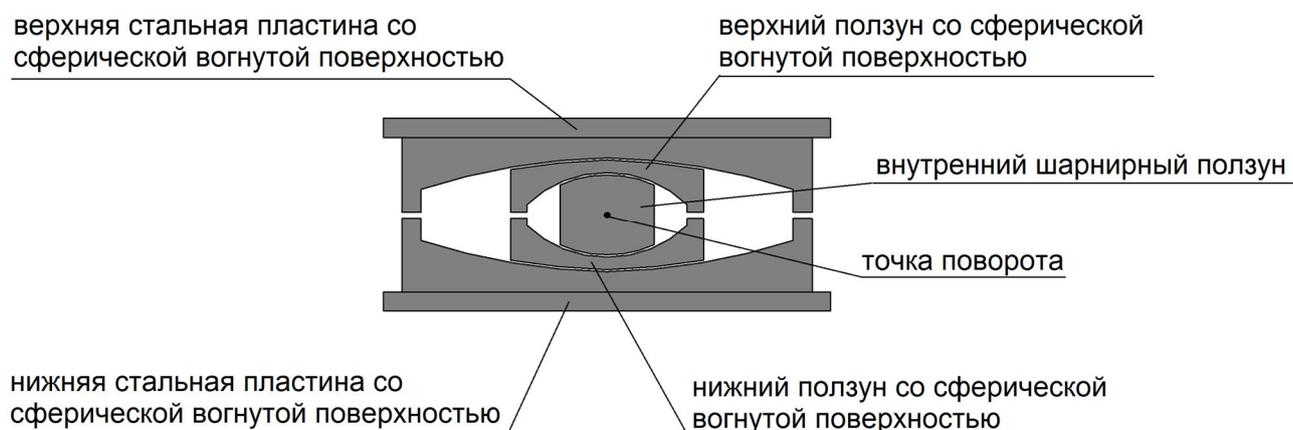


Рисунок 13. Трёхмаятниковая скользящая опора

Трёхмаятниковая скользящая опора работает по принципу трёх маятников, последовательно включающихся в работу в зависимости от частотного состава и интенсивности сейсмической нагрузки. При увеличении перемещений будет расти эффективная длина маятника, т.е. увеличиваться период колебаний изолированной конструкции, а значит, будет повышаться эффективное демпфирование [100].

Принципиальная схема работы такой опоры представлена на рисунке 14.

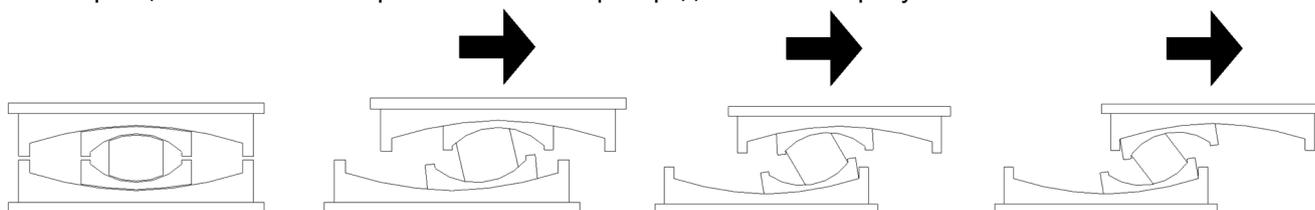


Рисунок 14. Принцип действия трёхмаятниковой скользящей опоры

Меняя сейсмоизолирующие характеристики таких опор путём варьирования радиусов кривизны сферических поверхностей и коэффициентов трения, можно достичь эффективного снижения сейсмических нагрузок на сооружение при очень высокой интенсивности землетрясений.

Пружинные сейсмоизоляторы

Пружинные опоры находят широкое применение в строительстве, особенно промышленных объектов не только как сейсмоизоляторы, но и как виброизоляторы вообще. Конструкция пружинного изолятора состоит из нескольких цилиндрических винтовых стальных пружин сжатия, которые присоединяются к верхней и нижней опорным пластинам. Общий вид такой опоры представлен на рисунке 15.

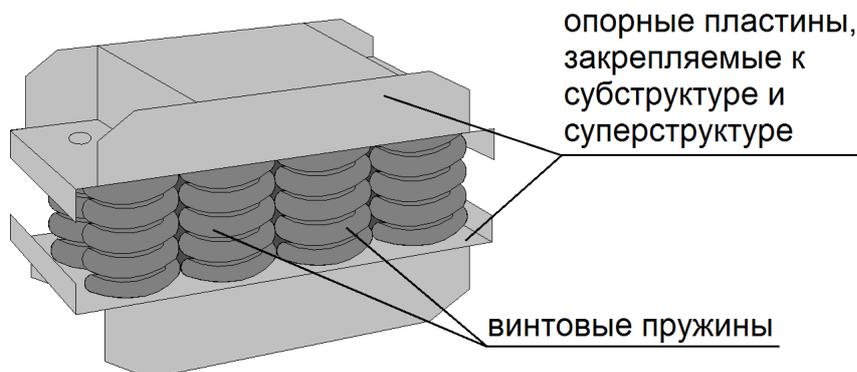


Рисунок 15. Пружинная опора

Важнейшим элементом пружинных опор являются сами пружины (рисунок 16). От их свойств зависит изолирующие свойства опоры в целом. Обычные пружины, находящиеся длительное время под сжимающей нагрузкой или при эксплуатации в зоне высоких температур, начинают терять жёсткость. По этой причине рекомендуется применять предварительно релаксированные пружины, чтобы предупредить снижение их жёсткости.

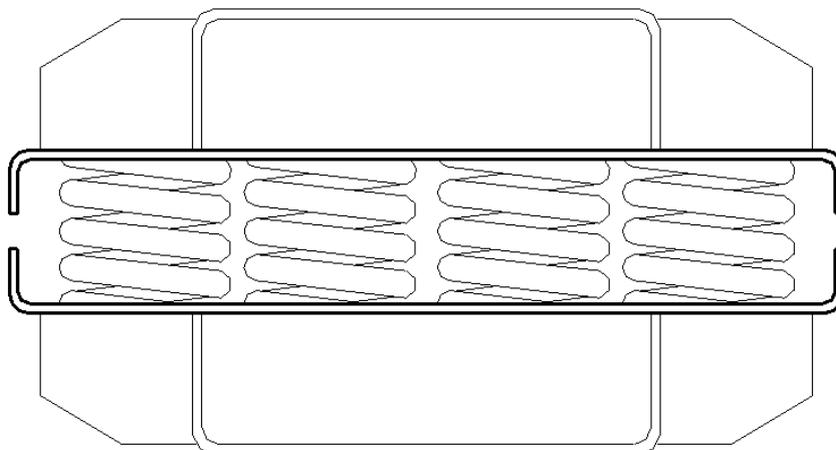


Рисунок 16. Пружинная опора, вид сбоку

Сейсмоизолирующие свойства данных опор можно варьировать в широких пределах, изменяя свойства составляющих её пружин или вообще количество пружин в одной опоре.

Недостатком таких опор является очень низкое демпфирование (демпфирование в металлических материалах, таких как сталь, гораздо ниже чем, например, в резине). Для увеличения демпфирования пружинных опор в их состав вводится демпфер. Пример пружинной опоры с демпфером изображён на рисунке 17.

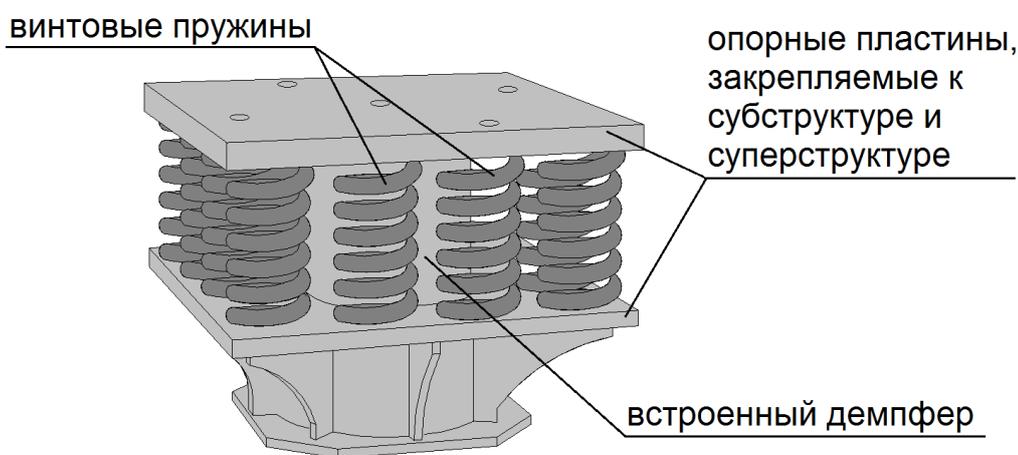


Рисунок 17. Пружинная опора с демпфером

Большим достоинством пружинных опор является возможность уменьшать сейсмические нагрузки на изолированную конструкцию не только лишь при сейсмическом воздействии с горизонтальной преобладающей составляющей, но и с вертикальной. Скользящие опоры являются жёсткими при вертикальном воздействии, а значит, не изолируют сооружение от вертикальных (или близких к ним) сейсмических толчков. Это значит, что использование скользящих опор в регионах, где вертикальная составляющая сейсмических воздействий велика или преобладает над горизонтальной, нельзя. В данных случаях необходимо использовать пружинные опоры.

Однако, стоимость пружинной опоры с демпфером значительно выше стоимости пружинной опоры без него, кроме того, если использовать при сейсмоизоляции большое число пружинных опор с демпферами, то жёсткость конструкции повышается, и опоры перестают создавать изолирующий эффект. По этим двум причинам наиболее рационально использование комбинаций пружинных опор без демпферов и с демпферами. Определение количества и расстановки опор с демпферами и без них является сложной инженерной проблемой, одной из задач, которыми занимаются инженеры-расчётчики.

5. Заключение

Виды сейсмоизоляторов достаточно разнообразны. Их применение является рациональным путём достижения требуемого уровня сейсмостойкости здания или сооружения. По характеристикам ожидаемого сейсмического воздействия на конкретной площадке строительства, а также по конструктивному решению здания и эксплуатационным требованиям, выдвигаемым к нему, можно выбрать тот или иной вид сейсмоизоляции. Однако надо помнить, что если вид используемых сейсмоизоляторов можно выбрать на основании общих предпосылок, то конкретные изолирующие характеристики выбранных сейсмоизоляторов, а также схему их расстановки необходимо определять по результатам специальных динамических расчётов.

Использование сейсмоизоляции позволяет возводить здания даже в районах, где могут происходить землетрясения большой интенсивности. Возможно изолировать как отдельные части сооружения (например, фундаменты под оборудование), так и целые здания (например, школы, гостиницы, жилые дома).

Литература

- [1]. Айзенберг Я.М. и др. Адаптивные системы сейсмической защиты сооружений. М.: Наука. 1978.
- [2]. Батэ К.Ю., Вильсон Е.Л. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М. Стройиздат. 1982.
- [3]. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция - инновационная технология защиты высотных зданий от землетрясений в России и за рубежом // Сб.80 лет ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко. М., 2007. С. 24-32.
- [4]. Смирнов В.И. Современная защита от землетрясений // Высотные здания. 2008. Вып.4. С. 110-115.
- [5]. Бирбраер А.Н., Шульман С.Т. Расчет сейсмостойкости резервуаров с жидкостью, применяемых на АЭС // Изв. ВНИИГ им. Веденева. 1977. Т. 118. С. 91-101.
- [6]. Бирбраер А.Н., Шульман С.Г. Определение сейсмических нагрузок на оборудование АЭС//Изв. ВНИИГ им. Веденева. 1979. Т. 131. С. 63-69.
- [7]. Бирбраер А.Н., Шульман С.Г. Численное решение некоторых задач гидроупругости //Изв. ВНИИГ им. Веденева. 1981. Т. 151. С. 13-18.
- [8]. Бирбраер А.Н., Шульман С.Т. Оценка сейсмостойкости сооружений и оборудования АЭС в рамках нормативной методики // Энергетическое строительство. 1987. № 1. С. 19-22.
- [9]. Бирбраер А.Н., Шульман С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. М: Энергоатомиздат. 1989.
- [10]. Тарасов В.А., Барановский М.Ю., Павлушкина Ю.Е., Мелещенков Л.С., Шакиров Р.М., Имескенов Т.Л., Загидуллина Э.Г. Сравнение результатов сейсмического расчёта по СНиП II-7-81* 1995 года и по СП 14.13330.2014 // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 1. С. 52-73.
- [11]. Гольденблат И.И., Николаенко Н.А. Расчет конструкций на действие сейсмических и импульсивных сил. М: Госстройиздат. 1961.
- [12]. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. М: Стройиздат. 1984.
- [13]. Барштейн М.Ф., Ильичев В.А., Коренев Б.Г., и др. Динамический расчет зданий и сооружений. М: Стройиздат. 1984.
- [14]. Коренев Б.Г., Рабинович И.М. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. М: Стройиздат, 1981.
- [15]. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. М. Машиностроение. 1985.
- [16]. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. М.: Высшая школа, 1985.
- [17]. Кириллов А.Л., Амбриашвили Ю.С. Сейсмостойкость атомных электростанций. М.: Энергоатомиздат. 1985.
- [18]. Кириллов А.Л., Крылов В.Л., Саргсян А.Е. Взаимодействие фундаментов сооружений электростанций с основанием при динамических нагрузках. М: Энергоатомиздат. 1984.
- [19]. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. М.: Стройиздат. 1979.
- [20]. Константинов И.А. Динамика гидротехнических сооружений. Расчет плотин на сейсмические воздействия: Учебное пособие. JL, 1976.
- [21]. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука. 1984.
- [22]. Барановский М.Ю., Тарасов В.А. Стандартизированные ферменные конструкции с уклоном 10% пролётами 24, 30, 36 метров // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 7. С.93-101.
- [23]. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.И: Госэнергоиздат. 1956.
- [24]. Кульмач П.Л. Гидродинамика гидротехнических сооружений (основные плоские задачи). М.: Изд-во АН СССР. 1963.
- [25]. Мартемьянов А.И. Проектирование и строительство зданий и сооружений в сейсмических районах. М.: Стройиздат. 1985.
- [26]. Методические рекомендации по определению динамических свойств грунтов, скальных пород и местных строительных материалов. П 01-72. // ВНИИГ им. Веденева. 1972
- [27]. Налетваридзе Ш.Г. Некоторые задачи инженерной сейсмологии. Тбилиси: Изд-во "Мецниереба". 1973.
- [28]. Николаенко Н.А., Ульянов С.В. Статистическая динамика машиностроительных конструкций. М.: Машиностроение. 1977.

- [29]. Ньюмарк Н., Розенблат Э. Основы сейсмостойкого строительства. М.: Стройиздат. 1980.
- [30]. Ватин Н.И., Синельников А.С. Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №1. С. 47-52.
- [31]. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01. М., 2001.
- [32]. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-15. М., 2015.
- [33]. Окамото Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений. М.: Стройиздат. 1980.
- [34]. Основания реакторных отделений атомных станций. Пин АЭ-5.10 Мииатомэнерго СССР. 1989.
- [35]. Завриев К.С., Назаров А.Г., и др. Основы теории сейсмостойкости зданий и сооружений. М.: Стройиздат. 1970.
- [36]. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. JL.: Машиностроение. 1976.
- [37]. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. М.: Наука. 1991.
- [38]. Поляков С.Л. Сейсмостойкие конструкции зданий. М.: Высшая школа. 1983.
- [39]. Поляков В.С., Килимиик Л.Д., Черкашин А.Л. Современные методы сейсмозащиты зданий. М.: Стройиздат. 1989.
- [40]. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.-01.83) / НИИОСП им. Герсеванова. М.: Стройиздат, 1986.
- [41]. Биргера М.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах, Т. 3. М.: Машиностроение. 1968.
- [42]. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. JL.: Стройиздат. 1964 (I изд.), 1979 (II изд.).
- [43]. Светловский А.Е., Силкин Б.И. Цунами не будет неожиданным. JL.: Гидромегеоиздат. 1973.
- [44]. Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука. 1980.
- [45]. Бирбраер А.Н., Шульман С.Г. Сейсмостойкость атомных электростанций. М.: Информэиерго. 1979.
- [46]. Свод правил. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Издание официальное. ОАО "ЦПП", М., 2014.
- [47]. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений / Минстрой России, М., 2011.
- [48]. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты / Минстрой России, М., 2011.
- [49]. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками/ Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР. 1988.
- [50]. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия / Минстрой России, М., 2011.
- [51]. Петров К.В., Золотарева Е.А., Володин В.В., Ватин Н.И., Жмарин Е.Н. Реконструкция крыш Санкт - Петербурга на основе легких стальных тонкостенных конструкций и антиобледенительной системы // Инженерно-строительный журнал. 2010. No 2. С. 59-64.
- [52]. Уманский А.А. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений (Расчетно-теоретический). М.: Госстройиздат. 1960.
- [53]. Тимошенко С.Л. Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз. 1959.
- [54]. Тимошенко С.Л., Гере Да. Механика материалов. М.: Мир. 1976.
- [55]. Тимошенко С.Л., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение. 1985.
- [56]. Уздин А.М., Сандович Т.А., Самих А.Н.М. Основы теории сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. С.-Петербург: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1993.
- [57]. Шебалин НЛ. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука. 1968. С. 95-111.
- [58]. Шульман СТ. Расчеты сейсмостойкости гидросооружений с учетом влияния водной среды. М.: Энергия. 1976.
- [59]. Шульман СТ., Кауфман БД. Собственные колебания осциллятора, Взаимодействующего с упругой полуплоскостью // Изв. ВНИИГ им. Веденеева. 1978. Т. 122. С. 105-108.
- [60]. Abbo M.B. Elements of the Theory of Free Surface Flows-Computational Hydraulics. // Pitman Publ. Ltd., London. 1980.

- [61]. American National Standard. Earthquake Instrumentation Criteria for Nuclear Power Plants. ANSI N18.5-1974 // Appr. Jan. 9, 1974. American National Standard Inst., Inc.
- [62]. Bahar Y. Optimal digitization of earthquake records // Nucl Engng. and Des. 1977. Vol. 44. P. 263-267.
- [63]. Bath K.G. Finite Element Procedures in Engineering Analysis // Prentice-Hall Inc., 1982.
- [64]. Bath K.G., Wilson E.L. Stability and Accuracy Analysis of Direct Integration Methods // Earthquake Engng. and Struct. Dyn. 1983, Vol. 1. P. 283-291.
- [65]. Benioff F.H. The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness // Bull. Seismol. Soc. of America. 1934. Vol. 24. P. 398.
- [66]. Biggs J.M. Seismic Response Spectra for Equipment Design in Nuclear Power Plants // Proc., 1 Int. Conf. Struct. Mech. in Reactor Technol. Paper K 4/7. Berlin. 1971.
- [67]. Biot M.A. Theory of Vibration of Buildings During Earthquake // Zeitschrift fur Angevante Mathematica und Mechanic. 1934. Band 14, Heft 4.
- [68]. Biot M.A. Analytical and Experimental Methods in Engineering Seismology // Trans., ASCE. 1943. Vol. 108. P. 365.
- [69]. Brigham E.O. The Fast Fourier Transform // Prentice-Hall Inc. 1974.
- [70]. Chan S.P., Cox H.L., Benfield W.A. Transient Analysis of Forced Vibrations of Complex Structural-Mechanical Systems // Journ. Royal Aeronautical Soc. 1962. Vol. 66. P. 457-460.
- [71]. Chu S.L., Amin M., Singh S. Spectral Treatment of Actions of Three Earthquake Components on Structures // Nucl Engng. and Des. 1972. Vol. 21. P. 126-136.
- [72]. Cloud R.L. Structural Mechanics Applied to Pressurized Water Reactor Systems // Nuclear Design. 1978. Vol. 46, No 2.
- [73]. Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis. Regulatory Guide 1.92, Rev. 1 // U.S. Nuclear Regulatory Commission. Feb. 1976.
- [74]. Connor I.I., Brebbia C.A. Finite-Element Techniques for Fluid Flow // Newnes-Butterworths, London-Boston, 1977.
- [75]. Cooley J.W., Tukey J.W. An Algorithm for the Machine Calculations of Complex Fourier Series // Mathematics of Computation, 1965. Vol. 19, No 90.
- [76]. Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants. Regulatory Guide 1.61 // U.S. Atomic Energy Commission. Oct. 1973.
- [77]. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. Regulatory Guide 1.60 // U.S. Nuclear Regulatory Commission. Dec. 1973.
- [78]. Development of Floor Design Response Spectra for Seismic Design of Floor-Supported Equipment or Components. Regulatory Guide 1.122, Rev. 1 //
- [79]. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Dec. 1978.
- [80]. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. V. 2. Generic Requirements*, Chap. 4. Design Basis (Part 2)*. Rev. A, March 1994.
- [81]. Forsythe G.E., Moler C.B. Computer Solution of Linear Algebraic System // Prentice-Hall Inc. 1967.
- [82]. Gupta A.K., Chen D.C. A Simple Method of Combining Modal Responses // Proc 7 Int. Conf. Struct. Mech. in Reactor Technol Paper No. K3/10. Chicago. 1983.
- [83]. Gupta A.K., Chu S.L. Equivalent Modal Response Method for Seismic Design of Structures // Nucl Engng. and Des. 1977. Vol. 44. P. 87-91.
- [84]. Gupta A.K. Approximate Design for Three Earthquake Components //
- [85]. Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1978. Vol. 104 (EM6). P. 1455-1456.
- [86]. Gupta A.K. Rational and Economic Multicomponent Seismic Design of Piping Systems // Journ. Pressure Vessel Technol, ASME. 1978. Dec.
- [87]. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake, Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration // Bull. Seismological Soc. of America. 1942. Vol. 32.
- [88]. Guyan R.J. Reduction of Stiffness and Mass Matrices // AIAA Journ. Vol. 3. P. 380.
- [89]. Hadjian A.H. Seismic Response of Structures by the Response Spectrum Method // Nucl. Engng. and Des. 1981. Vol. 66, No 2. P. 179-201.

- [90]. Hadjian A.H., Ellison B. Decoupling of Secondary Systems for Seismic Analysis I I Proc., ASME Pressure Vessel and Piping Conf. San Antonio. 1984.
- [91]. Hadjian A.H., Hamilton, C.W. Probabilistic Frequency Variations of Concrete Structures // Int. Conf. Struct. Mech. in Reactor Technol Berlin. 1973.
- [92]. Houbolt J.C. A Recurrence-Matrix Solution of Dynamic Response of Elastic Aircraft // Journ. of Aeronautical Sciences., 1950. P. 540-550.
- [93]. Housner J.V. Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers // Bull. Seismological Soc. of America. 1957. Vol. 47, No 1.
- [94]. Housner G.W. Characteristics of Strong-Motion Earthquakes // Bull. Seismological Soc. of America. 1974. Vol. 37, No 1.
- [95]. Irons B. Structural Eigenvalue Problems: Elimination of Unwanted Variables U AIAA Journ. 1965. Vol. 3. P. 961-962.
- [96]. Krutzik N.J., Petrovskiy D., Sachanski S. Dynamic Response of Belene WER-1000 to Seismic Loading Conditions H Preprints, 12 SMiRT-Post-Conf. Seminar. Vienna. 1993, Aug. 23-25.
- [97]. Lin C.W., Losef F. A New Approach to Compute System Response With Multiple Support Response Spectra Input II Nucl. Engng. and Des. 1980. Vol. 60. P. 347-352.
- [98]. Liy S.G., Fagel L.W. Earthquake Interaction by Fast Fourier Transform II Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1971. Vol. 97, No EM4.
- [99]. Lysmer J., Kuhlemeyer ILL. Finite Dynamic Model for Infinite Media // Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1969. Vol. 95, No EM4. P. 859-877.
- [100]. Lysmer J., Waas G. Shear Waves in Plane Infinite Structures // Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1972. Vol. 98, No EM1. P. 85-105.
- [101]. Mondkar Powell G.H. Large Capacity Equation Solver for Structural Analysis // Computers and Structures. 1974. No 4.
- [102]. Бубис А.А., Смирнов В.И. Обсуждение проекта свода правил: «Здания сейсмостойкие и сейсмоизолированные. Правила проектирования» // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. №3
- [103]. Newmark N.M., Hall W. J. Seismic Design Criteria for Nuclear Reactor Facilities // Proc., 4 World Conf. Earthquake Engng., Santiago, Chile. 1969.
- [104]. Newmark N.M., Blume J.A., Kapur K.K. Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants // Journ. Power Div., ASCE. 1973. Vol. 99, No P02. P. 287-303.
- [105]. Nour-Omid B., Clough R.W. Dynamic Analysis of Structures Using Lanczos Coordinates II Earthquake Engng. and Struct. Dyn. 1984. No 12. P. 565-577.
- [106]. Paz M. Dynamic Condensation // AIAA Journ. 1984. Vol. 22, No 5. P. 724-727.
- [107]. Peters K., Schmitz D., Wagner W. The Problem of Resonance in the Evaluation of Floor Response Spectra // Proc., 4 Int. Conf. Struct. Mech. in Reactor Technol. San Francisco. 1977.
- [108]. Rosenbluth E., Elordain J. Response of Linear Systems to Certain Transient Disturbances I I Proc., 4 World Conf. on Earthquake Engng., Santiago, Chile. 1969. Vol. 1.
- [109]. Rosenbluth E., Contreras H. Approximate Design for Multicomponent Earthquakes // Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1977. Vol. 103, No EM5. P. 881-893.
- [110]. Safety Series No 50-SG-D15. Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants. A Safety Guide // International Atomic Energy Agency, Vienna. 1992.
- [111]. Safety Series No 50-SG-S1 (Rev. 1). Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting. A Safety Guide // International Atomic Energy Agency, Vienna. 1991.
- [112]. Sato H., Kamazaki M., Ohor M. An Extensive Study on a Simple Method on Estimating Response Spectrum Based on a Simulated Spectrum // Proc., 4 Int. Conf. on Struct. Mech. in Reactor Technol San Francisco. 1977.
- [113]. Scanlan R.H., Sachs K. Development of Compatible Secondary Spectra Without Time Histories II Proc., 4 Int. Conf. on Struct. Mech. in Reactor Technol San Francisco. 1977.
- [114]. Schmitz D., Peters K. Direct Evaluation of Floor Response Spectra from a Given Ground Response Spectrum // Proc., 4 Int. Conf. on Struct. Mech. in Reactor Technol San Francisco. 1977.

- [115]. Seed H.B., Ugas C, Lysmer J. Site-Dependent Spectra for Earthquake Resistant Design // Bull Seismological Soc. of America. 1976. Vol. 66, No 1. P. 221-243.
- [116]. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Analysis of Safety-Related Nuclear Structures // ASCE Standard, Sept. 1986.
- [117]. Schnabel B., Lysmer J., Seed H.B. SHAKE. A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites // College of Engineering University of California. Berkeley, California. Dec. 1972.
- [118]. Shibata H., et al. Development of Aseismic Design of Piping, Vessels, and Equipment in Nuclear Facilities // Nucl Engng. and Des. 1972. Vol. 22, No 2. P. 247.
- [119]. Singh M.J. Generation of Seismic Floor Spectra // Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. Oct. 1975.
- [120]. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants. NUREG-0800 // U.S. Nuclear Regulatory Commission. June 1987.
- [121]. Stevensou J.D. Structural Damping Values as a Function of Dynamic Response Stress and Deformation Levels // Nucl Engng. and Des. 1980. Vol. 60. P. 211-238.
- [122]. Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities. Manual. (Ed. J.D. Stevenson) // ASCE. 1980.
- [123]. Tbailler H.J. Spectral Analysis of Complex Systems Supported at Several Elevations I I Journ. of Pressure Vessel Technol, ASME, 1976. Vol. 98.
- [124]. Tsai N.C. Transformation of Time Axes of Accelerogramms // Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1969. Vol. 95, No EM2.
- [125]. Tsai N.C. Spectrum-Compatible Motions for Design Purposes // Journ. Engng Mech. Div., ASCE. April 1974.
- [126]. Veletsos A.J.S. Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks // Proc., 5 World Conf on Earthquake Engng. Rome, 1974.
- [127]. Westergaardt H.M. Pressures on Dams during Earthquakes // Proc. ASCE. 1931. Vol- 57, No 9. P. 1303-1318.
- [128]. Wilson E.L., Bayo E.P. Use of Special Ritz Vectors in Dynamic Substructure Analysis II Journ. of Struct. Engng. 1986. Vol. 112, No 8. P. 1944-1954.
- [129]. Wolf J.T. Dynamic Soil-Structure Interaction // N-Y. Prentice-Hall Inc., 1985.
- [130]. Wu R.W., Hassan F.A., Liu L.K. Seismic Response Analysis of Structural System Subjected to Multiple Support Excitation // Nucl Engng. and Des. 1978. Vol. 47.

Seismic isolation systems

V.A. Tarasov^{1*}, M.Yu. Baranovskii², A.V. Redkin³, E.A. Sokolov⁴, A.S. Stepanov⁵,

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

ARTICLE INFO

overview article

doi:

Article history

Received 13 April 2016

Keywords

seismic isolation;
seismic isolated buildings and facilities;
seismic resistance;
elastomeric devices;
spring devices.

ABSTRACT

The factor, which needs to be considered, especially for building in seismic-active areas is the ensuring of aseismic stability for buildings and constructions. Nowadays, one of the main approaches to increase of aseismic stability is use of various systems of aseismic isolation. It is not always advantageous and rational to increase aseismic stability of the building or the foundation under the equipment by simple increasing the strength of materials. Rising of durability of constructions leads to weight gaining and, as a result, rising in inertial seismic loadings. Different types of aseismoisolators are investigated in this article, as the most common decision for reaching necessary aseismic stability in industrial and civil engineering.

^{1*} *Corresponding author:*
+7 (952) 201 0537, vtarasov3766@yandex.ru (Vladimir Tarasov, Student)
² +7 (921) 407 7354, bm_y@mail.ru (Mikhail Baranovskii, Student)
³ +7 (921) 430 9040, redish132132@yandex.ru (Andrey Redkin, Student)
⁴ +7 (929) 101 4869, evgeniy.sokolov@nccr.ru (Evgeniy Sokolov, Student)
⁵ +7 (921) 920 2600, a.s.stepanov1@gmail.com (Alexandr Stepanov, Student)

References

- [1]. Ayzenberg Ya.M. i dr. Adaptivnyye sistemy seismicheskoy zashchity sooruzheniy. M.: Nauka. 1978.
- [2]. Bate K.Yu., Vilson Ye.L. Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov. M. Stroyizdat. 1982.
- [3]. Smirnov V.I. Seismoizolyatsiya - innovatsionnaya tekhnologiya zashchity vysotnykh zdaniy ot zemletryaseniy v Rossii i za rubezhom // Sb.80 let TsNIISK im. V.A.Kucherenko. M., 2007. S. 24-32.
- [4]. Smirnov V.I. Sovremennaya zashchita ot zemletryaseniy // Vysotnyye zdaniya. 2008. Vyp.4. S. 110-115.
- [5]. Birbrayer A.N., Shulman S.T. Raschet seymstoykosti rezervuarov s zhidkostyu, primenyayemykh na AES // Izv. VNIIG im. Vedeneyeva. 1977. T. 118. S. 91-101.
- [6]. Birbrayer A.N., Shulman S.G. Opredeleniye seymicheskikh nagruzok na oborudovaniye AES//Izv. VNIIG im. Vedeneyeva. 1979. T. 131. S. 63-69.
- [7]. Birbrayer A.N., Shulman S.G. Chislennoye resheniye nekotorykh zadach gidrouprugosti //Izv. VNIIG im. Vedeneyeva. 1981. T. 151. S. 13-18.
- [8]. Birbrayer A.N., Shulman S.T. Otsenka seymstoykosti sooruzheniy i oborudovaniya AES v ramkakh normativnoy metodiki // Energeticheskoye stroitelstvo. 1987. № 1. S. 19-22.
- [9]. Birbrayer A.N., Shulman S.G. Prochnost i nadezhnost konstruksiy AES pri osobykh dinamicheskikh vozdeystviyakh. M: Energoatomizdat. 1989.
- [10]. Tarasov V.A., Baranovskiy M.Yu., Pavlushkina Yu.Ye., Meleshchenkov L.S., Shakirov R.M., Imeskenov T.L., Zagidullina E.G. Sravneniye rezultatov seymicheskogo rascheta po SNiP II-7-81* 1995 goda i po SP 14.13330.2014 // Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. 2015. № 1. S. 52-73.
- [11]. Goldenblat I.I., Nikolayenko N.A. Raschet konstruksiy na deystviye seymicheskikh i impulsivnykh sil. M: Gosstroyizdat. 1961.
- [12]. Gorbunov-Posadov M.I., Malikova T.A., Solomin V.I. Raschet konstruksiy na uprugom osnovanii. M: Stroyizdat. 1984.
- [13]. Barshteyn M.F., Ilichev V.A., Korenev B.G., i dr. Dinamicheskii raschet zdaniy i sooruzheniy. M: Stroyizdat. 1984.
- [14]. Korenev B.G., Rabinovich I.M. Dinamicheskii raschet sooruzheniy na spetsialnyye vozdeystviya. M: Stroyizdat, 1981.
- [15]. Zenkevich O., Chang I. Metod konechnykh elementov v teorii sooruzheniy i v mekhanike sploshnykh sred. M. Mashinostroyeniye. 1985.
- [16]. Ivanov P.L. Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. M.: Vysshaya shkola, 1985.
- [17]. Kirillov A.L., Ambriashvili Yu.C. Seymstoykost atomnykh elektrostantsiy. M.: Energoatomizdat. 1985.
- [18]. Kirillov A.L., Krylov V.L., Sargsyan A.Ye. Vzaimodeystviye fundamentov sooruzheniy elektrostantsiy s osnovaniyem pri dinamicheskikh nagruzkakh. M: Energoatomizdat. 1984.
- [19]. Klaf R., Penziyen Dzh. Dinamika sooruzheniy. M.: Stroyizdat. 1979.
- [20]. Konstantinov I.A. Dinamika gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Raschet plotin na seymicheskoye vozdeystviya: Uchebnoye posobiye. JL, 1976.
- [21]. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike. M.: Nauka. 1984.
- [22]. Baranovskiy M.Yu., Tarasov V.A. Standartizirovannyye fermennyye konstruksii s uklonom 10% proletami 24, 30, 36 metrov // Stroitelstv unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. 2014. № 7. S.93-101.
- [23]. Kotelnikov V.A. Teoriya potentsialnoy pomexoustoychivosti. M.JI: Gosenergoizdat. 1956.
- [24]. Kulmach P.L. Gidrodinamika gidrotekhnicheskikh sooruzheniy (osnovnyye ploskiye zadachi). M.: Izd-vo AN SSSR. 1963.
- [25]. Martemyaiov A.I. Proyektirovaniye i stroitelstvo zdaniy i sooruzheniy v seymicheskikh rayonakh. M.: Stroyizdat. 1985.
- [26]. Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu dinamicheskikh svoystv gruntov, skalnykh porod i mestnykh stroitelnykh materialov. P 01-72. // VNIIG im. Vedeneyeva. 1972
- [27]. Naletvaridze Sh.G. Nekotoryye zadachi inzhenernoy seymologii. Tbilisi: Izd-vo "Metsniyereba". 1973.
- [28]. Nikolayenko N.A., Ulyanov S.V. Statisticheskaya dinamika mashinostroitelnykh konstruksiy. M.: Mashinostroyeniye. 1977.
- [29]. Nyumark N., Rozenblat E. Osnovy seymstoykogo stroitelstva. M.: Stroyizdat. 1980.

- [30]. Vatin N.I., Sinelnikov A.S. Bolsheproletnyye nadzemnyye peshekhodnyye perekhody iz legkogo kholodnognutogo stalnogo profilya // Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. 2012. No1. S. 47-52.
- [31]. Normy proyektirovaniya seysmostoykikh atomnykh stantsiy. NP-031-01. M., 2001.
- [32]. Obshchiye polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsiy. NP-001-15. M., 2015.
- [33]. Okamoto Sh. Seysmostoykost inzhenernykh sooruzheniy. M.: Stroyizdat. 1980.
- [34]. Osnovaniya reaktornykh otdeleniy atomnykh stantsiy. PiN AE-5.10 Miiatomenergo SSSR. 1989.
- [35]. Zavriyev K.S., Nazarov A.G., i dr. Osnovy teorii seysmostoykosti zdaniy i sooruzheniy. M.: Stroyizdat. 1970.
- [36]. Panovko Ya.G. Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara. JI.: Mashinostroyeniye. 1976.
- [37]. Panovko Ya.G. Vvedeniye v teoriyu mekhanicheskikh kolebaniy. M.: Nauka. 1991.
- [38]. Polyakov S.L. Seysmostoykiye konstruksii zdaniy. M.: Vysshaya shkola. 1983.
- [39]. Polyakov B.C., Kilimiik L.D., Cherkashin A.L. Sovremennyye metody seysmozashchity zdaniy. M.: Stroyizdat. 1989.
- [40]. Posobiye po proyektirovaniyu osnovaniy zdaniy i sooruzheniy (k SNiP 2.02.-01.83) / NIIOSP im. Gersevanova. M.: Stroyizdat, 1986.
- [41]. Birgera M.A., Panovko Ya.G. Prochnocht, ustoychivost, kolebaniya. Spravochnik v trekh tomakh, T. 3. M.: Mashinostroyeniye. 1968.
- [42]. Savinov O.A. Sovremennyye konstruksii fundamentov pod mashiny i ikh raschet. JI.: Stroyizdat. 1964 (I izd.), 1979 (II izd.).
- [43]. Svetlovskiy A.Ye., Silkin B.I. Tsunami ne budet neozhidannym. JI.: Gidromegeoizdat. 1973.
- [44]. Seysmicheskoye rayonirovaniye territorii SSSR. M.: Nauka. 1980.
- [45]. Birbrayer A.N., Shulman S.G. Seysmostoykost atomnykh elektrostantsiy. M.: Informeyergo. 1979.
- [46]. Svod pravil. SP 14.13330.2014. Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonakh. Izdaniye ofitsialnoye. OAO "TsPP", M., 2014.
- [47]. SP 22.13330.2011. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy / Ministroy Rossii, M., 2011.
- [48]. SP 24.13330.2011. Svaynyye fundamenty / Ministroy Rossii, M., 2011.
- [49]. SNiP 2.02.05-87. Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami/ Gosstroy SSSR. M.: TsITP Gosstroya SSSR. 1988.
- [50]. SP 20.13330.2011. Nagruzki i vozdeystviya / Ministroy Rossii, M., 2011.
- [51]. Petrov K.V., Zolotareva Ye.A., Volodin V.V., Vatin N.I., Zhmarin Ye.N. Rekonstruktsiya krysh Sankt -Peterburga na osnove legkikh stalnykh tonkostennykh konstruksiy i antiobledenitelnoy sistemy // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2010. No 2. S. 59-64.
- [52]. Umanskiy A.A. Spravochnik proyektirovshchika promyshlennykh, zhilykh i obshchestvennykh zdaniy i sooruzheniy (Raschetno-teoreticheskiy). M.: Gosstroyizdat. 1960.
- [53]. Timoshenko S.L. Kolebaniya v inzhenernom dele. M.: Fizmatgiz. 1959.
- [54]. Timoshenko S.L., Gere Da. Mekhanika materialov. M.: Mir. 1976.
- [55]. Timoshenko S.L., Yang D.Kh., Uiver U. Kolebaniya v inzhenernom dele. M.: Mashinostroyeniye. 1985.
- [56]. Uzdin A.M., Sandovich T.A., Samikh A.N.M. Osnovy teorii seysmostoykogo stroitelstva zdaniy i sooruzheniy. S.-Peterburg: VNIIG im. B.Ye. Vedeneyeva. 1993.
- [57]. Shebalin NL. Metody ispolzovaniya inzhenerno-seysmologicheskikh dannykh pri seysmicheskom rayonirovanii // Seysmicheskoye rayonirovaniye territorii SSSR. M.: Nauka. 1968. S. 95-111.
- [58]. Shulman ST. Raschety seysmostoykosti gidrosooruzheniy s uchedom vliyaniya vodnoy sredy. M.: Energiya. 1976.
- [59]. Shulman ST., Kaufman BD. Sobstvennyye kolebaniya ostsillyatora, Vzaimodeystvuyushchego s uprugoy poluploskostyu // Izv. VNIIG im. Vedeneyeva. 1978. T. 122. S. 105-108.
- [60]. Abbo M.B. Elements of the Theory of Free Surface Flows-Computational Hydraulics. // Pitman Publ. Ltd., London. 1980.
- [61]. American National Standard. Earthquake Instrumentation Criteria for Nuclear Power Plants. ANSI N18.5-1974 // Appr. Jan. 9, 1974. American National Standard Inst., Inc.

- [62]. Baha r Y. Optimal digization of earthquake records // Nucl Engng. and Des. 1977. Vol. 44. P. 263-267.
- [63]. Bath e K.G. Finite Element Procedures in Engineering Analysis if Prentice-Hall Inc., 1982.
- [64]. Bath e K.G., Wilson E.L. . Stability and Accuracy Analysis of Direct Integration Methods H Earthquake Engng. and Struct. Dyn. 1983, Vol. 1. P. 283-291.
- [65]. Beniof F.H. The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness // Bull. SeismoL. Soc. of America. 1934. Vol. 24. P. 398.
- [66]. Biggs J.M. Seismic Response Spectra for Equipment Design in Nuclear Power Rants // Rtos., 1 Int. Conf. Struct. Mech. in Reactor Technol. Paper K 4/7. Berlin. 1971.
- [67]. Biot M.A. Theory of Vibration of Buildings During Earthquake // Zeitschrift fur Angevandte Mathemaic wui Mechanic. 1934. Band 14, Heft 4.
- [68]. Bio t M.A. Analytical and Experimental Methods in Engineering Seismology // Trans., ASCE. 1943. Vol. 108. P. 365.
- [69]. Brigha m E.O. The Fast Fourier Transform // Prentice-Hall Inc. 1974.
- [70]. Cha n S.P., Co x H.L., Benfield W.A. Transient Analysis of Forced Vibrations of Complex Structural-Mechanical Systems // Journ. Royal Aeronautical Soc. 1962. Vol. 66. P. 457-460.
- [71]. Ch u S.L., Ami n M., Sing h S. Spectral Treatment of Actions of Three Earthquake Components on Structures // Nucl Engng. and Des. 1972. Vol. 21. P. 126-136.
- [72]. Clou d R.L. Structural Mechanics Applied to Pressurized Water Reactor Systems // Nuclear Design. 1978. Vol. 46, No 2.
- [73]. Combinin g Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis. Regulatory Guide 1.92, Rev. 1 // U.S. Nuclear Regulatory Commission. Fdb. 1976.
- [74]. Conno r I.I., Brebbi a C.A. Finite-Element Techniques for Fluid Flow // Newness-Butterworths, London-Boston, 1977.
- [75]. Coole y J.W., Tulcey J.W. . An Algorithm for the Machine Calculations of Complex Fourier Series // Mathematics of Computation, 1965. Vol. 19, No 90.
- [76]. Dampin g Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants. Regulatory Guide 1.61 // U.S. Atomic Energy Commission. Oct. 1973.
- [77]. Desig n Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. Regulatory Guide 1.60 // U.S. Nuclear Regulatory Commission. Dec. 1973.
- [78]. Development of Floor Design Response Spectra for Seismic Design of Floor-Supported Equipment or Components. Regulatory Guide 1.122, Rev. 1 //
- [79]. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Dec. 1978.
- [80]. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. V. 2. Generic Requirements*, Chap. 4. Design Basis (Part 2)*. Rev. A, March 1994.
- [81]. Forsythe G.E., Moler C.B. Computer Solution of Linear Algebraic System // Prentice-Hall Inc. 1967.
- [82]. Gupta A.K., Chen D.C. A Simple Method of Combining Modal Responses // Proc7 Int. Conf. Struct. Mech. in Reactor Technol Paper No. K3/10. Chicago. 1983.
- [83]. Gupta A.K., Chu S.L. Equivalent Modal Response Method for Seismic Design of Structures UNucl Engng. and Des. 1977. Vol. 44. P. 87-91.
- [84]. Gupta A.K. Approximate Design for Three Earthquake Components //
- [85]. Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1978. Vol. 104 (EM6). P. 1455-1456.
- [86]. Gupta AX Rational and Economic Multicomponent Seismic Design of Piping Systems // Journ. Pressure Vessel Techno, ASME. 1978. Dec.
- [87]. Gutenberg V., Richter C.F. Earthquake, Magnitude, Intensity, Energy arid Acceleration H Bull. Seismological Soc. of America. 1942. Vol. 32.
- [88]. Guyan R.J. Reduction of Stiffness and Mass Matrices II AIAA Journ. Vol. 3. P. 380.
- [89]. Hadjian A.H. Seismic Response of Structures by the Response Spectrum Method UNucl. Engng. and Des. 1981. Vol. 66, No 2. P. 179-201.
- [90]. Hadjian A.H., Ellison B. Decoupling of Secondary Systems for Seismic Analysis I I Proc., ASME Pressure Vessel and Piping Conf. San Antonio. 1984.

- [91]. Hadjian A.H., Hamilton, C.W. Probabilistic Frequency Variations of Concrete Structures // Int. Conf. Struct. Mech. in Reactor Technol Berlin. 1973.
- [92]. Houbolt J.C. A Recurrence-Matrix Solution of Dynamic Response of Elastic Aircraft // Journ. of Aeronautical Sciences., 1950. P. 540-550.
- [93]. Housner J.V. Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers // Bull. Seismological Soc. of America. 1957. Vol. 47, No 1.
- [94]. Housner G.W. Characteristics of Strong-Motion Earthquakes // Bull. Seismological Soc. of America. 1974. Vol. 37, No 1.
- [95]. Irons V. Structural Eigenvalue Problems: Elimination of Unwanted Variables U AIAA Journ. 1965. Vol. 3. P. 961-962.
- [96]. Krutzik N.J., Petrovskiy D., Sachanski S. Dynamic Response of Belene WER-1000 to Seismic Loading Conditions H Preprints, 12 SMiRT-Post-Conf. Seminar. Vienna. 1993, Aug. 23-25.
- [97]. Lin C.W., Losef F. A New Approach to Compute System Response With Multiple Support Response Spectra Input II Nucl. Engng. and Des. 1980. Vol. 60. P. 347-352.
- [98]. Liy S.G., Fagel L.W. Earthquake Interaction by Fast Fourier Transform I Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1971. Vol. 97, No EM4.
- [99]. Lysmer J., Kuhlemeyer ILL. Finite Dynamic Model for Infinite Media // Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1969. Vol. 95, No EM4. P. 859-877.
- [100]. Lysmer J., Waas G. Shear Waves in Plane Infinite Structures // Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1972. Vol. 98, No EM1. P. 85-105.
- [101]. Mondkar Powell G.H. Large Capacity Equation Solver for Structural Analysis // Computers and Structures. 1974. No 4.
- [102]. Bubis A.A., Smirnov V.I. Obsuzhdeniye proyekta svoda pravil: «Zdaniya seysmostoykiye i seysmoizolirovannyye. Pravila proyektirovaniya» // Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy. 2014. №3
- [103]. Newmark N.M., Hall W. J. Seismic Design Criteria for Nuclear Reactor Facilities // Proc., 4 World Conf. Earthquake Engng., Santiago, Chile. 1969.
- [104]. Newmark N.M., Blume J.A., Kapur K.K. Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants // Journ. Power Div., ASCE. 1973. Vol. 99, No P02. P. 287-303.
- [105]. Nour-Omid V., Clough R.W. Dynamic Analysis of Structures Using Local Coordinates II Earthquake Engng. and Struct. Dyn. 1984. No 12. P. 565-577.
- [106]. Paz M. Dynamic Condensation // AIAA Journ. 1984. Vol. 22, No 5. P. 724-727.
- [107]. Peters K., Schmitz D., Wagner W. The Problem of Resonance in the Evaluation of Floor Response Spectra // Proc., 4 Int. Conf. Struct. Mech. in Reactor Technol. San Francisco. 1977.
- [108]. Rosenbluth E., Elordín J. Response of Linear Systems to Certain Transient Disturbances I I Proc., 4 World Conf. on Earthquake Engng., Santiago, Chile. 1969. Vol. 1.
- [109]. Rosenbluth E., Contreras H. Approximate Design for Multicomponent Earthquakes // Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1977. Vol. 103, No EM5. P. 881-893.
- [110]. Safety Series No 50-SG-D15. Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants. A Safety Guide // International Atomic Energy Agency, Vienna. 1992.
- [111]. Safety Series No 50-SG-S1 (Rev. 1). Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting. A Safety Guide // International Atomic Energy Agency, Vienna. 1991.
- [112]. Sato H., Kamazaki M., Ohori M. An Extensive Study on a Simple Method on Estimating Response Spectrum Based on a Simulated Spectrum // Proc., 4 Int. Conf. on Struct. Mech. in Reactor Technol San Francisco. 1977.
- [113]. Scanlan R.H., Sachs K. Development of Compatible Secondary Spectra Without Time Histories H Proc., 4 Int. Conf. on Struct. Mech. in Reactor Technol San Francisco. 1977.
- [114]. Schmitz D., Peters K. Direct Evaluation of Floor Response Spectra from a Given Ground Response Spectrum // Proc., 4 Int. Conf. on Struct. Mech. in Reactor Technol San Francisco. 1977.
- [115]. Seed H.B., Ugas S, Lysmer J. Site-Dependent Spectra for Earthquake Resistant Design // Bull Seismological Soc. of America. 1976. Vol. 66, No 1. P. 221-243.
- [116]. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Analysis of Safety-Related Nuclear Structures // ASCE Standard, Sept. 1986.

- [117]. Schnabel V., Lysmer J., Seed H.B. SHAKE. A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites // College of Engineering University of California. Berkeley, California. Dec. 1972.
- [118]. Shibata H., et al. Development of Aseismic Design of Piping, Vessels, and Equipment in Nuclear Facilities // Nucl Engng. and Des. 1972. Vol. 22, No 2. P. 247.
- [119]. Singh M.J. Generation of Seismic Floor Spectra // Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. Oct. 1975.
- [120]. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants. NUREG-0800 // U.S. Nuclear Regulatory Commission. June 1987.
- [121]. Stevenson J.D. Structural Damping Values as a Function of Dynamic Response Stress and Deformation Levels // Nucl Engng. and Des. 1980. Vol. 60. P. 211-238.
- [122]. Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities. Manual. (Ed. J.D. Stevenson) // ASCE. 1980.
- [123]. Tbailler H.J. Spectral Analysis of Complex Systems Supported at Several Elevations I I Journ. of Pressure Vessel Technol, ASME, 1976. Vol. 98.
- [124]. Tsai N.C. Transformation of Time Axes of Accelerograms // Journ. Engng. Mech. Div., ASCE. 1969. Vol. 95, No EM2.
- [125]. Tsai N.C. Spectrum-Compatible Motions for Design Purposes // Journ. Engng Mech. Div., ASCE. April 1974.
- [126]. Veletsos A.J.S. Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks // Proc., 5 World Conf on Earthquake Engng. Rome, 1974.
- [127]. Westergaard H.M. Pressures on Dams during Earthquakes // Proc. ASCE. 1931. Vol- 57, No 9. P. 1303-1318.
- [128]. Wilson E.L., Bayo E.P. Use of Special Ritz Vectors in Dynamic Substructure Analysis II Journ. of Struct. Engng. 1986. Vol. 112, No 8. P. 1944-1954.
- [129]. Wolf J.T. Dynamic Soil-Structure Interaction // N-Y. Prentice-Hall Inc., 1985.
- [130]. Wu R.W., Hassan F.A., Liu L.K. Seismic Response Analysis of Structural System Subjected to Multiple Support Excitation // Nucl Engng. and Des. 1978. Vol. 47.

Тарасов В.А., Барановский М.Ю., Редькин А.В., Соколов Е.А., Степанов А.С. Системы сейсмоизоляции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №4 (43). С. 117-140.

Tarasov V.A., Baranovskii M.Yu., Redkin A.V., Sokolov E.A., Stepanov A.S. Seismic isolation systems. Construction of Unique Buildings and Structures, 2016, 4 (43), Pp. 117-140. (rus)