

**Министерство строительства
и жилищно-коммунального хозяйства
Российской Федерации**

**Федеральное автономное учреждение
«Федеральный центр нормирования, стандартизации
и технической оценки соответствия в строительстве»**

ПОСОБИЕ

**ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЗДАНИЙ С СИСТЕМАМИ
СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ И СИСТЕМАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ**

Москва 2020

Содержание

1 Область применения	1
2 Нормативные ссылки	3
3 Термины и определения	3
4 Общие положения	6
5 Требования к расчетам зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции	7
5.1 Общие положения	7
5.2 Расчетный спектр упругого отклика ускорений	7
5.3 Спектр упругого отклика горизонтальных ускорений	7
5.4 Спектр упругого отклика вертикальных ускорений	9
5.5 Задание сейсмического воздействия в виде записей колебаний во времени	10
5.6 Расчет здания	11
5.7 Расчетные сейсмические нагрузки	13
6 Методика расчета зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции	14
6.1 Основные положения	14
6.2 Эквивалентный линейный расчет	15
6.3 Упрощенный линейный расчет	18
6.4 Модальный расчет	20
6.5 Нелинейный расчет по записям колебаний грунта во времени	23
6.6 Метод расчета с использованием модифицированного спектра ускорений	25
7 Требования к проектированию зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции	34
7.1 Общие положения	34
7.2 Требования к устройствам сейсмозащиты	35
7.3 Функциональные требования	36
7.4 Конструктивные требования	36
7.5 Критерии конструктивной регулярности	38
7.6 Требования к несущим элементам и инженерным коммуникациям	41
8 Рекомендации по монтажу и эксплуатации систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции	42
8.1 Общие положения	42
8.2 Общие требования к монтажу изделий	42
8.3 Контроль качества установки сейсмоизолирующих опор	45
8.4 Общие требования по замене сейсмоизолирующих опор	45
8.5 Общие требования по эксплуатации зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции	46

9 Рекомендации по мониторингу зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции	49
Приложение А Сейсмоизолирующие элементы.....	57
Приложение Б Схема методов расчета сейсмоизолированных зданий...	72
Приложение В Моделирование систем сейсмоизоляции.....	73
Приложение Г Форма протокола установки сейсмоизолирующих опор в проектное положение.....	75

Введение

Настоящее пособие разработано в развитие положений СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах» в части расчетов зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции, а также рекомендаций по подбору систем сейсмозащиты и мониторинга зданий.

Ослабление реакции здания при сейсмических воздействиях может быть достигнуто путем увеличения периода основных колебаний, изменения формы свободных колебаний, увеличения демпфирования, ограничения сил, передаваемых на здание, которые улучшают общую реакцию здания при сейсмических воздействиях. Существует несколько типов устройств, которые могут быть использованы для этой цели, каждый с различными возможностями и расположением в пределах здания.

Широко распространенный способ изменения реакции здания при сейсмических воздействиях – обеспечение сейсмической изоляции. В этом случае сейсмоизолирующие элементы, как правило, расположены ниже основной массы здания и установлены в пределах сейсмоизолирующего слоя с равномерным распределением. Сейсмоизолирующие элементы могут иметь квазиупругую характеристику для увеличения периода основных колебаний или нелинейную падающую характеристику для ограничения силы, передаваемой на конструкцию.

Уменьшение реакции здания может быть также достигнуто посредством систем динамического регулирования сейсмической реакции (демпфирующих устройств), установленных в различных местах здания для диссипации энергии. Также, в пределах здания, могут применяться комбинации устройств различных типов, описанных выше.

В пособии приведены основные положения в части расчетов, принципов и правил проектирования зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции, функциональные требования к характеристикам устройств, а также к оценке соответствия, монтажу и техническому обслуживанию систем сейсмозащиты. Отражены особенности мониторинга зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции.

Настоящее пособие предназначено для инженерно-технических работников проектных и строительных организаций, учреждений и служб заказчика (инвестора) и других заинтересованных организаций, научных работников, преподавателей и студентов высших учебных заведений.

Работа выполнена АО «НИЦ «Строительство» ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (руководитель работы – д-р техн. наук, член-корр. РАН, проф. *Б.В. Гусев*; отв. исполн. – инж. *А.А. Бубис*) при участии рабочей группы в составе: канд. техн. наук *Л.Н. Смирнова*, инж. *И.Р. Гизятуллин*.

1 Область применения

1.1 Настоящее пособие распространяется на проектирование новых, реконструкцию и усиление существующих зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции в районах с расчетной сейсмичностью 7, 8 и 9 баллов по шкале MSK-64 на грунтах категорий I, II, III по сейсмическим свойствам.

Примечания

1 Проектирование и строительство зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования реакции на площадке, сейсмичность которой превышает 9 баллов, осуществляется в порядке, установленном уполномоченным федеральным органом исполнительной власти.

2 Системы сейсмоизоляции допускается применять в зданиях, возводимых на грунтах категории III, только при наличии расчетных обоснований и натурной проверки обеспечения несущей способности грунтов для всех режимов функционирования здания с системой сейсмоизоляции.

3 Строительство новых сейсмоизолированных зданий и применение систем сейсмоизоляции для увеличения сейсмостойкости существующих зданий на грунтах категории IV не допускается.

1.2 Положения настоящего методического пособия не распространяются на проектирование промышленных сооружений, атомных станций, транспортных и гидротехнических сооружений.

1.3 Положения настоящего методического пособия не распространяются на сейсмоизолированные здания, расположенные:

- в зонах возможного проявления тектонических разломов, распространяющихся до дневной поверхности;
- на площадках с грунтами, способными к разжижению.




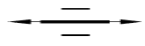
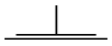

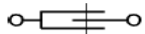
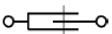
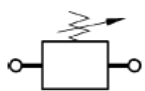
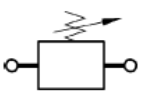

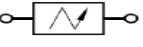





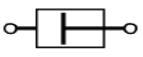













1.4 Положения настоящего методического пособия не распространяются на здания с системами сейсмоизоляции, распределенными по нескольким этажам или уровням конструктивной системы.

1.5 Положения настоящего методического пособия распространяются на проектирование зданий с полной сейсмоизоляцией, в которых системы сейсмоизоляции, образующие сейсмоизолирующие слои, располагаются выше фундаментов или жестких подземных частей здания.

1.6 В методическом пособии приведены требования к монтажу, техническому обслуживанию устройств сейсмозащиты и рекомендации по мониторингу зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции.

1.7 Положения настоящего методического пособия распространяются на типы антисейсмических устройств и их комбинации, указанные в таблице 1. Описание и принцип работы антисейсмических устройств приведены в приложении А.

Т а б л и ц а 1 – Наиболее распространенные типы антисейсмических устройств

Описание устройства			Графическое представление		
			Горизонтальная проекция	Вертикальная проекция	
				Направление x	Направление y
Устройства с жестким соединением (УЖС)	Устройства с постоянным соединением (УПС)	Неподвижное (жесткое)			
		Подвижное			
Устройства с жестким соединением (УЖС)	Предохранители-ограничители	Механические предохранители-ограничители			-
		Гидравлические предохранители-ограничители			-
	Устройства с временным соединением			-	
Устройства, зависящие от перемещения	Линейные устройства				
	Нелинейные устройства				
Устройства, зависящие от скорости	Жидкостно-вязкостные демпферы (ЖВД)				
	Жидкостно-пружинные демпферы (ЖПД)				
Сейсмоизолирующие опоры	Эластомерные				
	Резинометаллические опоры				-
	Маятниковые скользящие опоры с криволинейной поверхностью				
	Скользящие опоры с плоской поверхностью				

2 Нормативные ссылки

В настоящем пособии использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ 27751–2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения

СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах»

СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» (с изменениями № 1, № 2, № 3)

СП 126.13330.2017 «СНиП 3.01.03-84 Геодезические работы в строительстве»

СП 330.1325800.2017 Здания и сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования инженерно-сейсмометрических станций

П р и м е ч а н и е – При пользовании настоящим пособием целесообразно проверить действие ссылочных документов в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты», за текущий год. Если заменен ссылочный документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего пособия в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил целесообразно проверить в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

3 Термины и определения

В настоящем пособии применены термины, принятые в СП 14.13330 и ГОСТ 27751–2014, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 жидкостно-вязкостный демпфер: Антисейсмическое устройство, реакцией которого является осевая сила, зависящая только от прикладываемой скорости; принцип его функционирования состоит в использовании реактивной силы вязкой жидкости, текущей через систему отверстий и/или клапанов.

3.2 жидкостно-пружинный демпфер: Антисейсмическое устройство, реакцией которого является осевая сила, зависящая как от прикладываемой скорости, так и от прикладываемого хода; принцип его функционирования состоит в использовании реактивной силы вязкой жидкости, текущей через систему отверстий и клапанов и в то же время подвергаемой возрастающему давлению.

3.3 нормированный спектр отклика: Спектр отклика ускорений упругой системы, максимальные амплитудные составляющие которого поделены на максимальную амплитуду рассматриваемой акселерограммы.

3.4 полная сейсмоизоляция здания: Суперструктура считается полностью сейсмоизолированной, если при сейсмической расчетной ситуации она работает в области упругих деформаций; в противном случае, суперструктура считается частично сейсмоизолированной.

3.5 полное расчетное перемещение сейсмоизолирующего элемента в главном направлении: Максимальное горизонтальное перемещение в месте расположения сейсмоизолирующего элемента, включающее расчетное перемещение, вызванное кручением суперструктуры вокруг вертикальной оси.

3.6 полное расчетное перемещение сейсмоизолирующего элемента во второстепенном направлении: Максимальное вертикальное перемещение в месте расположения сейсмоизолирующего элемента, включающее расчетное перемещение, вызванное угловыми перемещениями суперструктуры вокруг горизонтальной оси.

3.7 расчетное перемещение системы сейсмоизоляции в главном направлении: Максимальный горизонтальный сдвиг между верхом субструктуры и низом суперструктуры в центре эффективной жесткости, соответствующий расчетному сейсмическому воздействию.

3.8 расчетное перемещение системы сейсмоизоляции во второстепенном направлении: Максимальное вертикальное смещение между верхом субструктуры и низом суперструктуры в максимально удаленной точке здания от его центра эффективной жесткости при расчетном сейсмическом воздействии.

3.9 сейсмическая изоляция: Изоляция здания от сейсмических колебаний грунта.

3.10 сейсмически изолированное здание: Здание, оснащенное системой сейсмоизоляции.

3.11 сейсмоизолирующие элементы: Элементы, образующие систему сейсмоизоляции, представляющие собой слоистые резинометаллические опоры, пружинные опоры, вязкоупругие или фрикционные демпферы, маятниковые и другие устройства.

3.12 сейсмоизолирующий слой: Слой, разделяющий субструктуру и суперструктуру, в пределах которого устраивается система сейсмоизоляции, как правило, в основании здания.

3.13 система сейсмоизоляции: Совокупность специальных конструктивных элементов, повышающих периоды собственных колебаний здания относительно преобладающего периода сейсмического воздействия (гибкие стойки; качающиеся опоры; резинометаллические опоры, пружинные опоры и др.) и элементов увеличивающих поглощение (диссипацию) энергии сейсмических колебаний здания (демпферы сухого трения; скользящие пояса; гистерезисные; вязкоупругие демпферы и др.), а также резервных, выключающихся элементов.

3.14 спектр упругого отклика: График, представляющий собой совокупность максимальных абсолютных значений (ускорение, скорость или перемещение) линейно-упругого осциллятора при заданном

акселерограммой воздействия, построенный как функция собственных периодов (частот) и демпфирования осцилляторов.

3.15 способность к диссипации энергии: Способность устройства рассеивать энергию во время циклов «нагрузка-перемещение».

3.16 субструктура: Часть здания, включая фундамент, расположенная ниже сейсмоизолирующего слоя.

3.17 суперструктура: Сейсмически изолированная часть здания, расположенная выше сейсмоизолирующего слоя.

3.18 устройства сейсмозащиты: Элементы, которые способствуют изменению сейсмической реакции здания путем сейсмоизоляции, диссипации энергии или путем создания постоянных или временных ограничителей.

3.19 устройство диссипации энергии: Устройство, обладающее большой способностью к диссипации энергии, т. е. рассеивающее большую долю энергии, воспринимаемой во время фазы нагрузки и характеризующееся остаточными перемещениями после снятия нагрузки. Устройство классифицируется как устройство диссипации энергии, если эквивалентное вязкое демпфирование ξ превышает 15 % критического значения.

3.20 центр эффективной жесткости: Центр жесткости, определяемый на верхней поверхности сейсмоизолирующего слоя с учетом податливости сейсмоизолирующих элементов и субструктуры.

3.21 центрирование сейсмоизолирующих устройств: Мероприятия по возврату сейсмоизолирующих устройств в начальное состояние при статическом равновесии здания в стадии эксплуатации в случае возникновения остаточных перемещений после сейсмического события.

3.22 эффективная жесткость системы сейсмоизоляции в главном направлении: Отношение значения суммарной горизонтальной силы, передающейся через сейсмоизолирующий слой на суперструктуру при расчетном перемещении, к абсолютному значению расчетного перемещения в том же направлении (секущая жесткость).

3.23 эффективная жесткость системы сейсмоизоляции во второстепенном направлении: Отношение значения суммарной вертикальной силы, передающейся через сейсмоизолирующий слой на суперструктуру при расчетном перемещении, к абсолютному значению расчетного перемещения в том же направлении (вертикальная жесткость).

3.24 эффективное демпфирование системы сейсмоизоляции: Значение эффективного вязкого демпфирования, соответствующее энергии, рассеянной системой сейсмоизоляции при расчетном перемещении.

3.25 эффективный период: Период колебаний по основному тону в рассматриваемом направлении системы с одной степенью свободы, масса которой соответствует приведенной массе суперструктуры, а жесткость равна эффективной жесткости системы сейсмоизоляции.

4 Общие положения

4.1 Процесс проектирования зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции должен выполняться с учетом карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (далее – ОСР), сейсмического микрорайонирования, инженерно-геологических условий площадки строительства, горизонтальных и вертикальных ускорений грунта, назначения здания, геометрических и физических характеристик несущих элементов здания, конструктивной системы, а также ненесущих элементов конструкций здания.

4.2 При проектировании зданий с системами сейсмоизоляции конструктивную систему здания следует разделять по высоте сейсмически изолирующим слоем на две части: субструктуру и суперструктуру.

4.3 Субструктуру следует располагать ниже сейсмоизолирующего слоя. Она должна включать в себя фундамент или фундамент и часть здания, контактирующие с грунтом.

4.4 Суперструктура, расположенная выше сейсмоизолирующего слоя, должна включать в себя часть здания, на которую сейсмические воздействия передаются через сейсмоизолирующий слой.

4.5 Снижение сейсмической реакции системы, воспринимающей горизонтальные силы, следует достигать путем увеличения основного периода колебаний сейсмически изолированного здания, видоизменения основной формы колебаний и увеличения демпфирования или путем комбинации этих эффектов. В изолирующую систему следует включать линейно или нелинейно деформируемые опоры и/или демпферы.

4.6 В проектируемых зданиях допускается применять системы сейсмоизоляции одного или нескольких типов.

4.7 При проектировании зданий с системой сейсмоизоляции следует обеспечивать:

- восприятие расчетных вертикальных нагрузок при высокой горизонтальной податливости и контролируемой вертикальной жесткости сейсмоизолирующего слоя;
- непрерывность конструктивной системы суперструктуры по высоте;
- необходимое вязкое и/или гистерезисное затухание энергии;
- необходимый уровень первых собственных частот (периодов) здания относительно частотного состава исходного сейсмического воздействия;
- ограничение горизонтальных перемещений, возникающих в процессе эксплуатации здания при ветровых воздействиях и других несейсмических воздействиях;
- ограничение взаимных горизонтальных перемещений суперструктуры и субструктуры при сейсмических горизонтальных воздействиях;
- быстрое возвращение сейсмоизолированной части здания в исходное положение устойчивого равновесия за счет постоянно действующей восстанавливающей силы после прекращения действия сейсмических сил с

возможностью быстрого восприятия возможных афтершоков после основного сейсмического события;

- наличие экспериментально подтвержденных характеристик жесткости и демпфирования, полученных на натуральных образцах;
- удобство монтажа, замены изолирующих элементов и возможность центрирования здания в пространстве;
- стабильность жесткостных и демпфирующих свойств при длительной эксплуатации и повторных циклических нагружениях при заданных проектом уровнях и колебаниях температуры и влажности;
- пожаростойкость изолирующих элементов.

Примечание — Свойства сейсмоизолирующих элементов в процессе эксплуатации и повторных циклических нагружений могут изменяться и находиться в диапазоне заранее определенных допускаемых значений.

5 Требования к расчетам зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции

5.1 Общие положения

5.1.1 Расчет зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции следует выполнять в соответствии с СП 14.13330 с учетом положений настоящего пособия.

5.2 Расчетный спектр упругого отклика ускорений

5.2.1 При определении сейсмических нагрузок на здания с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции следует предусматривать одновременное действие двух горизонтальных и вертикальной компоненты сейсмического воздействия.

5.2.2 Сейсмические колебания в данной точке на поверхности грунта представляются спектром упругого отклика ускорений $S_e(T)$ упруго-линейного осциллятора.

5.2.3 Две горизонтальные ортогональные составляющие сейсмического воздействия считаются независимыми и представляются одинаковой формой спектра отклика.

5.2.4 Три ортогональные составляющие сейсмического воздействия считаются независимыми и представляются, в общем случае, одинаковой формой спектра отклика для горизонтальных составляющих и масштабированным от максимальной горизонтальной составляющей вертикальным спектром отклика.

5.2.5 Для зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции сочетания нагрузок с учетом сейсмических воздействий следует принимать по СП 20.13330, СП 14.13330 и ГОСТ 27751.

5.3 Спектр упругого отклика горизонтальных ускорений

5.3.1 Для горизонтальных составляющих сейсмического воздействия спектры упругого отклика ускорений $S_e(T)$ определяются следующим образом (рисунок 5.1):

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_{gR} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]; \quad (5.1)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_{gR} \cdot \eta \cdot 2,5; \quad (5.2)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_{gR} \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right]; \quad (5.3)$$

$$T_D \leq T \leq 4 \text{ с}: S_e(T) = a_{gR} \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right], \quad (5.4)$$

где $S_e(T)$ – спектр упруго отклика ускорений упруго-линейного осциллятора;
 T – период колебаний линейной системы с одной степенью свободы;
 a_{gR} – расчетное значение ускорения в уровне основания, принимаемое равным 1,0; 2,0; 4,0 м/с² для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов соответственно;
 T_B , T_C и T_D – значения периодов, описывающие форму упругого спектра отклика и зависящие от типа грунта (таблица 5.1);
 η – поправочный коэффициент затухания с номинальным значением $\eta = 1$ для 5 %-ного вязкого затухания.

Значение поправочного коэффициента затухания η следует определять, используя выражение

$$\eta = \sqrt{10 / (5 + \xi)} \geq 0,55, \quad (5.5)$$

где ξ – коэффициент вязкого затухания системы сейсмоизоляции здания, %.

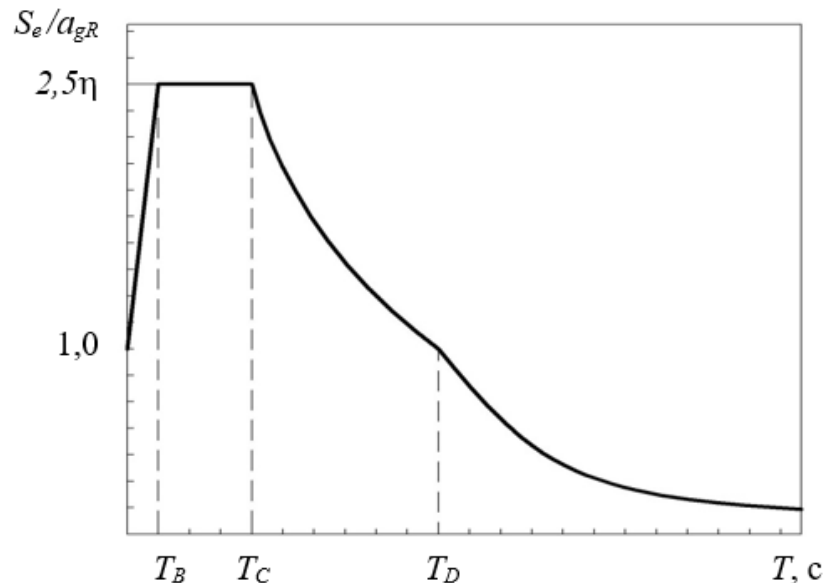


Рисунок 5.1 – Форма спектра отклика максимальных ускорений упруго-линейного осциллятора

Т а б л и ц а 5.1 – Значения параметров спектра упругого отклика горизонтальных ускорений упруго-линейного осциллятора

Категория грунта по сейсмическим свойствам	T_B , с	T_C , с	T_D , с
I и II	0,1	0,4	2,0
III	0,1	0,8	2,0
П р и м е ч а н и е — При наличии представительной информации (записей землетрясений, подробная характеристика опасных зон ВОЗ и др.) допускается применять обоснованные значения спектра упругого отклика ускорений.			

5.3.2 Спектр упругого отклика перемещений $S_{De}(T)$ следует получать, преобразуя спектр упругого отклика ускорений $S_e(T)$

$$S_{De}(T) = S_e(T) \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2. \quad (5.6)$$

5.3.3 Выражение (5.6), как правило, следует применять к зданиям с периодами колебаний, не превышающими 4,0 с. Для зданий с периодами колебаний более 4,0 с следует применять более полную инженерно-сейсмологическую информацию об участке строительства.

5.3.4 Для зданий повышенного уровня ответственности, перечисленных в пунктах 1 и 2 таблицы 4.2 СП 14.13330.2018, дополнительно должны учитываться зависящие от местных условий спектры, включая эффекты вблизи очага, если здание расположено на расстоянии менее 15 км от ближайшего потенциально активного сейсмического разлома с магнитудой $M_s \geq 6,5$.

5.4 Спектр упругого отклика вертикальных ускорений

5.4.1 Для определения спектра упругого отклика вертикальных ускорений $S_{ve}(T)$ используются следующие выражения:

$$0 \leq T \leq T_B: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]; \quad (5.7)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 2,5; \quad (5.8)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right]; \quad (5.9)$$

$$T_D \leq T \leq 4 \text{ с}: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right], \quad (5.10)$$

где $S_{ve}(T)$ – спектр упругого отклика вертикальных ускорений упруго-линейного осциллятора;

a_{vg} – расчетное значение вертикального ускорения в уровне основания, принимаемое в соответствии с таблицей 5.2;

T_B , T_C и T_D – значения периодов, описывающие форму спектра упругого отклика, принимаемые в соответствии с таблицей 5.2.

Т а б л и ц а 5.2 – Значения параметров спектра упругого отклика вертикальных ускорений упруго-линейного осциллятора

Категория грунта по сейсмическим свойствам	a_{vg}/a_{gR}	T_B, c	T_C, c	T_D, c
I, II, III	0,70	0,05	0,15	1,0

5.5 Задание сейсмического воздействия в виде записей колебаний во времени

5.5.1 Для расчетной пространственной модели зданий сейсмические колебания основания следует задавать трехкомпонентной акселерограммой, т. е. тремя ортогональными, одновременно действующими, акселерограммами. Одна и та же компонента акселерограммы не может быть использована одновременно вдоль обоих горизонтальных направлений.

5.5.2 В зависимости от характера применения и от фактически имеющейся информации описание сейсмического воздействия может быть выполнено с применением искусственных акселерограмм, а также записанных или синтезированных акселерограмм.

5.5.3 Продолжительность акселерограмм должна соответствовать магнитуде и другим важным параметрам сейсмического события, лежащим в основе установления расчетного максимального ускорения a_{gR} .

5.5.4 Если отсутствуют данные, характерные для конкретной площадки, общая длительность акселерограммы T_s должна составлять 20 с при длительности фазы максимальных амплитуд ускорений не менее 15 с. Длительность фазы максимальных амплитуд определяется интервалом времени, в котором огибающая акселерограммы превышает уровень $0,5a_{max}$, где a_{max} – максимальная амплитуда акселерограммы.

5.5.5 Набор искусственных акселерограмм должен соответствовать следующим требованиям:

- а) включать не менее трех трехкомпонентных акселерограмм;
- б) среднее значение максимальных ускорений грунта (вычисленное по отдельным записям колебаний во времени) должно быть не меньше значения a_{gR} для рассматриваемой площадки;
- в) в диапазоне периодов от $0,2T_1$ до $2T_1$, где T_1 – основной период колебаний здания в направлении, для которого применяется акселерограмма, среднее значение спектра упругого отклика с затуханием 5 %, вычисленное по всем записям колебаний во времени, должно быть не меньше 90 % соответствующего значения спектра упругого отклика с затуханием 5 %, приведенного в 5.3. Значения спектров должны быть рассчитаны с достаточно малым шагом по частоте;
- г) проверка соответствия спектра упругого отклика акселерограммы должна проводиться для всех уровней демпфирования, характерных для рассматриваемого здания;
- д) акселерограммы не должны содержать эффекты, обусловленные близостью очага землетрясения, если здание расположено далее 15 км от

ближайшего потенциально активного сейсмического разлома с магнитудой $M_s \geq 6,5$.

5.5.6 Записанные или синтезированные акселерограммы, используя физическое моделирование механизмов источника, эпицентральное расстояние и путь прохождения сейсмической волны через грунты, могут применяться при условии, что записи разработаны с учетом сейсмогенных свойств источника воздействия и грунтовых условий, характерных для площадки, а их значения должны быть не менее нормированного значения a_{gR} для рассматриваемой площадки.

5.5.7 Применяемый набор записанных или синтезированных акселерограмм должен соответствовать 5.5.5.

5.5.8 Для зданий один из линейных размеров которого в плане соизмерим с длиной сейсмической волны, следует использовать пространственные модели сейсмического воздействия, учитывающие их волновой характер, неоднородности и неравномерности сейсмического воздействия в плане здания.

5.5.9 Горизонтальные и вертикальная компоненты пространственной модели сейсмического воздействия должны быть не менее величин ординат упругих спектров отклика максимальных ускорений, приведенных в 5.3.

5.6 Расчет здания

5.6.1 Распределение жесткостей и масс в модели здания должны максимально соответствовать распределению этих величин в реальном объекте для того, чтобы можно было учитывать все существенные деформации и силы инерции, возникающие в здании при сейсмических воздействиях. В случае нелинейного расчета модель здания должна адекватно представлять распределение усилий.

5.6.2 В модели здания должны быть учтены узловые деформации и влияние несущих элементов на динамическую реакцию здания.

5.6.3 Динамическая реакция конструктивной системы здания должна анализироваться по параметрам: ускорений, инерционных сил и перемещений.

5.6.4 При расчете здания следует учитывать эффекты кручения, в том числе эффекты случайного эксцентриситета. При применении программных средств для расчета пространственной расчетной динамической модели (РДМ) эксцентриситеты учитываются автоматически.

5.6.5 В упрощенных линейных расчетах учет случайного кручения при определении положения центров масс и пространственных изменений движения грунта принимаются исходя из того, что расчетный центр масс на каждом i -м этаже здания смещается из своего номинального места расположения в рассматриваемом направлении на величину случайного эксцентриситета

$$e_{ai} = \pm 0,1L_i, \quad (5.11)$$

где e_{ai} – случайный эксцентриситет массы i -го этажа относительно его номинального месторасположения, прилагаемый в рассматриваемом направлении на всех перекрытиях;

L_i – размер стороны перекрытия, перпендикулярной к направлению действия сейсмического воздействия.

5.6.6 Моделирование системы сейсмоизоляции должно отражать с достаточной точностью пространственное распределение сейсмоизолирующих элементов так, чтобы адекватно учитывать перемещения в обоих горизонтальных и вертикальном направлениях, соответствующие эффекты возможного качания вокруг горизонтальной оси и вращения вокруг вертикальной оси.

5.6.7 Величины физических и механических свойств сейсмоизолирующей системы, используемые в расчете, должны быть наиболее неблагоприятными за время срока службы здания и должны отражать влияние:

- начального статического нагружения в сейсмоизоляторах перед приходом сейсмического воздействия;
- скорости нагружения;
- величины одновременного сейсмического воздействия в двух ортогональных горизонтальных направлениях и вертикального воздействия;
- температуры, влажности и наличия агрессивной среды;
- изменения за прогнозируемый срок службы здания свойств элементов системы сейсмоизоляции, в том числе предельно допустимых перемещений и усилий.

5.6.8 Для зданий нормального уровня ответственности, перечисленных в пункте 3 таблицы 4.2 СП 14.13330.2018, могут применяться средние величины физических и механических свойств устройств системы сейсмоизоляции при условии, что крайние (максимальные или минимальные) величины не отличаются более чем на 15 % от средних величин.

5.6.9 Устойчивость несущих элементов системы изоляции, воспринимающих вертикальную нагрузку должна проверяться расчетом и натурными испытаниями на горизонтальное перемещение, равное суммарному максимальному сейсмическому перемещению при воздействии суммарной вертикальной статической (весовой) и вертикальной сейсмической нагрузок. Дополнительно следует выполнять проверку устойчивости несущих элементов системы изоляции на горизонтальное перемещение от ветровых нагрузок и других несейсмических воздействий.

5.6.10 Расчет элементов фундамента и грунтового основания следует выполнять на усилия, возникающие в результате реакции надземной части здания, с анализом допускаемых остаточных деформаций. При определении реакции необходимо учитывать фактическое сопротивление, которое может развивать передающий воздействие элемент конструкции.

5.6.11 Следует соблюдать следующие ограничения междуэтажного перекоса здания:

а) здания с ненесущими элементами из хрупких материалов, имеющих соединения с несущими конструкциями

$$\frac{d_r}{K_1} \leq 0,005h; \quad (5.12)$$

б) здания с пластическими деформируемыми несущими элементами, соединенными с несущими конструкциями

$$\frac{d_r}{K_1} \leq 0,0075h; \quad (5.13)$$

в) здания с несущими элементами, не влияющими на деформации несущих конструкций или без несущих элементов

$$\frac{d_r}{K_1} \leq 0,01h, \quad (5.14)$$

где d_r – расчетный междуэтажный перекося, определяемый как разница средних горизонтальных перемещений d_{ei} в верхней и нижней частях рассматриваемого этажа;

K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения здания, принятый при расчете здания;

h – высота этажа.

5.7 Расчетные сейсмические нагрузки

5.7.1 При определении расчетных сейсмических нагрузок на здания следует принимать РДМ конструкций, согласованные с расчетными статическими моделями конструкций и учитывающие особенности распределения нагрузок, масс и жесткостей конструкций здания в плане и по высоте, а также пространственный характер деформирования конструкций при сейсмических воздействиях.

5.7.2 Массы нагрузок и элементов конструкций в РДМ допускается принимать сосредоточенными в узлах расчетных схем. При вычислении массы необходимо учитывать только нагрузки, создающие инерционные силы.

5.7.3 На этапе концептуального проектирования расчет здания с регулярным объемно-планировочным решением допускается выполнять с применением консольной РДМ (рисунок 5.2).

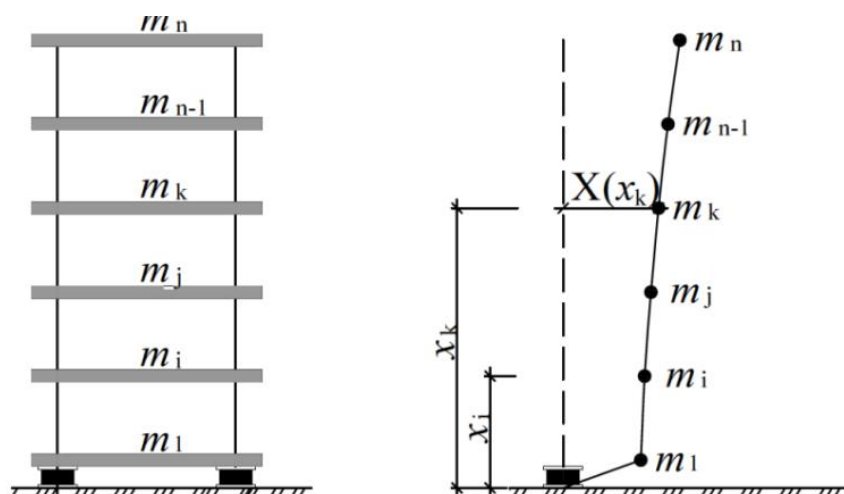


Рисунок 5.2 – Консольная РДМ

5.7.4 Расчет здания с нерегулярным объемно-планировочным решением и на стадии рабочего проектирования следует выполнять с

применением пространственных РДМ зданий и с учетом пространственного характера сейсмических воздействий.

5.7.5 При использовании линейно спектрального метода расчетная сейсмическая нагрузка (силовая или моментная) F_{ik}^j по направлению обобщенной координаты с номером j , приложенная к узловой точке k РДМ и соответствующей i -й форме собственных колебаний здания, определяется по формуле

$$F_{ik}^j = K_0 \cdot v \cdot S_e(T) \cdot m_k^j \cdot \eta_{ik}^j \cdot K_\psi, \quad (5.15)$$

где K_0 – коэффициент, учитывающий назначение здания и его ответственность, принимаемый по таблице 4.2 СП 14.13330.2018;

v – коэффициент, принимаемый равным 3 для зданий пунктов 1 и 2 таблицы 4.2 СП 14.13330.2018 и равным 2 для зданий пункта 3 таблицы 4.2 СП 14.13330.2018;

$S_e(T)$ – спектр упруго отклика ускорений упруго-линейного осциллятора;

m_k^j – масса здания или момент инерции соответствующей массы здания, отнесенный к точке k по обобщенной координате j , определяемый с учетом расчетных нагрузок на конструкции согласно разделу 5 СП 14.13330.2018;

η_{ik}^j – коэффициент, зависящий от формы деформации здания при его собственных колебаниях по i -й форме, от узловой точки приложения рассчитываемой нагрузки и направления сейсмического воздействия, определяемый согласно разделу 5 СП 14.13330.2018 с учетом наличия в расчетных схемах здания сейсмоизолирующих систем;

K_ψ – коэффициент, принимаемый по таблице 5.3 СП 14.13330.2018.

Примечания

1 При вычислении силового сейсмического воздействия F_{ik}^j ($j = 1, 2, 3$) приняты следующие размерности: F_{ik}^j , Н; $S_e(T)$, м/с²; m_k^j , кг; остальные коэффициенты, входящие в формулу (5.15), – безразмерные.

2 При вычислении моментного сейсмического воздействия F_{ik}^j ($j = 4, 5, 6$) приняты следующие размерности: F_{ik}^j , Н·м; $S_e(T)$, м/с²; m_k^j , кг·м²; η_{ik}^j , м⁻¹; остальные коэффициенты, входящие в формулу (5.15), – безразмерные.

3 $m_k^4 = J_k^1$; $m_k^5 = J_k^2$; $m_k^6 = J_k^3$, где J_k^1 , J_k^2 , J_k^3 – моменты инерции масс в узле k относительно 1-й, 2-й и 3-й осей соответственно.

6 Методика расчета зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции

6.1 Основные положения

6.1.1 Расчет зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции следует выполнять одним из следующих методов:

- эквивалентного линейного расчета;
- нелинейного расчета по записям колебаний грунта во времени.

6.1.2 Выбор метода расчета зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции следует осуществлять по приложению Б в соответствии с положениями следующих подразделов.

6.1.3 Идеализированные зависимости «сила-перемещение», применяемые для описания поведения систем сейсмоизоляции при сейсмических воздействиях, следует принимать по приложению В в соответствии с положениями следующих подразделов.

6.2 Эквивалентный линейный расчет

6.2.1 При соблюдении условий 6.2.10 систему сейсмоизоляции допускается моделировать с учетом линейной вязкоупругой работы, если она состоит из устройств типа слоистых резинометаллических опор с низким демпфированием, или с учетом билинейной гистерезисной работы, если система состоит из устройств с упругопластической диаграммой деформирования при горизонтальных нагрузках (рисунок 6.1).

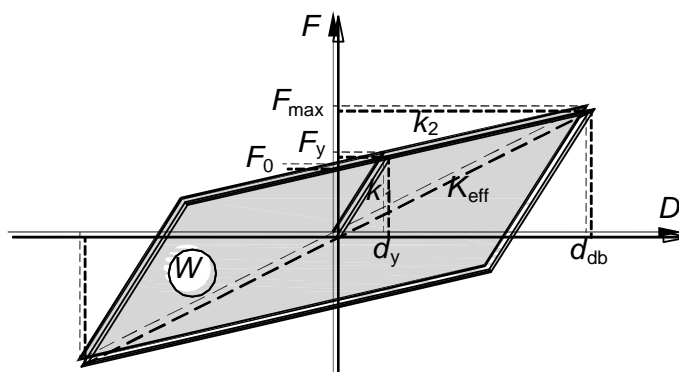


Рисунок 6.1– Идеализированная зависимость «сила-перемещение» (F – D) для сейсмоизолирующих опор с высокой способностью к диссипации энергии

6.2.2 Если используется эквивалентная линейная модель, то принимается эффективная горизонтальная жесткость каждого сейсмоизолирующего элемента (т. е. значение секущей жесткости при полном расчетном перемещении d_{db}), одновременно соблюдая требования 5.6.7. Эффективная горизонтальная жесткость K_{eff} системы сейсмоизоляции представляет собой сумму эффективных горизонтальных жесткостей сейсмоизолирующих элементов.

6.2.3 Эффективные жесткости эластомерных сейсмоизолирующих опор с высокой способностью к диссипации энергии (из высоко демпфирующей резины или опор со свинцовыми сердечниками) следует определять по формуле

$$K_{eff} = \frac{F_{max}}{d_{db}} = k_2 + \frac{F_0}{d_{db}} = \frac{F_{max} - F_y}{d_{db} - d_y} + \frac{F_0}{d_{db}}, \quad (6.1)$$

где k_1 – начальная упругая жесткость при монотонно возрастающей горизонтальной силе, а также жесткость при разгрузке в циклах «нагрузка – разгрузка», определяется по формуле

$$k_1 = \frac{F_y}{d_y}; \quad (6.2)$$

k_2 – жесткость за пределом текучести при действии горизонтальной силы, определяется по формуле

$$k_2 = \frac{F_{\max} - F_y}{d_{db} - d_y}; \quad (6.3)$$

F_{\max} – максимальная горизонтальная сила;

F_y – горизонтальная сила, характеризующая предел текучести;

F_0 – горизонтальная сила, соответствующая нулевому перемещению при циклической нагрузке;

d_y – перемещение при силе, соответствующей пределу текучести;

W – энергия, выделяемая за один цикл, соответствующий расчетному перемещению, равна общей площади петли гистерезиса

$$W = 4F_0(d_{db} - d_y). \quad (6.4)$$

6.2.4 Зависимость «сила-перемещение» ($F-D$) для одномаятниковых сейсмоизолирующих опор (рисунок А.8) приведена на рисунке 6.2.

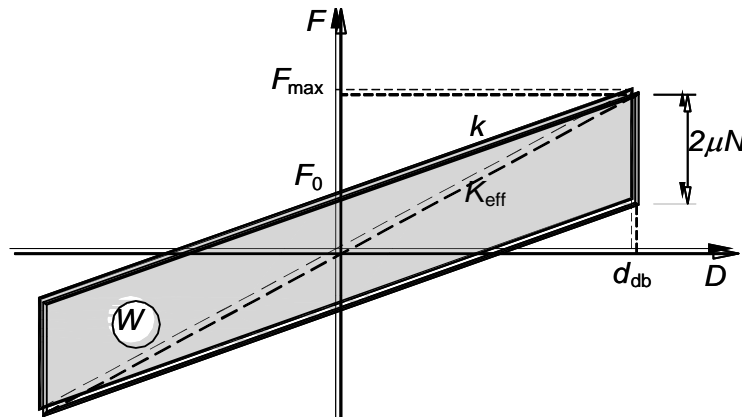


Рисунок 6.2 – Идеализированная зависимость «сила-перемещение» ($F-D$) для одномаятниковых сейсмоизолирующих опор

6.2.5 Эффективные жесткости одномаятниковых сейсмоизолирующих опор определяются следующим выражением

$$K_{eff} = \frac{F_{\max}}{d_{db}} = \frac{kd_{db} + \mu N}{d_{db}} = \frac{N}{R} \frac{d_{db} + \mu N}{d_{db}} = \frac{N}{R} + \frac{\mu N}{d_{db}}, \quad (6.5)$$

где k – горизонтальная жесткость опоры после превышения силы трения, определяется по формуле

$$k = \frac{N}{R}, \quad (6.6)$$

F_0 – сила трения в сейсмоизолирующем элементе, определяется по формуле

$$F_0 = \mu N \quad (6.7)$$

N – вертикальная нагрузка на сейсмоизолирующий элемент;

R – радиус кривизны сферических поверхностей;

μ – коэффициента трения скольжения ползуна по сферической поверхности;

W – энергия, выделяемая за один полный цикл при полном расчетном перемещении d_{db} , равна общей площади петли гистерезиса, определяется по формуле

$$W = 4\mu N d_{db} = 4F_0 d_{db}. \quad (6.8)$$

6.2.6 При использовании эквивалентной линейной модели диссипация энергии системы сейсмоизоляции должна выражаться в виде эквивалентного вязкого демпфирования – «эффективного демпфирования» ξ_{eff} . Диссипация энергии в опорах должна выражаться как измеренная энергия диссипации в циклическом режиме, с частотой в диапазоне собственных частот колебаний рассмотренных форм. Для форм высшего порядка, вне этого диапазона, модальный коэффициент демпфирования должен быть такой же, как у суперструктуры, конструктивно непрерывно связанной с фундаментом.

6.2.7 Значения коэффициента эффективного вязкого демпфирования ξ_{eff} для эластомерных сейсмоизолирующих опор с высокой способностью к диссипации энергии (из высоко демпфирующей резины или со свинцовыми сердечниками) следует определять по формуле

$$\xi_{eff} = \frac{2F_0(d_{db} - d_y)}{\pi K_{eff} d_{db}^2}. \quad (6.9)$$

6.2.8 Значения коэффициента эффективного вязкого демпфирования ξ_{eff} для одномаятниковых сейсмоизолирующих опор и двухмаятниковых опор с одинаковыми радиусами кривизны верхних и нижних сферических поверхностей и одинаковыми величинами коэффициентов трения скольжения ползуна по сферическим поверхностям следует определять по формуле

$$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{d_{db}}{\mu R} + 1}. \quad (6.10)$$

6.2.9 Если вычисленная эффективная жесткость или эффективное демпфирование сейсмоизолирующих элементов зависит от расчетного перемещения центра эффективной жесткости в рассматриваемом направлении d_{dc} , тогда должен применяться итерационный метод до тех пор,

пока разность между допустимой и расчетной величинами d_{dc} достигнет не более 5 % допустимой величины.

Работу системы сейсмоизоляции следует рассматривать как эквивалентную линейной работе при соблюдении следующих условий:

- эффективная жесткость системы сейсмоизоляции составляет не менее 50 % эффективной жесткости при перемещении $0,2 d_{dc}$;

- эффективный коэффициент демпфирования системы сейсмоизоляции не превышает 30 % критического;

- характеристики работы системы сейсмоизоляции изменяются не более, чем на 10 % при учете скорости нагружения или вертикальных нагрузок;

- увеличение восстанавливающей силы в системе сейсмоизоляции составляет не менее 2,5 % общей нагрузки от собственного веса суперструктуры для перемещений в пределах от $0,5d_{dc}$ до d_{dc} .

6.2.10 Если работа системы сейсмоизоляции считается эквивалентно линейной, а сейсмическое воздействие определяется по спектру упругого отклика, то коррекция демпфирования графика спектра упругого отклика для соответствующих категорий грунта по сейсмическим свойствам должна выполняться умножением на поправочный коэффициент затухания η .

6.3 Упрощенный линейный расчет

6.3.1 В методе упрощенного линейного анализа рассматриваются два горизонтальных динамических перемещения с наложением эффектов кручения при статической нагрузке. Принимается, что суперструктура представляет собой жесткое тело и выполняются условия 6.3.2 и 6.3.3. Тогда эффективный период колебания следует определять по формуле

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}}, \quad (6.11)$$

где M – масса надземной части здания;

K_{eff} – эффективная горизонтальная жесткость системы сейсмоизоляции, определяемая в 6.2.2.

Эффективные периоды колебаний эластомерных сейсмоизолирующих опор с высокой способностью к диссипации энергии (из высоко демпфирующей резины или опор со свинцовыми сердечниками) при расчетных перемещениях d_{dc} следует определять по формуле

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} = 2\pi \sqrt{\frac{Md_{dc}}{F_{dc}}}. \quad (6.12)$$

Эффективные периоды одномаятниковых сейсмоизолирующих опор при расчетных перемещениях d_{dc} можно определять так:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d_{dc}} \right)}}. \quad (6.13)$$

6.3.2 Кручением вокруг вертикальной оси следует пренебрегать при оценке эффективной горизонтальной жесткости и в упрощенном линейном анализе, если, в каждом из двух главных горизонтальных направлений, общий эксцентриситет (в том числе, случайный эксцентриситет) между центром жесткости системы сейсмоизоляции и вертикальной проекцией центра массы суперструктуры не превышает 7,5 % длины суперструктуры перпендикулярно к рассматриваемому горизонтальному направлению. Выполнение этого условия обязательно для применения упрощенного метода линейного анализа.

6.3.3 Упрощенный метод следует применять к системам сейсмоизоляции с эквивалентным линейным демпфированием, если они удовлетворяют всем нижеследующим условиям:

- а) расстояние от площадки до ближайшего потенциально активного сейсмического разлома с магнитудой $M_s \geq 6,5$ более 15 км;
- б) наибольший размер суперструктуры в плане не более 60 м;
- в) субструктура жесткая, чтобы минимизировать влияние различных перемещений грунта;
- г) все сейсмоизолирующие устройства расположены выше элементов субструктуры, которая воспринимает вертикальные нагрузки;
- д) эффективный период T_{eff} удовлетворяет следующему условию

$$3T_f \leq T_{eff} \leq 3 \text{ с}, \quad (6.14)$$

где T_f – период основной формы колебаний суперструктуры (определяемый по упрощенному выражению) при допущении, что здание конструктивно непрерывно связано с фундаментом.

6.3.4 В зданиях, в дополнение к 6.3.3, должны выполняться все нижеследующие условия для применения упрощенного метода расчета систем сейсмоизоляции с эквивалентной линейно демпфируемой диаграммой деформирования:

- а) конструктивная система суперструктуры, воспринимающая горизонтальные нагрузки, должна регулярно и симметрично располагаться по двум основным осям здания в плане;
- б) движением кручения в основании субструктуры допускается пренебречь;
- в) отношение вертикальной жесткости системы сейсмоизоляции к горизонтальной должно удовлетворять следующему выражению

$$\frac{K_V}{K_{eff}} \geq 150; \quad (6.15)$$

- г) период основной формы колебаний в вертикальном направлении T_V должен быть не более 0,1 с

$$T_V = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_V}}. \quad (6.16)$$

6.3.5 Перемещение центра жесткости здания при сейсмическом

воздействию должно рассчитываться в каждом горизонтальном направлении по формуле

$$d_{dc} = \frac{M S_e(T_{eff}, \xi_{eff})}{K_{eff, min}}, \quad (6.17)$$

где $S_e(T_{eff}, \xi_{eff})$ – спектральное ускорение, определенное в 5.3 с учетом соответствующей величины эффективного демпфирования ξ_{eff} согласно 6.2.6.

6.3.6 Горизонтальные силы, приложенные к каждому уровню суперструктуры, должны вычисляться в каждом горизонтальном направлении с применением выражения

$$f_j = m_j S_e(T_{eff}, \xi_{eff}), \quad (6.18)$$

где m_j – масса на j -м уровне.

Горизонтальные силы F_j должны быть приложены к конструкциям, воспринимающим горизонтальную силу, предполагая, что междуэтажные перекрытия в своей плоскости жесткие.

6.3.7 Система сил, рассмотренная в 6.3.6, вызывает эффекты кручения из-за сочетания естественных и случайных эксцентриситетов.

6.3.8 Если выполняется условие 6.3.2 об исключении кручения вокруг вертикальной оси, то эффекты кручения в отдельных сейсмоизолирующих элементах могут учитываться путем умножения в каждом направлении воздействий, определяемых в 6.3.5 и 6.3.6, на коэффициент δ_1 (для воздействия в направлении x)

$$\delta_{xi} = 1 + \frac{e_{tot, y}}{r_y^2} y_i, \quad (6.19)$$

где y – горизонтальное направление, перпендикулярно к рассматриваемому направлению x ;

x_1, y_1 – координаты сейсмоизолирующего i -го элемента относительно центра эффективной жесткости;

$e_{tot, y}$ – суммарный эксцентриситет в направлении y ;

r_y – радиус кручения системы сейсмоизоляции в направлении y :

$$r_y^2 = \sum (x_i^2 K_{yi} + y_i^2 K_{xi}) / \sum K_{xi}, \quad (6.20)$$

где K_{xi} и K_{yi} – эффективные жесткости i -го элемента, соответственно, в направлениях x и y .

6.4 Модальный расчет

6.4.1 Распределение горизонтальных сейсмических сил

6.4.1.1 Основные формы колебаний здания следует вычислять с использованием методов строительной механики или выражать через горизонтальные перемещения, линейно увеличивающиеся по высоте здания.

6.4.1.2 Сейсмическая сила определяется приложением горизонтальной

силы F_i на всех этажах модели в двух плоскостях

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum s_j \cdot m_j}, \quad (6.21)$$

где F_i – горизонтальная сила, действующая на i -й этаж;

F_b – горизонтальная сила в основании здания

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda, \quad (6.22)$$

где $S_d(T_1)$ – ордината расчетного спектра, соответствующая периоду T_1 ;

T_1 – период основной формы колебаний здания при горизонтальном движении в рассматриваемом направлении;

m – общая масса суперструктуры с учетом сочетаний нагрузок;

s_i, s_j – перемещения масс m_i, m_j основной формы колебания;

m_i, m_j – массы этажей суперструктуры.

6.4.1.3 Если основные формы колебаний здания приближенно выражаются горизонтальными перемещениями, линейно увеличивающимися по высоте, горизонтальные силы F_i следует определять по формуле

$$F_i = F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j}, \quad (6.23)$$

где z_i, z_j – высоты масс m_i, m_j в уровнях приложения сейсмической силы, определяемые от верха субструктуры.

6.4.1.4 Горизонтальные силы F_i должны быть приложены к конструкциям, воспринимающим горизонтальную силу, предполагая, что междуэтажные перекрытия в своей плоскости жесткие.

6.4.1.5 Если здание симметричное в плане и, если случайный эксцентриситет из 5.6.5 определяется более точным методом (например, 6.4.1.7), случайные эффекты кручения могут учитываться, умножая значения горизонтальных сил отдельных элементов (6.4.1.3) на множитель δ :

$$\delta = 1 + 0,6 \frac{x}{L_e}, \quad (6.24)$$

где x – расстояние от центра масс рассматриваемого элемента в плане, измеренное перпендикулярно к линии действия рассматриваемой сейсмической силы;

L_e – расстояние между двумя наиболее удаленными элементами здания, противодействующими горизонтальной нагрузке, измеренное перпендикулярно к линии действия рассматриваемой сейсмической силы.

6.4.1.6 Если расчеты проводятся для моделей в двух плоскостях, по одной для каждого из основных горизонтальных направлений, то влияние кручения следует определять путем удвоения случайного эксцентриситета e_{ai} в выражении (5.11) и заменяя коэффициент 0,6 в выражении (6.24) на 1,2.

6.4.1.7 Если для расчетов используется пространственная модель, то

случайные эффекты кручения могут определяться как сопутствующие эффекты, получаемые в результате приложения статических нагрузок, состоящих из моментов кручения M_{ai} относительно вертикальной оси каждого i -го этажа

$$M_{ai} = e_{ai} \cdot F_i, \quad (6.25)$$

где M_{ai} – момент кручения, приложенный к i -му этажу вокруг его вертикальной оси.

6.4.2 Упрощенный модальный линейный анализ

6.4.2.1 Если работа устройств сейсмоизоляции может рассматриваться как эквивалентно линейная, но не выполняется одно из условий 6.3.2 и 6.3.3 или, если применимы требования 6.3.4, то модальный анализ следует выполнять согласно 6.4.1.3.

6.4.2.2 Если удовлетворяются все условия 6.3.3 и, если применимы требования 6.3.4, то допускается применять упрощенный анализ с учетом горизонтальных перемещений и кручения вокруг вертикальной оси, допуская, что субструктура и суперструктура работают жестко. В этом случае, при анализе следует учитывать суммарный эксцентриситет (включая случайный эксцентриситет массы суперструктуры по 5.6.5). Тогда перемещения в каждой точке здания должны вычисляться путем комбинирования поступательных и вращательных перемещений. Это в значительной степени относится к оценке эффективной жесткости каждого сейсмоизолирующего элемента. Инерционные силы и моменты должны приниматься в расчет для проверки сейсмоизолирующей системы, элементов субструктуры и суперструктуры.

6.4.3 Модальный расчет с использованием спектра отклика

6.4.3.1 Модальный расчет с применением спектра отклика следует выполнять для зданий, на реакцию которых не оказывают существенное влияние высшие формы колебаний, по сравнению с основными формами колебаний здания в главных ортогональных направлениях.

6.4.3.2 Требование 6.4.3.1 считается выполненным, если выполняются два условия:

а) здания имеют основные периоды колебаний T_1 в главных ортогональных направлениях, которые должны быть меньше следующих величин

$$T_1 \leq \begin{cases} 4T_c \\ 2c \end{cases}, \quad (6.26)$$

где значения T_c приведены в таблице 5.1;

б) здания соответствуют критериям регулярности, приведенным в 7.5.

6.4.3.3 Следует принимать во внимание реакцию всех форм колебаний здания, вносящих значительный вклад в общую реакцию здания.

6.4.3.4 Требования 6.4.3.2 могут считаться выполненными, если выполняется какое-либо из перечисленных ниже условий:

- сумма эффективных модальных масс для форм колебаний здания, принимаемых во внимание, должна быть не менее 90 % общей массы здания;
- принимаются во внимание все формы колебаний здания с эффективной модальной массой более 5 % общей массы.

П р и м е ч а н и е — Горизонтальная сила в основании F_{bk} , действующая в направлении приложения сейсмического воздействия, может быть выражена как: $F_{bk} = S_d(T_k)m_k$ при эффективной модальной массе m_k , соответствующей k -й форме колебаний.

6.4.3.5 При использовании пространственной модели здания, указанные в 6.4.3.4 условия должны быть проверены для каждого направления.

6.4.3.6 Если требования 6.4.3.3 не могут быть выполнены (например, в зданиях со значительным вкладом крутильной формы колебаний), то минимальное число учтенных в пространственном расчете форм колебаний k должно удовлетворять обоим условиям:

$$k \geq 3 \cdot \sqrt{n}; \quad (6.27)$$

$$T_k \leq 0,20 \text{ с}, \quad (6.28)$$

где k – число учитываемых форм колебаний здания;

n – количество этажей суперструктуры;

T_k – период, соответствующий k -й форме колебаний.

6.4.3.7 Если для расчетов используется пространственная модель здания, то случайные эффекты кручения могут определяться в соответствии с 6.4.1.7.

6.5 Нелинейный расчет по записям колебаний грунта во времени

6.5.1 Расчет зданий с системами сейсмоизоляции для всех типов моделей может выполняться с применением нелинейного расчета по записям колебаний грунта во времени. Нелинейный расчет по записям колебаний грунта во времени применяется в обязательном порядке, если работа системы сейсмоизоляции не может быть представлена эквивалентно линейной (т. е. если не выполняются условия 6.2.10). В этом случае сейсмическая реакция должна оцениваться путем расчета здания по записям колебаний грунта во времени, применяя математическое описание устройств, которое может адекватно и наиболее точно отражать работу системы в диапазоне деформаций и скоростей, предполагаемых при сейсмическом воздействии.

6.5.2 Расчет реакции здания во времени следует выполнять непосредственным численным интегрированием нелинейных дифференциальных уравнений движения с применением акселерограмм, описанных в 5.5, либо применением метода Рунге для решения тех же уравнений.

При применении метода Рунге допускается использовать в качестве системы базисных функций формы свободных недемпфированных колебаний здания с эффективными жесткостями каждого сейсмоизолирующего элемента в соответствии с 6.2.

6.5.3 Модели конструктивных элементов должны соответствовать

6.5.5–6.5.7, а также правилам, описывающим поведение элементов за пределами упругих циклов нагрузки-разгрузки. Эти правила должны адекватно и наиболее точно отражать рассеивание энергии в элементе в диапазоне амплитуд перемещений, ожидаемых при расчетном сейсмическом воздействии. Математические модели должны быть верифицированы на основании экспериментальных исследований.

6.5.4 В математической модели, применяемой для расчета в предположении упругой работы материалов конструктивных элементов здания, должна быть учтена нелинейная работа каждого сейсмоизолирующего элемента.

6.5.5 При необходимости, применяемая математическая модель должна быть расширена для анализа усилий и напряжений конструктивных элементов и учета их нелинейной работы. В этом случае можно применять билинейную зависимость «напряжения – деформации» для несущих элементов. Для железобетонных и каменных элементов начальная упругая жесткость билинейной зависимости «напряжения – деформации» должна соответствовать элементам конструкций без трещин. При приближенных расчетах железобетонных элементов и фрагментов кладки, в которых образуются трещины, допускается принимать коэффициент упругой деформации и жесткость на сдвиг сниженными в два раза по сравнению со значениями для элементов без трещин.

В элементах, в которых предполагается проявление упругопластического поведения во время нагружения, начальная упругая жесткость билинейной зависимости должна быть принята в виде прямой секущей жесткости к точке пластичности.

6.5.6 Если не указано иное, свойства элемента должны основываться на нормативных значениях свойств материала. Для новых конструкций, значения свойств материалов могут быть подсчитаны по соответствующим характерным значениям на основе информации о физико-механических характеристиках материалов, а также при осуществлении контроля этих свойств в процессе строительства.

6.5.7 Вертикальные нагрузки должны учитываться в соответствующих элементах математической модели. Осевые вертикальные нагрузки должны быть учтены при назначении зависимости «напряжения - деформации» для элементов конструкций.

6.5.8 Если реакция получена на основе не менее семи нелинейных расчетов по записям колебаний во времени, с движением грунта в соответствии с 5.5, то среднее значение реакции, определенное в результате всех этих расчетов, должно применяться как расчетное значение E_d при соответствующей проверке по 6.5.9. Иначе, при нелинейных расчетах наиболее неблагоприятное значение из всех реакций должно использоваться в расчетах как E_d .

6.5.9 Для всех конструктивных элементов, включая узлы и соответствующие ненесущие элементы, следует соблюдать следующее условие

$$E_d \leq R_d, \quad (6.29)$$

где E_d – величины расчетных комбинаций нагрузок при особом (сейсмическое воздействие) сочетании нагрузок;

R_d – соответствующее расчетное сопротивление элемента, вычисленное в соответствии с правилами, применимыми для используемого материала (с точки зрения характерных свойств материала и коэффициента надежности по материалу) и математическими моделями конструктивной системы здания.

6.5.10 Демпфирование, как правило, следует задавать непосредственно для каждого элемента сейсмоизоляции на основании экспериментальных данных.

6.6 Метод расчета с использованием модифицированного спектра ускорений

6.6.1 Общие положения

6.6.1.1 Нелинейный характер работы системы сейсмоизоляции допускается учитывать, используя график модифицированного спектра реакции ускорений.

6.6.1.2 Расчет субструктуры выполняется с применением формул, графиков и условий 6.2. Учитываются реакции от суперструктуры, сосредоточенные в местах опирания сейсмоизоляции на фундамент или субструктуру.

6.6.1.3 Сейсмические нагрузки определяются согласно разделу 5. График спектра отклика $S_e(T)$, определенный по 5.3, при расчете сейсмических нагрузок заменяется на график модифицированного спектра реакции ускорений.

6.6.1.4 Модифицированный спектр реакции ускорений строится с учетом региональных особенностей, конструктивного решения здания и грунтовых условий площадки строительства.

6.6.2 Модификация динамического воздействия для расчета зданий с системой сейсмоизоляции

6.6.2.1 Для расчета и построения графика спектра реакции ускорений применяется реальный и/или искусственный набор акселерограмм для рассматриваемого объекта, учитывающий особенности площадки строительства.

6.6.2.2 В случае, если система сейсмоизоляции устанавливается над фундаментной плитой, для расчета спектра реакции ускорения применяются исходные записи сейсмических воздействий в виде акселерограмм.

6.6.2.3 Если сейсмоизоляция устанавливается между субструктурой, включающей более двух подвальных или нескольких надземных этажей, и суперструктурой, следует учитывать изменение воздействия при его прохождении через субструктуру.

6.6.2.4 Для определения поэтажных откликов здания проводится предварительный расчет пространственной модели здания в упругой постановке при действии акселерограмм землетрясений.

Сейсмоизолирующие элементы моделируются упругими стержневыми элементами бесконечно большой жесткости. Результат такого расчета – воздействия в виде записей ускорений, скоростей, перемещений в уровне низа сейсмоизолирующих опор.

6.6.2.5 Нелинейный характер деформирования элементов сейсмоизоляции и повышенный уровень затухания учитывается в соответствии с 6.6.3. Если в здании установлено несколько типов (видов) сейсмоизолирующих опор, модифицированное динамическое воздействие должно определяться для каждого типа (вида) сейсмоизолирующих опор отдельно.

6.6.2.6 Для модифицированных динамических воздействий строятся частные спектры реакции ускорений для каждого вида воздействий и типа (вида) сейсмоизолирующих опор. Спектр ускорений, применяемый при расчете суперструктуры, – огибающий всего набора частных спектров реакции (рисунок 6.3). Общая схема проведения расчета здания с системой сейсмоизоляции при применении модифицированного сигнала показана на рисунках 6.4 и 6.5.

6.6.2.7 Для построения спектров реакций определяются максимальные перемещения, скорости и ускорения от заданного воздействия для всевозможных осцилляторов с собственными частотами, охватывающими диапазон не менее первых трех доминантных (основных) частот здания.

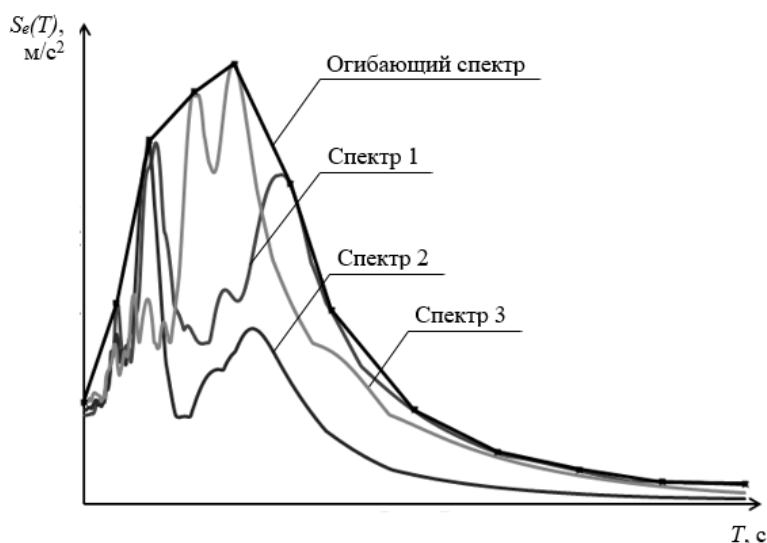
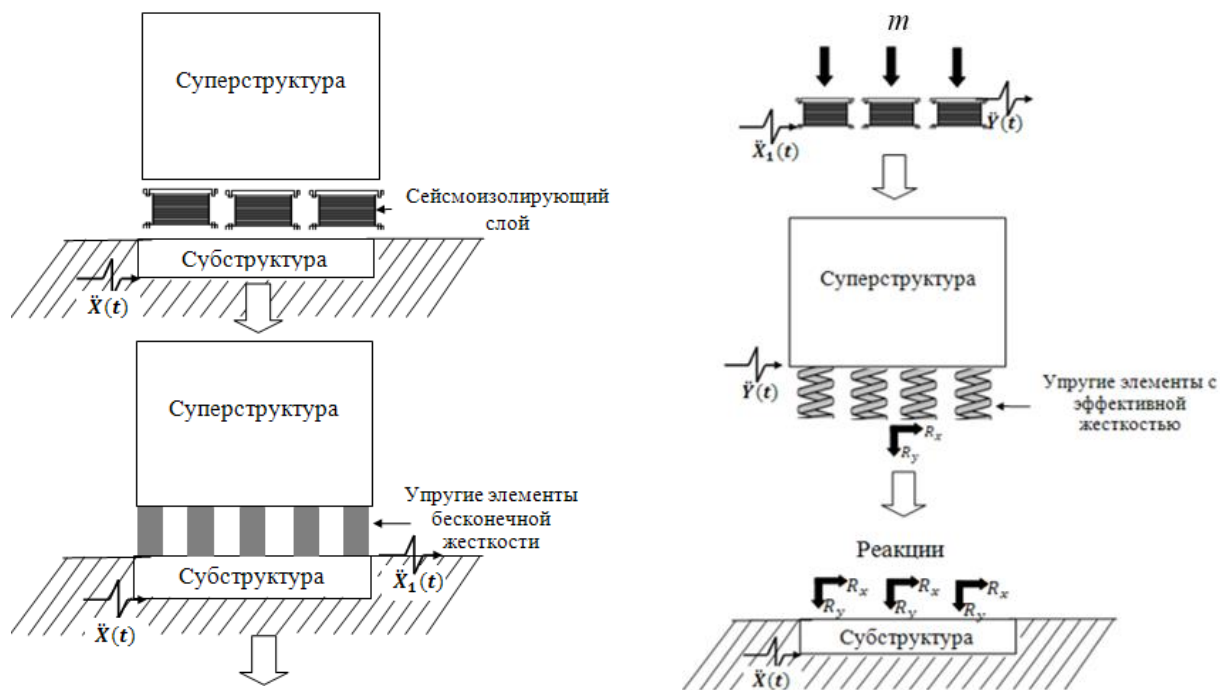


Рисунок 6.3 – Огибающий спектр реакции ускорений



m – масса суперструктуры; $\ddot{X}(t)$ – исходная акселерограмма; $\dot{X}_1(t)$ – динамическое воздействие на уровне низа сейсмоизолирующего слоя; $\dot{Y}(t)$ – модифицированное динамическое воздействие

Рисунок 6.4 – Схема проведения расчета здания с системой сейсмоизоляции на акселерограмму

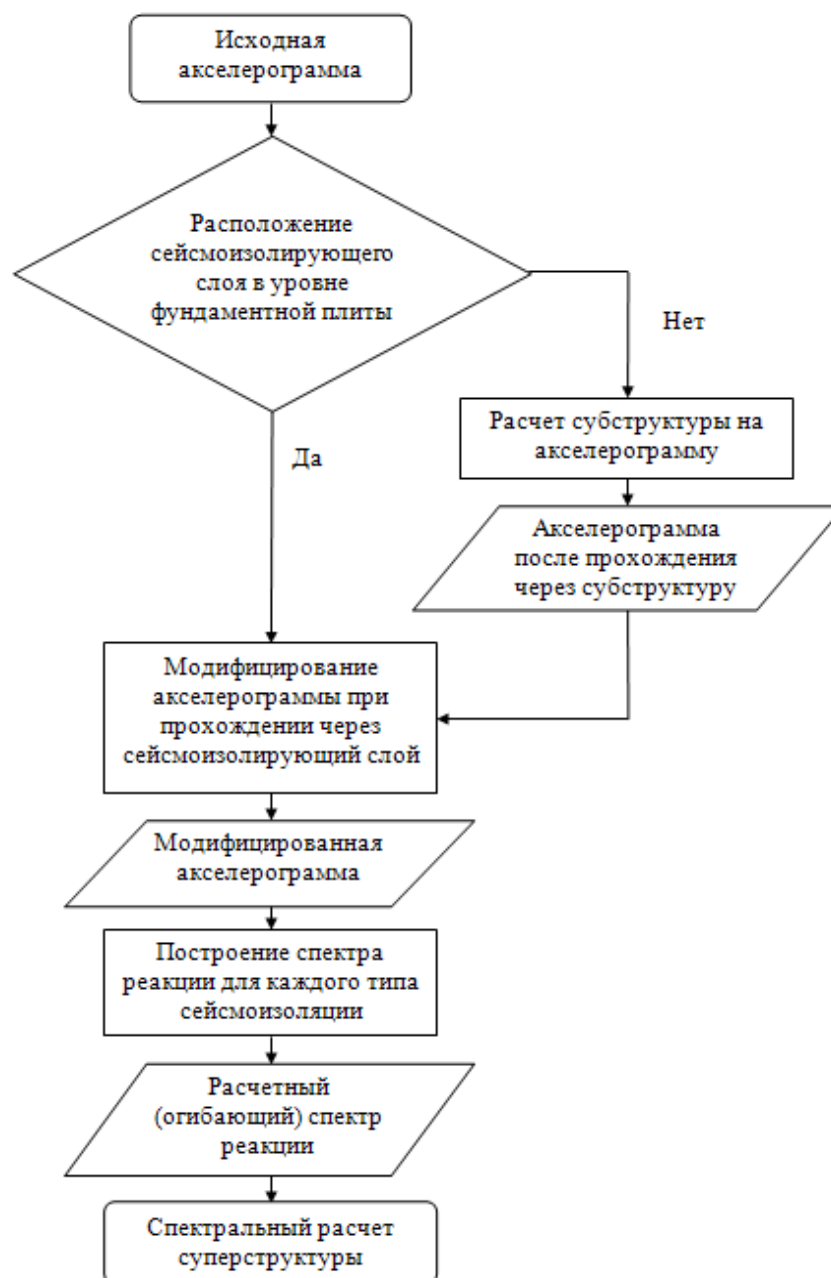


Рисунок 6.5 – Блок-схема проведения расчета на модифицированную акселерограмму

6.6.3 Методика модификации спектра реакции ускорений при моделировании здания как одномассовой системы с учетом билинейной диаграммы деформирования сейсмоизолирующих опор

6.6.3.1 Методика рекомендуется для расчета малоэтажных зданий (до пяти этажей), жестких, массивных, условно недеформируемых объектов. Спектры реакций ускорений, полученные для одномассовой системы (рисунок 6.6), т. е. без учета периода собственных колебаний суперструктуры, и спектры реакций, полученные для систем с несколькими массами, т. е. с учетом собственного периода колебаний надопорной конструкции, могут существенно различаться.

6.6.3.2 Решается дифференциальное уравнение движения

$$\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = -\ddot{X}(t), \quad (6.30)$$

где $k = \omega^2$ – характеризует жесткость опоры,

$$\omega_{1/2} = \begin{cases} \frac{2\pi}{T_1}, & \text{если } \dot{y} \leq RY \\ \frac{2\pi}{T_2}, & \text{если } \dot{y} \geq RY \end{cases} \text{ круговая частота.} \quad (6.31)$$

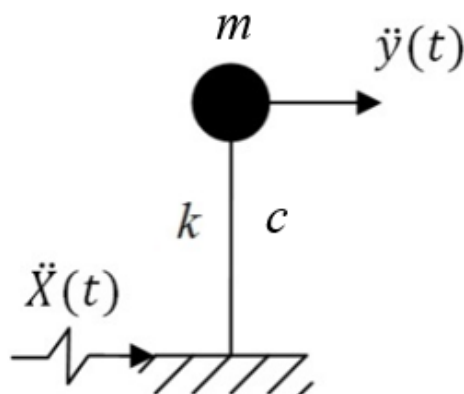


Рисунок 6.6 – Одномассовая модель здания для получения модифицированного спектра реакции ускорений

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1}} \text{ и } T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_2}}, \quad (6.32)$$

где m – масса суперструктуры, приложенная к сейсмоизолирующей опоре;

k_1 – горизонтальная начальная жесткость сейсмоизолирующей опоры;

k_2 – горизонтальная жесткость в пластической стадии сейсмоизолирующей опоры;

$c = 2\xi\omega$ – параметр затухания;

ξ – коэффициент демпфирования.

$RY = d_y \cdot \omega_1^2$ – максимальное допустимое значение ускорений в упругой области деформирования, рассматриваемой сейсмоизолирующей опоры.

6.6.3.3 Результат решения уравнения – набор записей ускорений, скоростей и перемещений в уровне верха сейсмоизолирующего слоя – модифицированное динамическое воздействие на суперструктуру. От модифицированного динамического воздействия строится спектр реакции ускорений, применяемый далее для расчета суперструктуры.

6.6.4 Методика модификации спектра реакции ускорений при моделировании здания как двухмассовой системы с учетом билинейной диаграммы деформирования сейсмоизолирующей опоры

6.6.4.1 Математическую модель здания в виде двухмассовой системы (учет жесткости системы сейсмоизоляции и суперструктуры, рисунок 6.7) следует применять для зданий средней этажности (5–16 этажей) и для уточнения результатов расчетов с учетом периода собственных колебаний суперструктуры при высокой податливости ее несущих конструкций. Модель

позволяет обеспечивать достаточную практическую точность результатов.

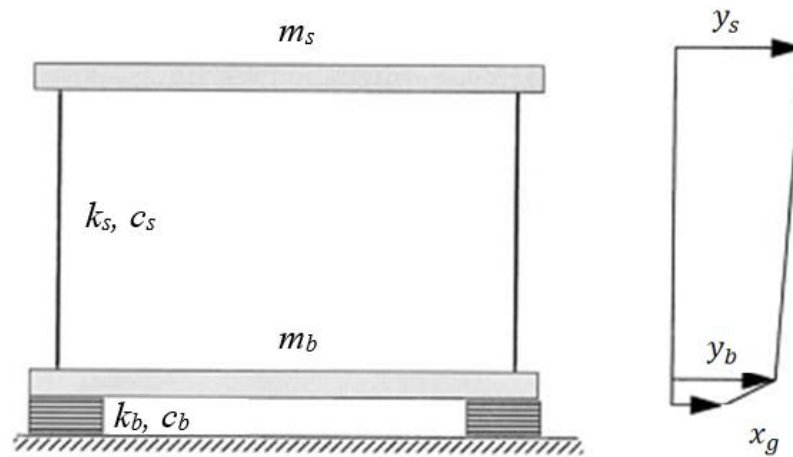
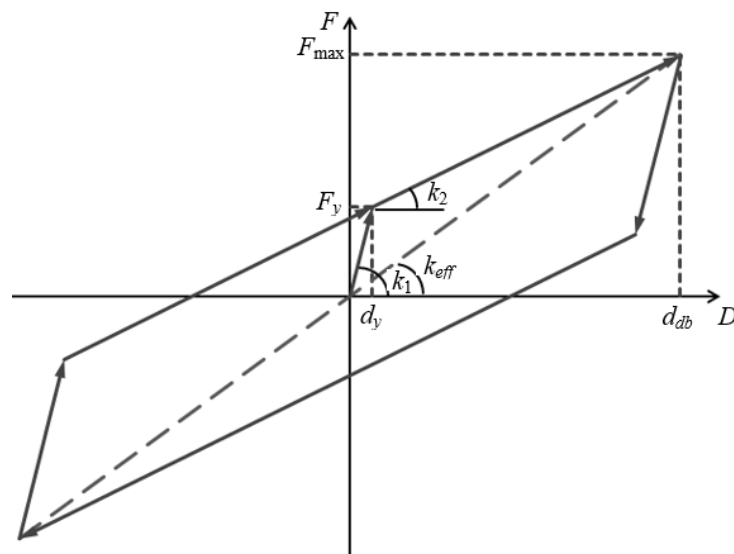
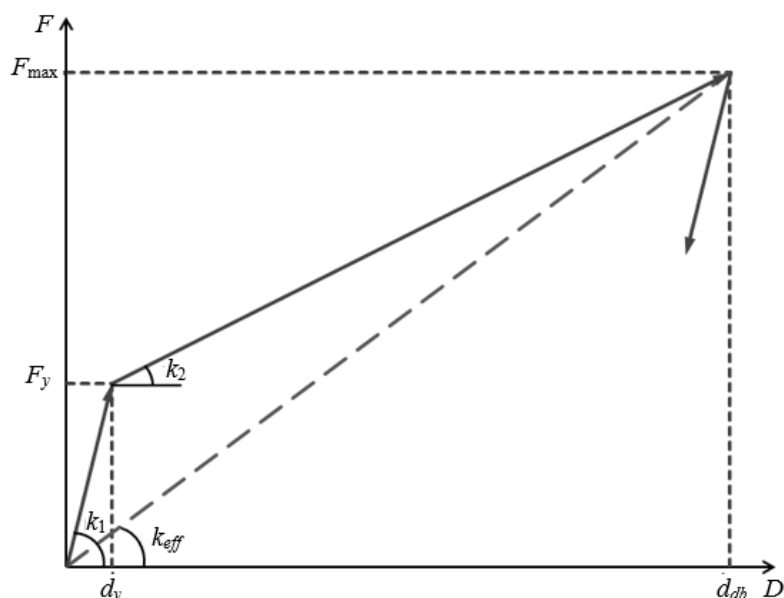


Рисунок 6.7 – Схема двухмассовой изолированной системы

6.6.4.2 При расчете используется билинейная диаграмма деформирования сейсмоизолирующей опоры (рисунок 6.8). Диаграмма деформирования принимается в соответствии с характеристиками сейсмоизолирующих опор, принятыми по результатам испытаний.

6.6.4.3 Для суперструктуры следует принимать упругое деформирование конструкций.





F_y – горизонтальная сила в предельной точке упругого деформирования; F_{\max} – горизонтальная сила при полном расчетном перемещении; d_y – горизонтальное перемещение в точке начала пластических деформаций; d_{db} – горизонтальное полное расчетное перемещение; k_1 – начальная горизонтальная жесткость; k_{eff} – эквивалентная жесткость при проектном перемещении; k_2 – горизонтальная жесткость в пластической стадии

Рисунок 6.8 – Билинейная диаграмма деформирования сейсмоизолирующей опоры

6.6.4.4 Система дифференциальных уравнений движения (6.33) решается относительно единичной массы. Единичной считается относительная суммарная масса суперструктуры.

$$\begin{aligned} (m_s + m_b)\ddot{y}_b + m_s\ddot{y}_s + c_b\dot{y}_b + k_b y_b &= -(m_s + m_b)\ddot{x}_g; \\ m_s\ddot{y}_b + m_s\ddot{y}_s + c_s\dot{y}_s + k_s y_s &= -m_s\ddot{x}_g; \end{aligned} \quad (6.33)$$

или в матричном виде

$$\begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_b \\ \ddot{y}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_b \\ \dot{y}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_b \\ y_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g, \quad (6.34)$$

где x_g – перемещение грунта (точки приложения воздействия);

y_b – перемещения на уровне верха сейсмоизолирующего слоя (нижней массы m_b);

y_s – перемещения верхней массы (массы m_s);

k_b – горизонтальная жесткость системы сейсмоизоляции до начала пластических деформаций;

k_s – горизонтальная жесткость суперструктуры;

$M = m_s + m_b$ – суммарная масса суперструктуры.

Соответствующие собственные частоты колебаний определяются по формулам

$$\omega_{b1}^2 = \frac{k_{b1}}{m_s + m_b}; \quad \omega_{b2}^2 = \frac{k_{b2}}{m_s + m_b}; \quad \omega_s^2 = \frac{k_s}{m_s}. \quad (6.35)$$

6.6.4.5 Демпфирующие коэффициенты ξ_b и ξ_s связаны с

демпфированием следующей зависимостью

$$2\omega_{b1}\xi_b = \frac{c_{b1}}{m_s + m_b}; \quad 2\omega_{b2}\xi_b = \frac{c_{b2}}{m_s + m_b}; \quad 2\omega_s\xi_s = \frac{c_s}{m_s}, \quad (6.36)$$

где k_{b1} – горизонтальная жесткость системы сейсмоизоляции до начала пластического деформирования;

k_{b2} – горизонтальная жесткость системы сейсмоизоляции в стадии пластического деформирования.

Окончательное модифицированное динамическое воздействие

$$R(t) = \begin{cases} \omega_{b1}^2 \cdot y_b(t), & \text{если } \omega_{b1}^2 \cdot y_b(t) \leq RY \\ RY + \omega_{b2}^2 \cdot (y_b(t) - d_y), & \text{если } \omega_{b2}^2 \cdot y_b(t) > RY, \end{cases} \quad (6.37)$$

где d_y – значение перемещения до начала пластических деформаций сейсмоизолирующего слоя.

6.6.4.6 Результат решения системы уравнений (6.33) – набор записей ускорений, скоростей и перемещений в уровне верха сейсмоизолирующего слоя – модифицированное динамическое воздействие на суперструктуру. От модифицированного динамического воздействия строится спектр реакции ускорений, применяемый далее для расчета суперструктуры.

6.6.5 Методика модификации спектра реакции ускорений при моделировании здания как многомассовой системы с учетом билинейной диаграммы деформирования сейсмоизолирующей опоры

6.6.5.1 Математическую модель здания в виде многомассовой системы (учет жесткости системы сейсмоизоляции и суперструктуры, рисунок 6.9) следует использовать для зданий большой этажности (более 16 этажей) и для уточнения результатов расчетов с учетом периода собственных колебаний суперструктуры при высокой податливости ее несущих конструкций. Модель позволяет обеспечить достаточную практическую точность результатов.

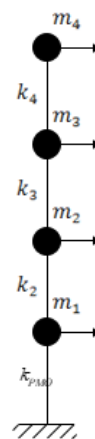


Рисунок 6.9 – Схема многомассовой системы

6.6.5.2 При расчете используется билинейная диаграмма деформирования сейсмоизолирующей опоры (рисунок 6.8). Диаграмма работы принимается в соответствии с характеристиками сейсмоизолирующих опор, принятыми по результатам испытаний.

6.6.5.3 Для суперструктуры следует принимать упругое деформирование конструкций.

6.6.5.4 При представлении здания с сейсмоизолирующим слоем в виде многомассовой системы, указываются массы и жесткости для каждой секции (этажа или группы этажей, собранных в одну массу) по высоте здания.

6.6.5.5 Для здания должны выполняться критерии регулярности по высоте, согласно 7.5.3.

При представлении в виде многомассовой системы регулярного по высоте здания массы равномерно распределены по высоте. Жесткость k отдельно взятой секции (этажа или группы этажей, собранных в одну массу) определяется из выражения

$$k = m \cdot \omega^2 = m \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2, \quad (6.38)$$

$$\text{где } T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (6.39)$$

Для нижнего яруса принимается горизонтальная жесткость применяемой сейсмоизолирующей опоры.

6.6.5.6 Решается система дифференциальных уравнений движения с относительной суммарной массой, равной единице.

В матричном виде система уравнений для n -массовой системы записывается в виде

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_1 + \dots + m_n & m_2 + \dots + m_n & \dots & m_n \\ m_1 + \dots + m_n & m_2 + \dots + m_n & \dots & m_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_n & m_n & \dots & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \dots \\ \ddot{y}_n \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} c_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & c_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dots \\ \dot{y}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{b1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{Bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} m_1 + \dots + m_n & m_2 + \dots + m_n & \dots & m_n \\ m_1 + \dots + m_n & m_2 + \dots + m_n & \dots & m_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_n & m_n & \dots & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g, \end{aligned} \quad (6.39)$$

где x_g – перемещение грунта (точки приложения воздействия);

y_1 – перемещения на уровне верха сейсмоизолирующего слоя (нижней массы m_1);

y_2, \dots, y_n – перемещения верхних масс (массы m_2, \dots, m_n);

k_{b1} – горизонтальная жесткость сейсмоизолятора до начала пластики;

k_{b2} – горизонтальная жесткость сейсмоизолятора при пластике;

k_2, \dots, k_n – поэтажная горизонтальная жесткость суперструктуры;

6.6.5.7 Поэтажные собственные частоты колебаний суперструктуры определяются по формулам:

$$\omega_{b1}^2 = \frac{k_{b1}}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}; \omega_{b2}^2 = \frac{k_{b2}}{m_1 + m_2 + \dots + m_n};$$

$$\omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2 + \dots + m_n}; \dots; \omega_n^2 = \frac{k_n}{m_n}. \quad (6.40)$$

6.6.5.8 Демпфирующие коэффициенты ξ_b и ξ_i связаны с демпфированием:

$$2\omega_{b1}\xi_b = \frac{c_{b1}}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}; 2\omega_{b2}\xi_b = \frac{c_{b2}}{m_1 + m_2 + \dots + m_n};$$

$$2\omega_2\xi_2 = \frac{c_{b2}}{m_2 + \dots + m_n}; \dots; 2\omega_n\xi_n = \frac{c_n}{m_n}. \quad (6.41)$$

6.6.5.9 Окончательное модифицированное динамическое воздействие на уровне верха сейсмоизолирующего слоя определяется по формуле 6.37.

6.6.5.10 Результат решения системы уравнений (6.40) – набор записей ускорений, скоростей и перемещений в уровне верха сейсмоизолирующего слоя – модифицированное динамическое воздействие на суперструктуру. От модифицированного динамического воздействия строится спектр реакции ускорений, применяемый далее для расчета суперструктуры.

7 Требования к проектированию зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции

7.1 Общие положения

7.1.1 Проектирование и конструирование антисейсмических устройств и их соединений с несущими элементами здания следует выполнять таким образом, чтобы обеспечивалась несущая способность устройств при сейсмических и несейсмических (ветровое и др.) воздействиях, без локальных или общих обрушений или отказов, тем самым сохраняя свою конструктивную целостность и остаточную несущую способность после сейсмических событий.

7.1.2 Следует обеспечивать повышенную надежность сейсмоизолирующих устройств путем умножения:

- расчетных горизонтальных сейсмических перемещений каждого сейсмоизолирующего элемента на коэффициент надежности по материалу $\gamma_x = 1,2$;

- расчетных вертикальных сейсмических сил в каждом сейсмоизолирующем элементе от гравитационных и сейсмических воздействий на коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_z = 1,1$.

П р и м е ч а н и е – В случаях, когда не используется система сейсмоизоляции, но применяются антисейсмические устройства, может быть по-прежнему целесообразно повышение надежности системы посредством введения коэффициента $\gamma_x > 1$; значение зависит от роли устройств в общей стабильности здания, типов применяемых устройств и будущего использования здания.

7.2 Требования к устройствам сейсмозащиты

7.2.1 Материалы, применяемые при проектировании и конструировании устройств сейсмозащиты и их соединений с зданием, должны соответствовать действующим нормативным документам.

7.2.2 Характеристики устройств должны учитывать окружающие условия (физические, биологические, химические и ядерные), воздействию которых может подвергаться устройство на протяжении срока службы здания.

7.2.3 Характеристики устройств должны учитывать явления старения и ползучести, которые могут произойти в течение срока службы устройства.

7.2.4 Характеристики устройств должны быть представлены репрезентативными значениями.

7.2.5 Характеристики устройства должны учитывать график изменения нагрузок и деформации, накапливаемых при циклическом воздействии.

7.2.6 Устройство любого типа должно проходить процедуру технической оценки, которая должна включать в себя проверки, гарантирующие, что устройство соответствует его функциональным требованиям. Процедура должна подтверждать, что устройство сохранит работоспособность в своей области применения на протяжении срока эксплуатации здания. Процедура оценки должна включать в себя, как минимум, следующее:

- описание диапазонов параметров, относящихся к рассматриваемому типу устройств, охватываемых процедурой оценки;
- метод оценки ожидаемого срока службы;
- доказательство способности устройства надежно и стабильно работать в течение всего срока службы;
- значения механических характеристик устройства;
- диапазон приемлемых условий окружающей среды;
- описание поведения за пределами проектного землетрясения для определения значений γ_m ;
- описание поведения устройства в различных условиях эксплуатации, включая все комбинации воздействий, а также физические явления, ожидаемые в течение срока эксплуатации, в частности, во время перемещения, вызываемого землетрясением;
- первичные испытания, охватывающие ожидаемые диапазоны применения соответствующих параметров.

7.2.7 Для устройства должен быть составлен отчет об оценке, включающий в себя все аспекты, рассматриваемые в ходе процедуры оценки. Отчет должен содержать, как минимум, список характеристик и описание устройства, область применения, основные законы, расчетную модель, если она включена в модель здания, включать в себя всю информацию касательно геометрических, физических, биологических, химических и механических характеристик и допусков.

7.3 Функциональные требования

7.3.1 Проектирование и конструирование устройств сейсмоизоляции и их соединения со зданием следует выполнять таким образом, чтобы они работали в соответствии с проектными требованиями и допусками в течение всего срока службы здания при ожидаемых механических, физических, химических, биологических параметрах и условиях окружающей среды.

7.3.2 Проектирование и конструирование устройств сейсмоизоляции и их соединения со зданием следует выполнять таким образом, чтобы обеспечивалась возможность их плановой проверки и замены во время срока эксплуатации здания.

Примечание – Для обеспечения исполнения данного требования необходимо, чтобы проект здания учитывал возможность доступа к устройствам как для оборудования, так и для персонала.

7.4 Конструктивные требования

7.4.1 Системы сейсмоизоляции следует предусматривать с применением одного или нескольких типов сейсмоизолирующих и/или демпфирующих устройств, в зависимости от конструктивного решения и назначения здания (жилые и общественные здания, архитектурные и исторические памятники, и др.), вида строительства – новое строительство, реконструкция, усиление, а также от сейсмологических и грунтовых условий площадки.

7.4.2 Места устройства систем сейсмоизоляции в плане следует располагать равномерно с учетом конфигурации здания и распределения вертикальных нагрузок. Расстояния между сейсмоизолирующими опорами под несущими стенами должны быть, как правило, не более 3 м. Предпочтительно устанавливать сейсмоизолирующие опоры в одном уровне.

7.4.3 При устройстве нескольких сейсмоизолирующих опор на одном опорном элементе расстояние между двумя сейсмоизолирующими опорами должно обеспечивать их установку и замену.

7.4.4 Дополнительные демпфирующие устройства, установленные в сейсмоизолирующем слое, должны быть расположены по периметру здания симметрично и равномерно.

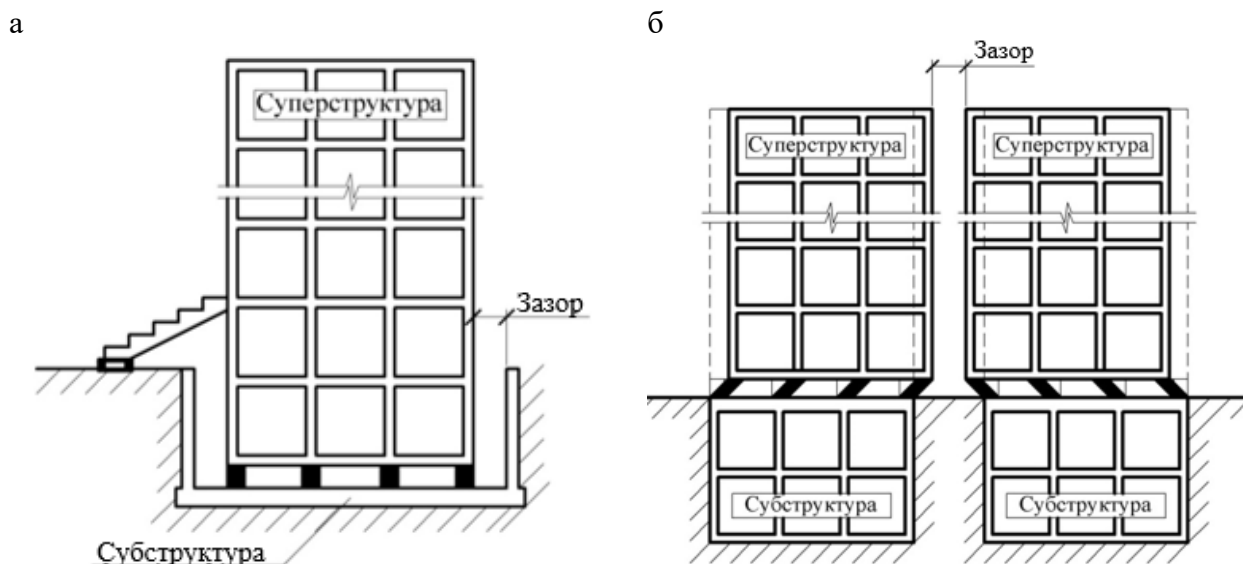
7.4.5 Сейсмоизолирующие опоры должны быть надежно соединены с конструкциями сейсмоизолированной и несейсмоизолированной частей здания.

7.4.6 Фундаменты под сейсмоизолирующими опорами могут быть ленточными, отдельно стоящими столбчатыми, плитными, сваями с ростверком и т. п. Отдельно стоящие столбчатые фундаменты должны быть соединены между собой жесткими связями. Не следует применять разные типы фундаментов в одном здании.

7.4.7 Между сейсмоизолированной частью здания и окружающим грунтом или динамически независимыми блоками здания следует предусматривать зазоры, достаточные для максимальных расчетных перемещений сейсмоизолированной части во всех направлениях при расчетных сейсмических воздействиях, наряду с другими необходимыми

мероприятиями, обеспечивающими возможность размещения, осмотра, технического обслуживания, центрирования и замены сейсмоизолирующих устройств в течение срока службы здания (рисунок 7.1).

7.4.8 Зазоры следует проектировать таким образом, чтобы исключалось попадание атмосферных осадков и мусора.



а – схема устройства зазоров между сейсмоизолированной частью здания и окружающим грунтом; б – схема устройства зазора между сейсмоизолированными динамически независимыми блоками здания

Рисунок 7.1 – Схемы устройства зазоров

7.4.9 Конструктивные элементы, расположенные выше и ниже сейсмоизолирующего слоя, должны быть жесткими в горизонтальном и вертикальном направлениях, для того чтобы включить все сейсмоизолирующие опоры в единую систему восприятия вертикальной нагрузки и сейсмического воздействия, а также минимизировать влияние неравномерных сейсмических колебаний грунта. Настоящее требования следует считать выполненным, если соблюдаются все нижеприведенные условия:

а) над и под системой сейсмоизоляции предусмотрены жесткие горизонтальные диафрагмы, выполненные в виде железобетонных плит или системы перекрестных балок, запроектированных с учетом всех возможных видов их напряженно-деформированного состояния. В устройстве таких диафрагм нет необходимости, если несущие конструкции выполнены в виде жестких коробчатых систем;

б) устройства, образующие систему сейсмоизоляции, соединены непосредственно с обоими концами упомянутых выше жестких диафрагм. В случае, если крепление к обоим концам жестких диафрагм выполнить невозможно, крепление устройств следует осуществлять с помощью вертикальных элементов, относительное горизонтальное перемещение в

сейсмической расчетной ситуации которых не превышает $1/20$ относительного перемещения системы сейсмоизоляции.

7.4.10 Следует предусматривать конструктивные мероприятия (ограничители, упоры и т. д.) обеспечивающие устойчивость сейсмоизолированной части здания против опрокидывания и неконтролируемого скольжения.

7.4.11 Система сейсмоизоляции должна быть запроектирована так, чтобы потенциальные возможности ударов об ограничители или упоры ограничивались с помощью соответствующих мероприятий. Требование считается выполненным, если потенциальных ударных эффектов удастся избежать благодаря применению соответствующих устройств (например, демпферов, амортизаторов и пр.).

7.4.12 Для минимизации эффектов кручения здания центр эффективной жесткости и центр демпфирования системы сейсмоизоляции должны находиться как можно ближе к проекции центра массы на поверхность сейсмоизолирующего слоя.

7.4.13 Для минимизации разного поведения сейсмоизолирующих устройств сжимающие напряжения, вызываемые в них постоянной нагрузкой, должны быть как можно более близкими.

7.5 Критерии конструктивной регулярности

7.5.1 Общие положения

7.5.1.1 Каждое здание следует характеризовать как здание регулярного или нерегулярного типа на основе конфигурации конструкций над системой сейсмоизоляции.

Примечание – Для зданий, состоящих из более, чем одного динамически независимого блока, классификация и соответствующие признаки, указанные в 7.5, относятся к одному отдельному динамически независимому блоку. В настоящем подразделе под «отдельным динамическим независимым блоком» подразумевается «здание».

7.5.1.2 При проектировании зданий регулярного и нерегулярного типов следует учитывать различия в применяемых расчетных моделях зданий и используемых методах расчета:

- расчетная модель здания может представлять собой упрощенную плоскую модель, в случае конструктивной системы здания регулярного типа, или пространственную модель при конструктивной системе здания нерегулярного типа;

- допускается упрощенный линейный метод расчета, в случае конструктивной системы здания регулярного типа, или требуется нелинейный расчет по записям колебаний грунта во времени при конструктивной системе здания нерегулярного типа.

7.5.2 Критерии регулярности зданий в плане

7.5.2.1 Здание должно быть симметрично в плане с равномерно распределенными жесткостями и массами в двух ортогональных направлениях.

7.5.2.2 Конфигурация плана должна быть компактной, т. е., каждое перекрытие должно быть разграничено многоугольной выпуклой линией.

Если имеются выступы (нерегулярности) в плане перекрытия (входящие углы или разрывы по периметру), то регулярность в плане следует считать удовлетворительной при условии, что эти нерегулярности не оказывают влияние на жесткость перекрытия в плане и разница в площадях, полученных с учетом каждой нерегулярности фактического очертания перекрытия и выпуклой многоугольной линией, окружающей площадь перекрытия, не превышает 5 %.

7.5.2.3 Жесткость перекрытий в плане должна быть большей в сравнении с поперечной жесткостью вертикальных несущих элементов здания, поскольку деформации перекрытий не должны влиять на распределение сил между вертикальными несущими элементами. Особое внимание должно быть уделено зданиям, имеющим в плане Г-, С-, Н-, I- и X-образные формы. Жесткость конструкций по контуру здания должна быть сопоставима с жесткостью конструкций центральной части.

7.5.2.4 Вытянутость здания в плане $\lambda = L_{\max}/L_{\min}$ должна быть не более четырех, где L_{\max} и L_{\min} – соответственно больший и меньший размеры здания в плане, измеренные в ортогональных направлениях.

7.5.2.5 При расчете здания эксцентриситет и радиус кручения на каждом уровне и для каждого из направлений x и y должны соответствовать двум условиям (выражения приведены для расчета по оси y)

$$e_{0x} \leq 0,30r_x; \quad (7.1)$$

$$r_x \geq l_s, \quad (7.2)$$

где e_{0x} – расстояние между центром масс и центром жесткостей по оси x , нормальное к анализируемому направлению;

r_x – квадратный корень из отношения значений крутильной жесткости к горизонтальной жесткости в направлении оси y (радиус кручения);

l_s – радиус вращения массы перекрытия в плане (квадратный корень отношения полярного момента инерции массы перекрытия в плане относительно центра масс перекрытия к массе перекрытия).

7.5.2.6 В одноэтажном здании центр жесткости определяется как центр жесткости всех основных элементов, воспринимающих сейсмическое воздействие. Радиус кручения r определяется как корень квадратный отношения общей жесткости при кручении относительно центра горизонтальной жесткости к общей горизонтальной жесткости по одному из направлений, принимая во внимание все основные элементы, воспринимающие сейсмическое воздействие в рассматриваемом направлении.

7.5.2.7 В многоэтажном здании можно только приблизительно определить центр жесткости и радиус кручения. Упрощенное определение этих понятий для классификации регулярности здания в плане и приближенного анализа крутильных эффектов в частных случаях определяется, если выполняются следующие два условия:

а) все несущие элементы, такие как диафрагмы, стены, рамы (каркасы), воспринимающие горизонтальную нагрузку непрерывны по всей высоте суперструктуры;

б) формы деформирования отдельных систем при горизонтальных нагрузках отличаются незначительно. Это условие выполняется в случае каркасных или стеновых систем. Для рамно-связевых систем это условие в общем случае не выполняется.

7.5.2.8 В каркасных и стеновых системах, в которых преобладают изгибные деформации, положение центров жесткостей и радиусов кручения всех этажей здания следует вычислять так же, как и положения моментов инерции горизонтальных сечений вертикальных элементов. Если наравне с изгибными деформациями возникают существенные деформации сдвига, то их следует учитывать с помощью эквивалентного момента инерции поперечного сечения.

7.5.3 Критерии регулярности по высоте

7.5.3.1 Несущие элементы, такие как ядра жесткости, стеновые системы или рамы, воспринимающие горизонтальную нагрузку, должны быть непрерывными по всей высоте здания от фундамента до покрытия.

7.5.3.2 Поперечную жесткость и массы отдельных этажей допускается изменять постепенно, без резких изменений по высоте здания.

7.5.3.3 В каркасных зданиях отношение фактической несущей способности одного этажа к требуемой несущей способности, полученной расчетным путем, не должно меняться между соседними этажами.

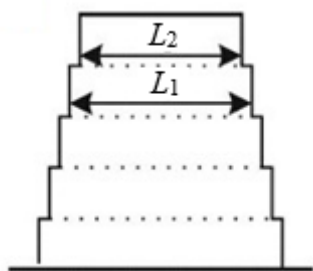
7.5.3.4 При наличии выступов следует выполнять следующие дополнительные условия:

а) при выступах, расположенных симметрично относительно оси, выступ на любом этаже не должен превышать 20 % предыдущего размера в плане в направлении выступа (рисунки 7.2,а и б);

б) для отдельных выступов при высоте менее 15 % общей высоты основной конструктивной системы здания выступ должен быть не больше 50 % основного размера в плане (рисунок 7.2,в). В этом случае, конструкция зоны основания в пределах горизонтальной проекции верхних этажей должна быть запроектирована в расчете на восприятие не менее 75 % горизонтальной силы, которая может возникнуть в этой зоне в подобном здании без увеличения основания;

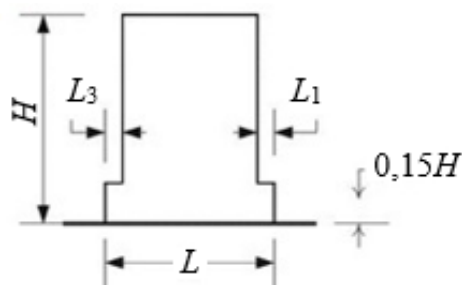
в) если выступы на каждом фасаде расположены несимметрично, то сумма поверхности выступов на всех этажах должна быть не больше 30 % размера в плане на первом этаже над фундаментом или над верхней частью жесткого основания, а отдельные выступы не должны превышать 10 % предыдущего размера в плане (рисунок 7.2,г).

а



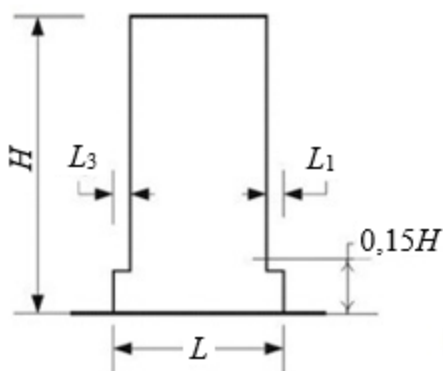
$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0,20$$

б



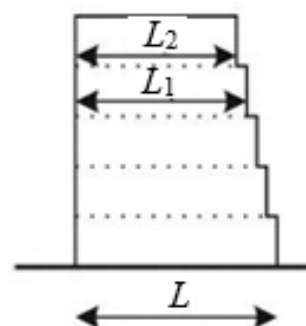
$$\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0,20$$

в



$$\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0,50$$

г



$$\frac{L - L_2}{L} \leq 0,30; \frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0,10$$

Рисунок 7.2 – Критерии регулярности по высоте

7.6 Требования к несущим элементам и инженерным коммуникациям

7.6.1 Поведение несущих элементов здания не должно представлять опасность для людей и оказывать отрицательное влияние на реакцию несущих элементов здания.

7.6.2 Инженерные коммуникации здания, пересекающие сейсмоизолирующий слой, зазоры между надземной частью здания и окружающим грунтом или зазоры между отдельными динамически независимыми блоками здания, должны рассчитываться на безопасное относительное взаимное перемещение с учетом коэффициента γ_x в 7.1.2.

7.6.3 Инженерные коммуникации между сейсмоизолированной и несейсмоизолированной частями здания не должны препятствовать относительным перемещениям этих частей.

7.6.4 Следует убедиться, что податливость таких коммуникаций достаточно велика по сравнению с податливостью системы сейсмоизоляции и суммарная реакция коммуникаций не вносит заметных возмущений в движение сейсмоизолированной части здания.

7.6.5 При необходимости в коммуникации следует включать гибкие соединения и компенсаторы в уровне сейсмоизолирующего слоя.

8 Рекомендации по монтажу и эксплуатации систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции

8.1 Общие положения

8.1.1 Монтаж сейсмоизолирующих опор следует осуществлять в соответствии с утвержденным проектом производства работ (далее – ППР) по монтажу систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции зданий.

8.1.2 Принципиальные решения, включенные в ППР, следует согласовывать с авторами проекта систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции зданий.

8.1.3 В ППР на монтаж систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции зданий должно быть предусмотрено следующее:

- последовательность установки конструктивных элементов;
- мероприятия, обеспечивающие требуемую точность установки;
- мероприятия по огнезащите и защите элементов от коррозии;
- контроль качества выполненных работ и безопасные условия труда.

8.1.4 Все технологические процессы и операции монтажа систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции зданий, а также монтажная оснастка должны быть разработаны в ППР.

8.1.5 К акту сдачи объекта в эксплуатацию прикладывается документация, перечень которой указывается в проекте здания и в ППР на монтаж систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции зданий.

8.2 Общие требования к монтажу изделий

8.2.1 До начала работ по установке закладных пластин с анкерными стержнями следует выполнять геодезическую разбивку расположения центра и осей опор на поверхности фундамента/обвязочной балки в соответствии с проектом системы сейсмоизоляции и СП 126.13330.

8.2.2 Следует проверять наличие, исправность и готовность к работе всего оборудования и механизмов в соответствии с инструкциями их эксплуатации.

8.2.3 Визуальный осмотр сейсмоизолирующих устройств следует выполнять на предмет отсутствия внешних дефектов и повреждения составных частей изделий.

8.2.4 При входном контроле сейсмоизолирующих опор должно быть проверено наличие:

- комплектности устройств и их соответствие требованиям проектной документации;
- сопроводительного документа поставщика (сертификата, декларации, свидетельства и т. п.) об их качестве (соответствии требованиям нормативных документов на их изготовление);

- сопроводительных документов поставщика изделий, материалов, оборудования и механизмов и пригодность их к применению – проверяется выполнением документарной проверки, а отсутствие повреждений упаковок и самих изделий, материалов, оборудования и механизмов – визуальным осмотром.

8.2.5 Сейсмоизолирующие опоры следует подвергать входному контролю, который заключается во внешнем визуальном осмотре и измерениях, проверке наличия маркировок и ярлыков, сопоставлении результатов внешнего осмотра и измерений с данными, приведенными в сертификатах и проектной документации.

8.2.6 Работы по монтажу систем сейсмоизоляции следует осуществлять в следующей последовательности (рисунок 8.1):

1) возводятся несущие конструкции до уровня сейсмоизолирующих опор и нижних обвязочных балок 1;

2) устанавливаются нижние закладные детали 2 с приваренными к их нижней части гайками и анкерными стержнями;

3) устанавливаются в проектное положение сейсмоизолирующие опоры 5, с закрепленными на опорных пластинах 4 верхними закладными деталями 3 с анкерными выпусками арматуры;

4) устанавливается опалубка, выполняются надпорные монолитные перекрестные балки 6;

5) возводятся несущие конструкции перекрытий 8 и вышележащие конструкции здания 7.

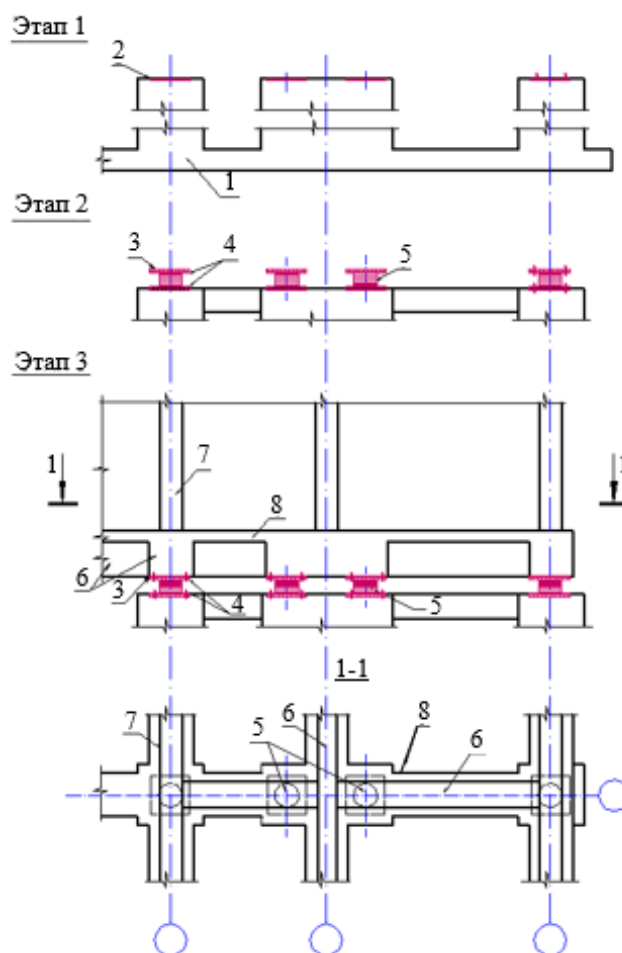


Рисунок 8.1 – Последовательность производства работ по монтажу систем сейсмоизоляции

8.2.7 Установку и закрепление нижней закладной детали с приваренными к ее нижней части гайками и анкерными стержнями следует осуществлять в следующей последовательности:

- определяется позиция подъема и ось закладной детали тахеометром или нивелиром, отметки фиксируются;
- регулируется подъем и положение закладной детали с анкерами, используя различной толщины деревянные клинья или другие вспомогательные приспособления;
- проверяется уровень и положение в осях нижней стальной пластины с анкерами;
- выполняется ее фиксация в проектном положении точечной сваркой анкерных выпусков пластины к стержням арматуры основания под опору;
- деревянные клинья вынимаются и повторно проверяется горизонтальность, соосность и отметка по высоте всех закладных деталей;
- после проверки, выполняются монолитные работы. Перед бетонированием отверстия для болтов в пластине следует защитить от попадания бетонной смеси.

8.2.8 Установку и защиту сейсмоизолирующей опоры следует выполнять в следующей последовательности:

- установить верхние и нижние соединенные пластины на сейсмоизолирующую опору;
- при достижении бетоном 75 % проектной прочности, очистить отверстия под болты в закладных деталях. Смазать отверстия смазочным материалом, создавая изоляцию из слоя смазочного материала и упругой прокладки для обеспечения возможности замены опоры, при необходимости;
- установить сейсмоизолирующую опору в проектное положение;
- закрепить нижнюю соединительную пластину опоры к нижней закладной детали;
- проверить установленную опору. Убедиться, что установка опоры выполнена в соответствии с требованиями проекта;
- выполнить антикоррозионную защиту пластин и внешних соединительных болтов. Закрывать сейсмоизолирующие опоры от повреждения деревянными рамами на период строительства;
- выполнить сварку верхних стержней стальной пластины со стержнями верхней арматуры надопорной конструкции;
- приступить к возведению опалубки и бетонированию верхней обвязочной балки.

8.2.9 Установка каждой сейсмоизолирующей опоры должна сопровождаться протоколом установки сейсмоизолирующих опор в проектное положение в соответствии с приложением Г.

8.3 Контроль качества установки сейсмоизолирующих опор

8.3.1 Перед установкой сейсмоизолирующих опор отметка по высоте отклонения нижней плоскости закладных деталей должна быть не более 5 %. После установки отметка по высоте отклонения верхней плоскости сейсмоизолирующих опор должна быть не более 10 %.

8.3.2 Погрешность не должна быть более 5,0 мм между осями установленной сейсмоизолирующей опорой и проектным положением.

8.3.3 Погрешность отметки по высоте между значением у смонтированной сейсмоизолирующей опоры и требуемой по проекту не должна быть более 5,0 мм.

8.3.4 Различие высот между сейсмоизолирующими опорами на одном основании не должно быть более 5,0 мм.

8.4 Общие требования по замене сейсмоизолирующих опор

8.4.1 В случае возникновения необходимости замены сейсмоизолирующих опор в существующем здании следует разработать ППР по их замене.

8.4.2 При обнаружении каких-либо дефектов у опоры, следует проводить анализ возникшей опасности и выполнять визуальный осмотр соседних сейсмоизолирующих опор.

8.4.3 Замену сейсмоизолирующих опор следует выполнять с помощью домкратов. Количество и грузоподъемность домкратов назначается в зависимости от вертикальной нагрузки, действующей на опору, с коэффициентом запаса не менее 1,5.

8.4.4 С двух противоположных сторон от заменяемой опоры должны быть установлены монтажные столы. Верхний уровень столов должен быть на одном уровне с закладной деталью нижней балки крепления опоры. Один монтажный стол предназначен для размещения старой опоры. Другой монтажный стол предназначен для размещения на нем новой опоры.

8.4.5 Заменяемая опора освобождается от соединительных болтов, фиксирующих ее к закладным пластинам нижней и верхней обвязочных балок.

8.4.6 Для освобождения опоры от действующей на нее вертикальной нагрузки, производится поддомкрачивание конструкций над опорой до появления просвета в 2–3 мм. Этот просвет позволяет вытащить опору из проектного положения.

8.4.7 Заменяемая опора передвигается на свободный, заранее подготовленный, монтажный стол. Новая опора передвигается с монтажного стола в проектное положение. Установленная опора крепится болтами к верхней и нижней закладным пластинам.

8.4.8 После визуального осмотра установленной опоры производится сброс нагрузки с домкратов и передача соответствующего веса здания на опору. Производится окончательное закрепление опоры с помощью болтов.

8.4.9 Удостоверившись в полной передаче нагрузки на опору, производится демонтаж домкратов.

8.4.10 После завершения установки опоры следует выполнять антикоррозионную защиту пластин и внешних соединительных болтов.

8.5 Общие требования по эксплуатации зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции

8.5.1 Для зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции должны быть разработаны инструкции для эксплуатации, контроля и периодического мониторинга зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции, которая должна храниться весь период эксплуатации здания.

8.5.2 Инструкции для эксплуатации, контроля и периодического мониторинга зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции, следует согласовывать с авторами проекта систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции зданий.

8.5.3 В инструкции по эксплуатации, контролю и периодическому мониторингу зданий должны быть отражены цели, задачи, основные контролируемые параметры и сроки проведения контроля и мониторинга систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции.

8.5.4 В зависимости от вида проверку систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции следует осуществлять в соответствии с таблицей 8.1.

Т а б л и ц а 8.1 – Виды проверок систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции

Вид проверки	Время проведения проверки	Метод	Состав инспекции
1 По завершению строительства здания	На момент завершения строительства	Визуальный, инструментальный и натурный (определение периода основного тона собственных колебаний)	Проверка систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции; - проверка инженерных коммуникаций (гибких соединений), пересекающих слой сейсмоизоляции; - проверка антисейсмических швов (размеры, отсутствие препятствий для свободного перемещения отдельных динамически независимых блоков зданий); - проверка наличия коррозионной и огнезащиты систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции
2 Ежегодная проверка	Ежегодно, кроме случаев, когда запланирована периодическая проверка	Визуальный	Визуальный осмотр элементов, из состава инспекции по завершению строительства здания (пункт 1 настоящей таблицы)
3 Периодическая проверка	Каждые 5 лет и 10 лет после завершения строительства здания и каждые 10 лет после этого	Визуальный, инструментальный, лабораторный или натурный (при необходимости). В случае лабораторных испытаний следует проверять не менее трех устройств каждого типа	Проверка систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции; - проверка инженерных коммуникаций (гибких соединений), пересекающих слой сейсмоизоляции
4 Внеплановая проверка	После аварий техногенного характера (пожары, взрывы) и стихийных бедствий (ураганных	Визуальный	Визуальный осмотр элементов, из состава ежегодной инспекции (пункт 2 настоящей таблицы). Цель проверки – выявление поврежденных частей и быстрое уведомление об этом

Вид проверки	Время проведения проверки	Метод	Состав инспекции
	ветров, землетрясений и цунами)		собственника здания и разработчика проекта системы сейсмозащиты
5 Детальная проверка	При обнаружении повреждений (в ходе внеплановой проверки) или изменения динамических характеристик здания более чем на 10% (по результатам инженерно-сейсмометрического мониторинга)	Визуальный, инструментальный и лабораторный или натурный. В случае лабораторных испытаний следует проверять не менее трех устройств каждого типа	Состав работ должен быть определен по результатам внеплановой проверки
6 После ремонта или замены элементов системы	На момент завершения ремонта или замены элементов системы	Визуальный, инструментальный и натурный (определение периода основного тона собственных колебаний)	Проверка систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции затронутых в процессе ремонта

8.5.5 Элементы системы сейсмоизоляции и системы динамического регулирования сейсмической реакции зданий, подвергающиеся проверке, приведены в таблице 8.2.

Т а б л и ц а 8.2 – Элементы систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции, подвергающиеся проверке

Позиция	Устройство, элемент	Элемент	Предмет осмотра
Устройства сейсмозащиты	Сейсмоизолирующие опоры	Эластомерная опора; эластомерная опора со свинцовым сердечником; скользящие опоры	Внешний вид; состояние стальных деталей; состояние соединительных деталей; соосность
	Устройства диссипации энергии	Гистерезисный демпфер	Внешний вид; состояние стальных деталей; состояние соединительных деталей; диапазон перемещений
		Жидкостно-вязкостный демпфер	Внешний вид; состояние стальных

			деталей; состояние соединительных деталей; утечка масла
Огнезащита и коррозионная защита	Огнезащитный материал и коррозионное покрытие систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции		Внешний вид
Антисейсмические швы	Антисейсмические швы		Горизонтальные и вертикальные швы
	Положение сейсмоизолированной части здания		Остаточные смещения
Инженерные системы	Гибкие соединения	Водопровод; канализация; газ; электрические сети; другие системы	Внешний вид; состояние соединений; остаточные смещения

9 Рекомендации по мониторингу зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции

9.1 Для получения достоверной информации о работе систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции (далее – системы сейсмозащиты), контроля технического состояния этих систем, а также накопление фактического материала о поведении зданий с такими системами при динамических воздействиях различного характера и дальнейшего анализа полученных данных для оценки необходимости выполнения работ по их техническому обслуживанию, ремонту или замене следует предусматривать установку инженерно-сейсмометрических станций наблюдения согласно СП 330.1325800, с учетом особенностей применяемой системы сейсмозащиты в соответствии с настоящим разделом. Для зданий с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции следует разрабатывать программу мониторинга динамического поведения, учитывающую объемно-планировочные и конструктивные решения зданий, а также цели, задачи и назначение использования инженерно-сейсмометрической станции. Программа мониторинга здания с системами сейсмоизоляции и системами динамического регулирования сейсмической реакции должна быть согласована с разработчиком проекта системы сейсмозащиты.

9.3 Функциональное оснащение станции инженерно-сейсмометрических наблюдений должно предусматривать возможность решения следующих задач:

- регистрации ускорений и/или скоростей в заданных на здании точках регистрации, по установленным направлениям, в определенном диапазоне частот и амплитуд колебаний с заданной частотой регистрации;
- получения информации в определенном диапазоне частот колебаний об относительных перемещениях на объекте в точках регистрации;
- непрерывного сравнения измеряемых параметров колебаний с установленными предельными значениями ускорений и/или скоростей и относительных перемещений;
- получения периодических записей измеренных данных в течение установленного интервала времени на энергонезависимые носители информации – при отсутствии превышения предельных значений (штатный режим);
- включения станции на непрерывную запись (на энергонезависимые носители) измеряемых данных при достижении (или превышении) предельных значений ускорений и/или перемещений, до окончания этого превышения (установления штатного режима) или в течение заданного времени;
- сохранения для дальнейшей обработки данных, полученных при регистрации за определенное время до момента наступления этого превышения – в случае регистрации превышения предельных значений;
- документирования всех событий и процессов, связанных с мониторингом, с заданной периодичностью и в соответствии с согласованной формой отчетности, передачу этих отчетов по каналам связи и записью информации на электронные носители информации.

9.4 Расположение измерительных пунктов на регулярных в плане и по высоте сейсмоизолированных зданиях простой геометрической формы следует осуществлять в соответствии с таблицей 9.1 по схемам на рисунках 9.1–9.4. Допускается иное расположение измерительных пунктов, обеспечивающее регистрацию более детального поведения здания во время землетрясений.

Т а б л и ц а 9.1 – К определению схем расположения измерительных пунктов для сейсмоизолированных зданий

Схема расположения измерительных пунктов	Совпадение центра масс и центра жесткостей	$\frac{L}{B}$	$\frac{T_{eff}}{T_f}$
1	+	<3	>3
2	+	>3	>3
3	+	<3	<3
2	–	<3	>3
2	–	>3	>3
4	–	<3	<3
Обозначения: L – длина здания; B – ширина здания. П р и м е ч а н и е – Отношение T_{eff} / T_f позволяет учитывать гибкость надземной сейсмоизолированной части здания (суперструктуры) при назначении схемы расположения и количества измерительных пунктов.			

9.5 В случае нерегулярности в плане и/или по высоте, а также сложной геометрической формы здания с системой сейсмозащиты, количество измерительных пунктов и их расположение следует устанавливать индивидуально для каждого здания, учитывая объемно-планировочные и конструктивные решения, а также особенности применяемой системы сейсмозащиты.

9.6 На сейсмоизолированных зданиях, удовлетворяющих параметрам пункта 1 таблицы 9.1, размещение измерительных пунктов следует осуществлять в соответствии с рисунком 9.1.

Измерительные пункты в здании следует располагать вблизи его центра жесткости в следующих точках:

- в уровне фундамента (пол подвала/верх фундамента);
- в уровне низа сейсмоизолирующей опоры;
- в уровне верха сейсмоизолирующей опоры;
- в уровне плиты покрытия.

Створы измерительных пунктов следует располагать в следующих точках:

- створ из датчиков, осуществляющих регистрацию трех компонент колебаний здания, – вблизи центра жесткости здания;
- два других створа – в плоскости большей оси здания, проходящей через его центр жесткости, на равных удалениях от этого центра. Оба створа должны осуществлять регистрацию горизонтальной компоненты колебаний здания в уровнях низа и верха сейсмоизолирующих опор.

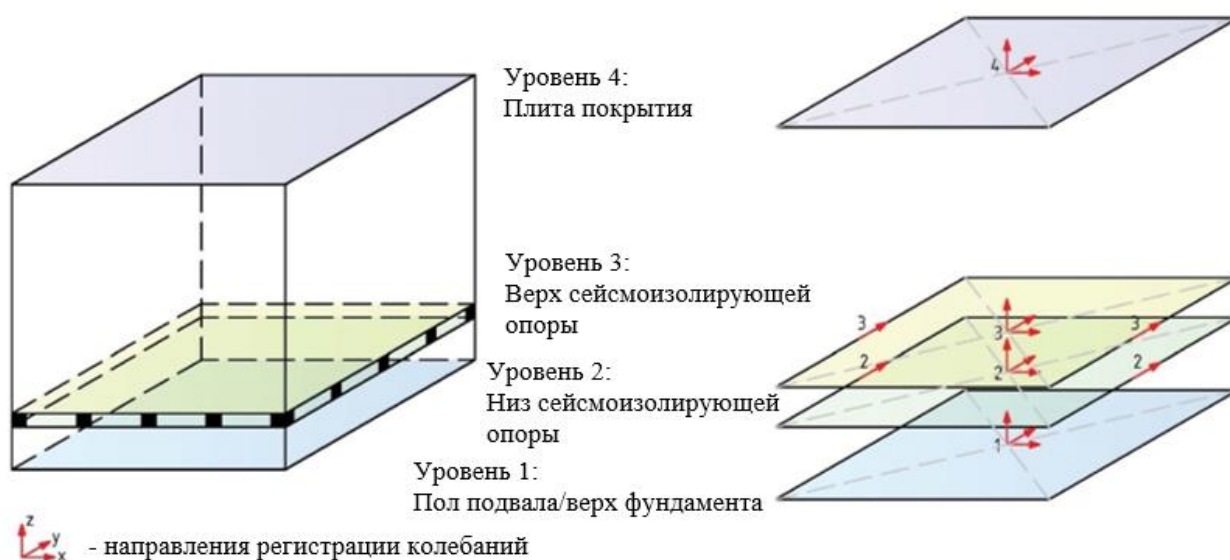


Рисунок 9.1 – Расположение измерительных пунктов по схеме 1

9.7 На сейсмоизолированных зданиях, удовлетворяющих параметрам пунктов 2, 4, 5 таблицы 9.1, размещение измерительных пунктов следует осуществлять в соответствии с рисунком 9.2.

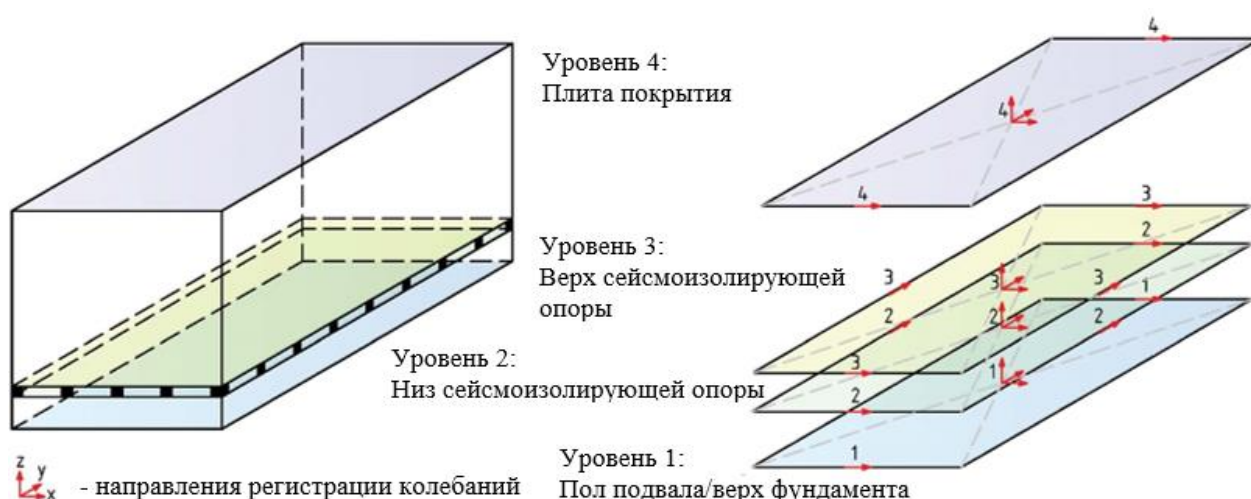


Рисунок 9.2 – Расположение измерительных пунктов по схеме 2

Створы измерительных пунктов следует располагать в следующих точках:

- створ из датчиков, осуществляющих регистрацию трех компонент колебаний здания, – вблизи центра жесткости здания;
- два других створа – в плоскости большей оси здания, проходящей через его центр жесткости, на равных удалениях от этого центра. Оба створа должны осуществлять регистрацию горизонтальной компоненты колебаний здания.

9.8 В случае, если отношение периода основного тона собственных колебаний сейсмоизолированного здания к периоду колебаний жестко защемленной в основании сейсмоизолированной части здания менее трех (параметры пунктов 3 и 6 таблицы 9.1), то по высоте здания следует предусматривать не менее одного дополнительного измерительного пункта в соответствии с рисунком 9.3. Количество дополнительных измерительных пунктов зависит от высоты сейсмоизолированной части здания и его гибкости и определяется из расчета: один измерительный уровень на 3–4 этажа здания.

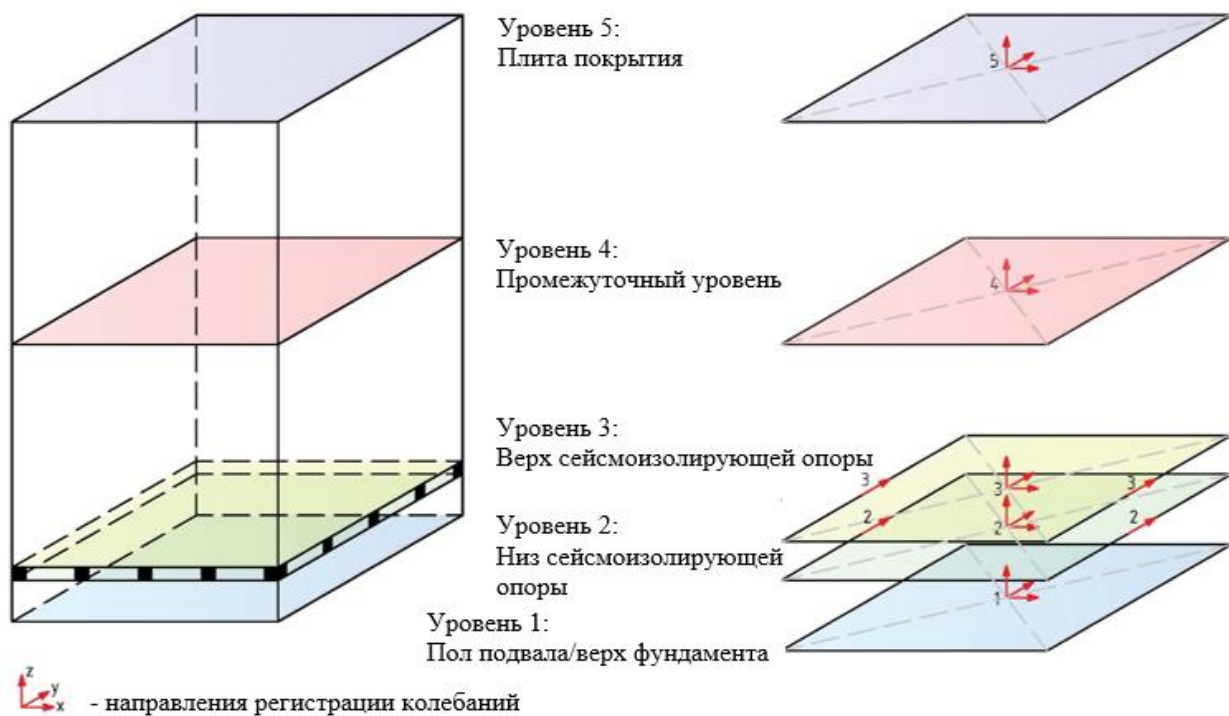


Рисунок 9.3 – Расположение измерительных пунктов по схеме 3

9.9 На сейсмоизолированных зданиях, удовлетворяющих параметрам пункта 6 таблицы 9.1, размещение измерительных пунктов следует осуществлять в соответствии с рисунком 9.4 с учетом требований по организации дополнительных измерительных пунктов по высоте здания в соответствии с 9.8.

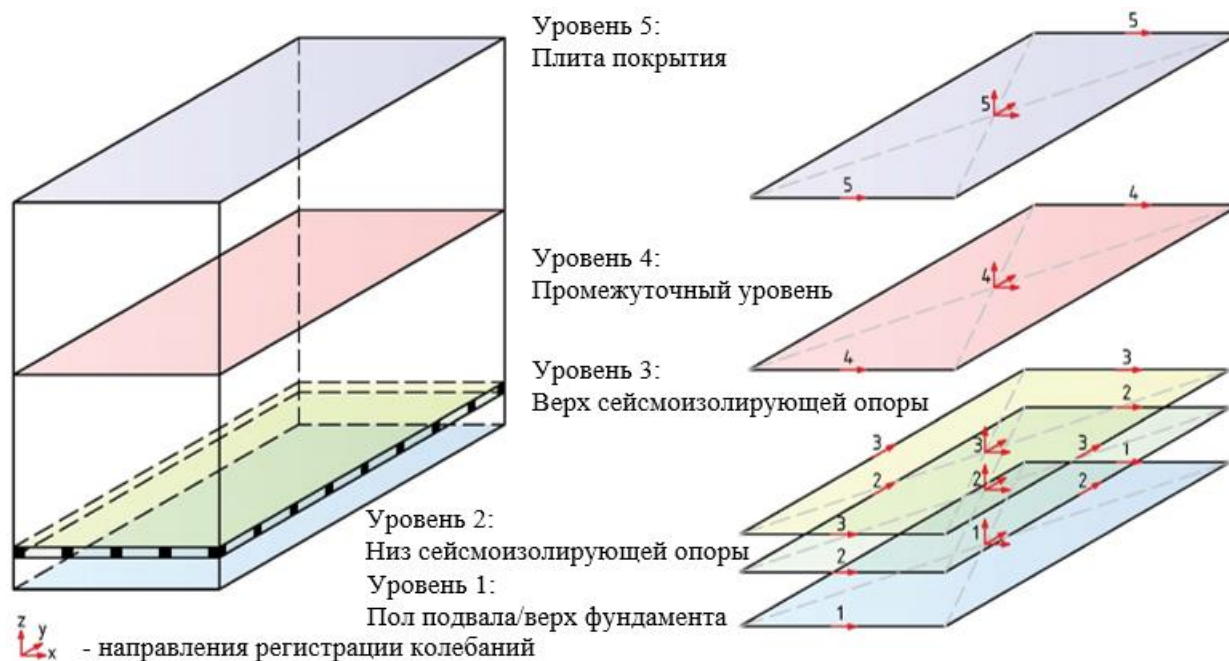


Рисунок 9.4 – Расположение измерительных пунктов по схеме 4

9.10 Измерительный пункт на грунте (далее – грунтовая точка) следует устраивать в соответствии с пунктом 4.15 СП 330.1325800.2017, при этом грунтовую точку рекомендуется располагать, по отношению к близкорасположенным зданиям, на расстоянии не менее чем в 1,5–2 раза больше высоты самого высокого из этих близлежащих зданий.

9.11 Для сейсмоизолированных зданий кроме устройств, осуществляющих регистрацию колебаний конструкций зданий и прилегающего грунта, следует предусматривать устройства, осуществляющие регистрацию движений сейсмоизолированной части зданий.

9.12 Устройство, осуществляющее регистрацию движений сейсмоизолированной части зданий, может быть представлено закрепленной на уровне низа сейсмоизолирующих опор стационарной плитой с накладкой из органического стекла размером, соответствующим проектным перемещениям сейсмоизолирующих устройств, и твердосплавным маркером по металлу, закрепленным в уровне верха сейсмоизолирующих опор. Наконечник маркера должен соприкасаться с плитой и быть пружиненным для обеспечения полного контакта маркера с плитой во время землетрясения. Пример такого устройства приведен на рисунке 9.5. В зданиях следует предусматривать не менее двух точек регистрации движения, располагаемых диагонально по углам здания.

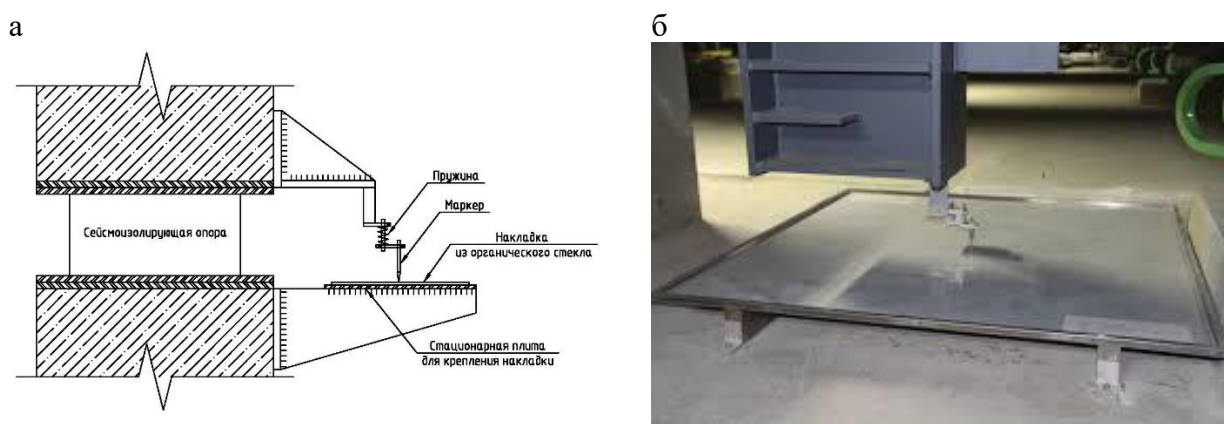


Рисунок 9.5 – Принципиальная схема (а) и пример (б) устройства, осуществляющего регистрацию движения сейсмоизолированной части здания

9.13 Накладка из органического стекла после каждого зарегистрированного ею движения сейсмоизолированной части здания подлежит замене. Накладку с зарегистрированным движением сейсмоизолированной части здания следует передать службе, осуществляющей мониторинг динамического поведения здания для последующего анализа.

9.14 Регистрацию перемещений сейсмоизолированной части здания допускается осуществлять оптическими датчиками измерения расстояния. Устройство измеряет точное расстояние до объекта бесконтактным методом

с помощью лазерного луча. Принцип работы датчика основан на измерении времени прохождения луча, который отражается от рефлектора, расположенного на объекте (или же непосредственно от самого объекта). Схема установки датчика в точке регистрации и конструкция кронштейна приведена на рисунке 9.6.

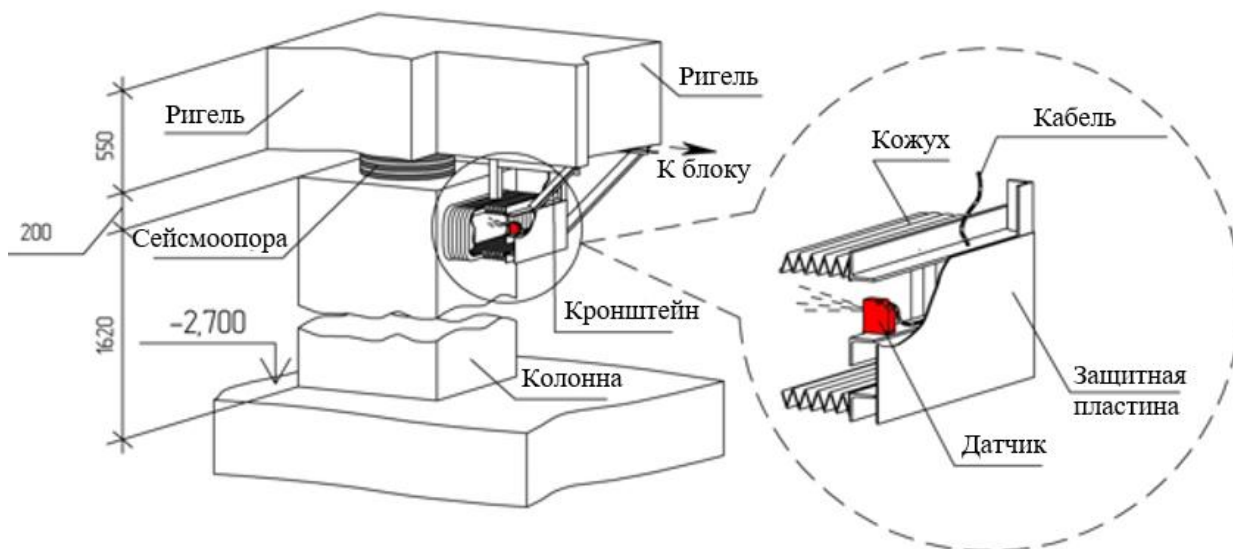


Рисунок 9.6 – Схема установки датчика измерения расстояния в точке регистрации

9.15 Мониторинг динамического поведения должен включать в себя проведение плановых и внеплановых наблюдений за динамическими характеристиками зданий.

9.16 При плановом мониторинге проводится анализ зарегистрированных за отчетный период записей сейсмических событий и визуальный осмотр систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции.

9.17 Плановый мониторинг динамического поведения следует осуществлять раз в 3 мес., в течение первого года эксплуатации здания, с составлением отчета один раз в 6 мес. По прошествии первого года эксплуатации здания наблюдения за динамическим состоянием, плановый мониторинг, следует осуществлять раз в год.

9.18 Внеплановый мониторинг следует осуществлять после аварий техногенного характера (пожары, взрывы) и стихийных бедствий (ураганных ветров, землетрясений) (далее – неблагоприятных факторов).

9.19 При внеплановом мониторинге после анализа зарегистрированных записей сейсмических событий и визуального осмотра систем сейсмоизоляции и систем динамического регулирования сейсмической реакции следует приблизительно оценить техническое состояние здания.

9.20 В случае выявления тяжелых последствий воздействия на здание неблагоприятных факторов, на основании актов выносятся предписания на

проведение детального обследования технического состояния конструкций здания или отдельных его элементов.

Приложение А

Сейсмоизолирующие элементы

А.1 Общие положения

А.1.1 Способность сейсмоизолирующих систем снижать и ограничивать реакцию здания на сейсмические воздействия зависит от свойств сейсмоизолирующих элементов, образующих эти системы.

А.1.2 В приложении рассматриваются только апробированные системы сейсмоизоляции, получившие признание в мировой практике сейсмостойкого строительства.

А.1.3 Наиболее широкое распространение в мировой практике сейсмостойкого строительства получили системы сейсмоизоляции, образованные сейсмоизолирующими элементами в виде:

- а) эластомерных опор;
- б) эластомерных опор со свинцовыми сердечниками;
- в) опор фрикционно-подвижного типа с плоскими горизонтальными поверхностями скольжения;
- г) кинематических систем с качающимися опорами (как правило, из железобетона).
- д) опор фрикционно-подвижного типа со сферическими поверхностями скольжения;
- е) трехкомпонентной пружинно-демпферной системы (ТПДС), состоящей из упругих витых пружин и параллельно установленных многокомпонентных (3D) вязкоупругих демпферов (ВД).

А.1.4 Сейсмоизолирующие опоры, указанные в:

а) перечислениях а), б) и г) А.1.3, применяются в сейсмоизолирующих системах первого типа: системы сейсмоизоляции, уменьшающие величины горизонтальных сейсмических нагрузок на сейсмоизолированную часть здания за счет изменения частотного спектра ее собственных колебаний – увеличения периодов колебаний сейсмоизолированной части здания по основному тону;

б) перечислениях в) и д) А.1.3, применяются в сейсмоизолирующих системах второго типа: системы сейсмоизоляции, ограничивающие уровень горизонтальных сейсмических нагрузок, действующих на сейсмоизолированную часть здания;

в) перечислении в) А.1.3, применяются в сейсмоизолирующих системах третьего типа: системы сейсмоизоляции, сочетающие способность изменять частотный спектр собственных колебаний сейсмоизолированной части здания со способностью ограничивать уровень горизонтальных сейсмических нагрузок, воздействующих на сейсмоизолированную часть здания;

г) перечислении е) А.1.3, применяются в сейсмоизолирующих системах четвертого типа: системы сейсмоизоляции, сочетающие способность изменять частотный состав собственных колебаний сейсмоизолированной

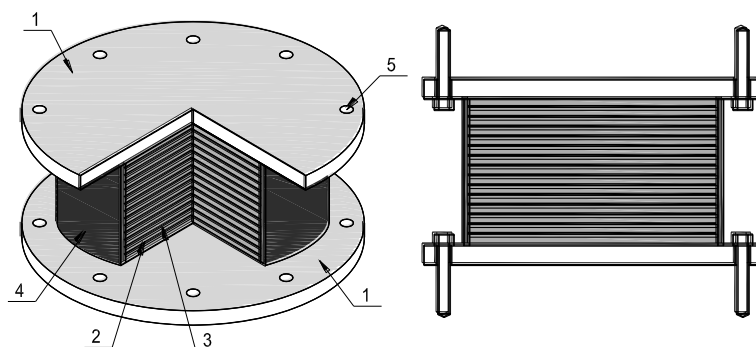
части здания со способностью ограничивать уровень как горизонтальных, так и вертикальных сейсмических нагрузок, воздействующих на сейсмоизолированную часть здания.

А.1.5 Определенное распространение в практике сейсмостойкого строительства получили комбинированные системы сейсмоизоляции, сочетающие сейсмоизолирующие элементы разных типов (например, указанные в перечислениях а) и в) А.1.3 или в перечислениях в) и д) А.1.3).

А.2 Эластомерные опоры

А.2.1 Эластомерные опоры, применяемые для защиты зданий от сейсмических воздействий, представляют собой слоистые конструкции из поочередно уложенных друг на друга листов натуральной или искусственной резины толщиной 5–20 мм и листов металла толщиной 1,5–5,0 мм. Сверху и снизу устанавливают фланцевые пластины толщиной 20–40 мм. Листы резины и металла соединены между собой путем вулканизации или с помощью специальных связующих материалов. По торцам эластомерных опор предусмотрены опорные стальные пластины, через которые опоры крепятся к конструкциям несейсмоизолированных и сейсмоизолированных частей здания.

А.2.2 Общий вид одного из возможных вариантов конструктивных решений эластомерных опор (иначе их называют резинометаллическими) показан на рисунке А.1.



1 – опорные пластины, закрепляемые к несейсмоизолированной и сейсмоизолированной частям здания; 2 – листы резины; 3 – стальные пластины, расположенные между листами резины; 4 – резиновая оболочка, защищающая внутренние слои резины и металла; 5 – отверстия под анкерные болты, необходимые для закрепления опоры к несейсмоизолированной и сейсмоизолированной частям здания

Рисунок А.1 – Эластомерная сейсмоизолирующая опора

А.2.3 Физико-механические свойства резины и металла, а также толщины и размеры в плане листов, выполненных из этих материалов, принимаются в зависимости от требований, предъявляемых к эластомерным опорам в части: диссипативных свойств, прочности, вертикальной и горизонтальной жесткости, долговечности и ряда других эксплуатационных показателей.

А.2.4 Стальные листы в эластомерных опорах препятствуют выпучиванию резиновых листов при действии вертикальных нагрузок и

обеспечивают вертикальную жесткость и прочность опор. Резиновые листы, обладающие низкой сдвиговой жесткостью, обеспечивают горизонтальную податливость эластомерных опор.

А.2.5 Эластомерные опоры, благодаря их низкой сдвиговой жесткости, изменяют частотный спектр собственных горизонтальных колебаний сейсмоизолированной части здания, а восстанавливающие силы, возникающие при деформациях опор, стремятся вернуть сейсмоизолированную часть здания в исходное положение.

Примечания

1 Эластомерные опоры могут воспринимать усилия сжатия, растяжения, сдвига и кручения при циклических перемещениях в горизонтальном и вертикальном направлениях.

2 При расчетных гравитационных нагрузках вертикальные деформации эластомерных опор, как правило, не превышают нескольких миллиметров. При горизонтальных нагрузках опоры могут деформироваться на несколько сот миллиметров (рисунок А.2).

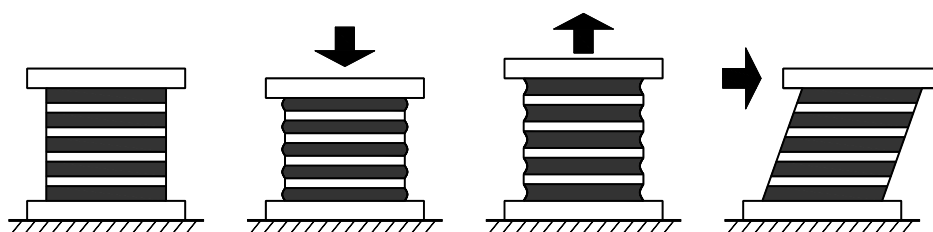


Рисунок А.2 – Деформации эластомерных опор при вертикальных и горизонтальных нагрузках

А.2.6 Эластомерные опоры, в зависимости от своих диссипативных свойств, подразделяются на два вида:

- опоры с низкой способностью к диссипации энергии;
- опоры с высокой способностью к диссипации энергии.

А.2.7 Эластомерные опоры с низкой способностью к диссипации энергии – опоры, диссипативные свойства которых характеризуются коэффициентом вязкого демпфирования ξ , значения которого не превышают 5 % критического значения.

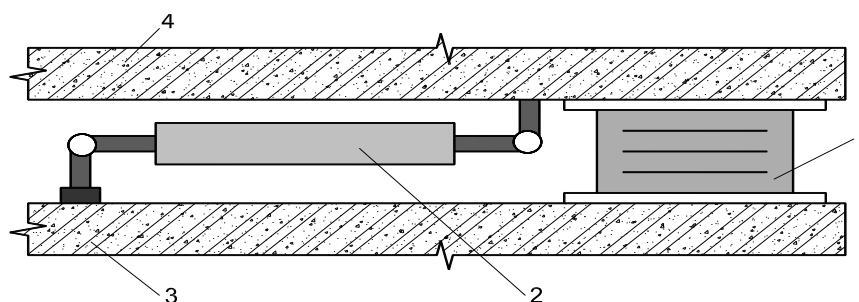
А.2.8 Эластомерные опоры с низкой способностью к диссипации энергии изготавливают из пластин натуральной или искусственной резины, изготовленной по технологиям, не предусматривающим повышение ее демпфирующих свойств.

Примечание – Значения коэффициента ξ , характеризующего диссипативные свойства эластомерных опор с низкой способностью к диссипации энергии, зависят от сил внутреннего трения, возникающих в деформирующихся опорах и, как правило, составляют 2 % – 3 % критического значения.

А.2.9 Эластомерные опоры с низкой способностью к диссипации энергии просты в изготовлении, малочувствительны к скоростям и истории нагружения, а также к температуре и старению. Для них типично линейное поведение при деформациях сдвига до 100 % и более.

А.2.10 Эластомерные опоры с низкой способностью к диссипации энергии применяют, как правило, совместно со специальными демпферами вязкого или гистерезисного типа (рисунок А.3), позволяющими

компенсировать низкую способность эластомерных опор к диссипации энергии сейсмических колебаний.



1 – эластомерная сейсмоизолирующая опора; 2 – демпфер; 3 – несейсмоизолированная часть здания; 4 – сейсмоизолированная часть здания

Рисунок А.3 – Фрагмент сейсмоизолирующей системы, состоящей из эластомерной опоры с низкой способностью к диссипации энергии и демпфера

А.2.11 Эластомерные опоры с высокой способностью к диссипации энергии – опоры, диссипативные свойства которых характеризуются коэффициентом вязкого демпфирования ξ со значениями не менее 10 % и не более 20 % критического значения.

Примечание – Диссипативные свойства таких опор зависят в основном от гистерезисных процессов в резине (затрат энергии на ее пластические и нелинейно-упругие деформации) и, как правило, характеризуются значениями ξ в пределах 10 % – 20 % критического значения.

А.2.12 Эластомерные опоры с высокой способностью к диссипации энергии состоят из пластин резины, изготовленной по специальным технологиям, обеспечивающим повышение ее демпфирующих свойств до требуемого уровня.

А.2.13 Эластомерные опоры с высокой способностью к диссипации энергии обладают способностью к горизонтальным сдвиговым деформациям до 200 % – 350 %. Их эксплуатационные, жесткостные, диссипативные характеристики зависят от скоростей и истории нагружения, температуры окружающей среды и старения.

А.2.14 Для эластомерных опор с высокой способностью к диссипации энергии типично нелинейное поведение.

А.3 Эластомерные опоры со свинцовыми сердечниками

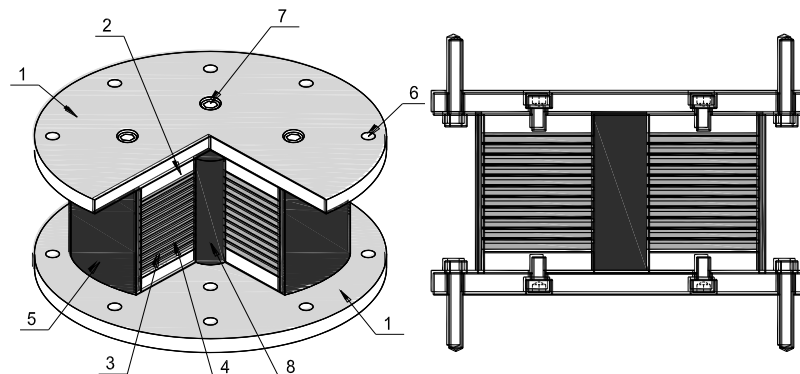
А.3.1 Эластомерные опоры со свинцовыми сердечниками, как правило, изготавливают из пластин резины, обладающей низкими диссипативными свойствами. Свинцовый сердечник располагают в заранее сформированных отверстиях в центре или по периметру опоры и его суммарный диаметр – от 15 % до 33 % внешнего диаметра опоры.

Общий вид одного из возможных вариантов конструктивных решений эластомерных опор со свинцовыми сердечниками показан на рисунке А.4.

А.3.2 Благодаря комбинации резиновых и металлических слоев в опоре со свинцовыми сердечниками, обеспечивающими гистерезисную диссипацию энергии при горизонтальных деформациях, они обладают:

- высокой вертикальной жесткостью при эксплуатационных нагрузках;

- высокой горизонтальной жесткостью при действии горизонтальных нагрузок низкого уровня;
- низкой горизонтальной жесткостью при действии горизонтальных нагрузок высокого уровня;
- высокой способностью к диссипации энергии.



1 – опорные пластины, закрепляемые к несейсмоизолированной и сейсмоизолированной частям здания; 2 – фланцевые стальные пластины; 3 – стальные пластины, расположенные между пластинами резины; 4 – пластины резины; 5 – резиновая оболочка, защищающая внутренние слои резины и металла; 6 – отверстия под анкерные болты, необходимые для закрепления опоры к несейсмоизолированной и сейсмоизолированной частям здания; 7 – отверстия под шпонки; 8 – свинцовый сердечник

Рисунок А.4 – Эластомерная опора со свинцовым сердечником

А.3.3 Диссипативные свойства эластомерных опор со свинцовыми сердечниками зависят от величин их горизонтальных сдвиговых деформаций и характеризуются коэффициентом эффективного вязкого демпфирования ξ в пределах от 15 % до 35 % критического значения.

А.3.4 Эластомерные опоры со свинцовыми сердечниками способны достигать горизонтальных сдвиговых деформаций величиной до 400 %. При этом их параметры менее чувствительны к величинам вертикальных нагрузок, скоростям и истории нагружения, температуре окружающей среды и старению, чем параметры опор в А.2.

А.3.5 При низких уровнях горизонтальных воздействий (например, при ветровых или слабых сейсмических воздействиях) эластомерные опоры со свинцовыми сердечниками работают в горизонтальных и вертикальном направлениях как жесткие элементы, а при высоких уровнях горизонтальных воздействий – как элементы податливые в горизонтальных направлениях и жесткие в вертикальном.

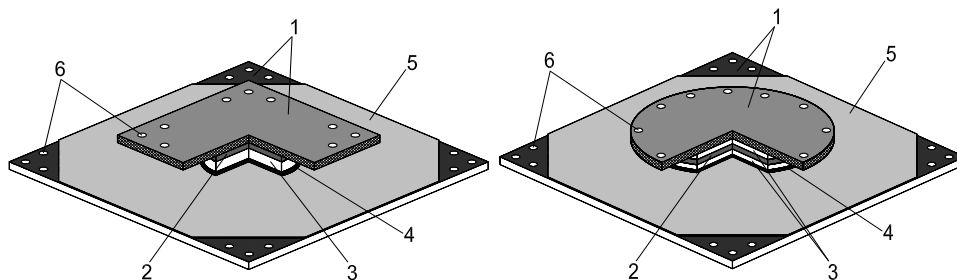
А.3.6 Перечисленные выше свойства делают эластомерные опоры со свинцовыми сердечниками часто применяемым типом сейсмоизолирующих элементов в зонах с высокой в горизонтальном направлении сейсмичностью.

А.4 Опоры фрикционно-подвижного типа с плоскими горизонтальными поверхностями скольжения

А.4.1 Сейсмоизолирующие опоры фрикционно-подвижного типа с плоскими горизонтальными поверхностями скольжения (или плоские

скользящие опоры) выполняются в виде верхних и нижних жестких элементов, примыкающие горизонтальные поверхности которых имеют покрытия из слоя синтетического материала с низким значением коэффициента трения скольжения (например, фторопласта или металлофторопласта в паре с нержавеющей сталью).

Общий вид двух вариантов конструктивных решений плоских скользящих опор показан на рисунке А.5.



1 – опорные стальные пластины, закрепляемые к несейсмоизолированной и сейсмоизолированной частям здания; 2 – пластины резины; 3 – внутренние стальные пластины; 4 – покрытие (например, из фторопласта) нижней части скользящей опоры; 5 – стальная пластина (например, из нержавеющей стали), по которой происходит скольжение; 6 – отверстия под анкерные болты, необходимые для закрепления опоры к несейсмоизолированной и сейсмоизолированной частям здания

Рисунок А.5 – Плоские скользящие опоры

А.4.2 Плоские скользящие опоры имеют довольно низкий порог срабатывания и обеспечивают намного большее рассеивание энергии, чем эластомерные опоры со свинцовым сердечником ($\xi = 63,7 \%$). Однако, из-за отсутствия в опорах восстанавливающих сил, при интенсивных сейсмических воздействиях сейсмоизолированная часть здания может иметь допустимые односторонние перемещения в пределах нижней опорной пластины после прекращения действия сейсмических нагрузок. Эти перемещения не влияют на напряженно деформированное состояние сейсмоизолированной части здания и субструктуры.

А.4.3 Для ограничения чрезмерных односторонних горизонтальных перемещений сейсмоизолированной части здания относительно субструктуры в сейсмоизолирующую систему, образованную плоскими скользящими опорами, как правило, вводятся дополнительные упругие элементы-ограничители (амортизаторы).

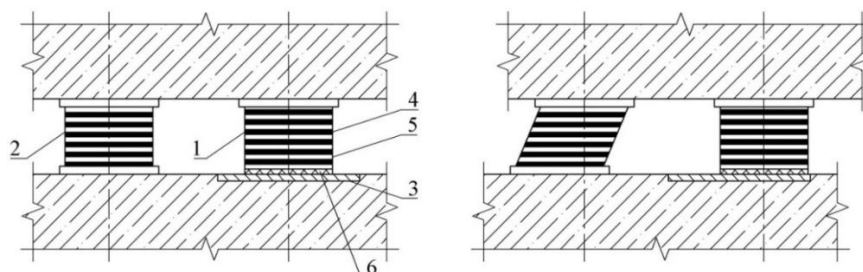
Примечание – Величины допустимых перемещений должны устанавливаться на основе дополнительного анализа.

А.4.4 В качестве альтернативных вариантов, обеспечивающих ограничение чрезмерных односторонних горизонтальных перемещений сейсмоизолированной части здания относительно субструктуры, рекомендуется:

- предусматривать в скользящих поясах конструктивные элементы, обеспечивающие возможность использования соответствующего силового

оборудования, возвращающего плоские опоры скольжения в исходное положение после прекращения сейсмического воздействия;

- в состав скользящих поясов включать дополнительные сейсмоизолирующие элементы, способные ограничивать величины перемещений и возвращать плоские опоры скольжения в исходное положение (рисунок А.6).

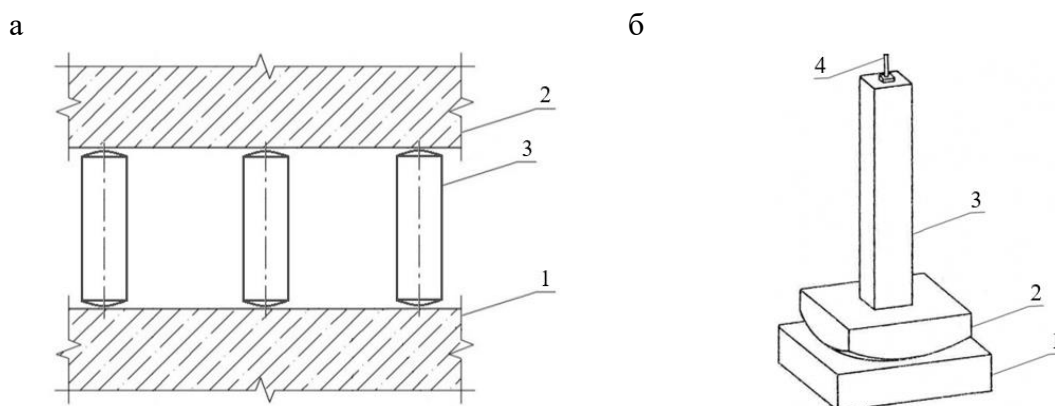


1 – плоская скользящая опора; 2 – эластомерная опора; 3 – нижняя стальная пластина (например, из нержавеющей стали), по которой происходит скольжение; 4 – пластины из резины; 5 – стальные пластины; 6 – слой из фторопласта

Рисунок А.6 – Фрагмент сейсмоизолирующей системы, образованной плоскими скользящими опорами и эластомерными опорами

А.5 Кинематические системы с качающимися опорами

А.5.1 Качающиеся опоры, применяемые для защиты зданий от горизонтальных сейсмических воздействий, представляют собой подвижные стойки, выполненные из железобетона и расположенные в зазоре между сейсмоизолированной и несейсмоизолированной частями здания. Опоры имеют сферические торцы, на верхней и нижней частях каждой опоры (рисунок А.7,а), либо только на нижней части при закреплении верхней части опоры с помощью шарнирной связи к конструкциям сейсмоизолированной части здания (рисунок А.7,б). Шарнирная связь обеспечивает подвижность в горизонтальной плоскости по всем направлениям.



а – 1 – фундаментная плита; 2 – опорная плита; 3 – опоры в форме стоек со сферическими торцами; б – 1 – фундаментная плита; 2 – сферическая опора; 3 – стойка; 4 – шарнирное крепление

Рисунок А.7 – Кинематические системы с качающимися опорами

А.5.2 Кинематические системы с качающимися опорами относятся к гравитационному типу, в котором горизонтальное сейсмическое воздействие уравнивается суммой моментов от веса сейсмоизолированной части здания. Значения опрокидывающего и удерживающего моментов зависят от геометрических параметров, а также от величины реактивных моментов, связанных с локальными деформациями в областях контакта и теле опор.

А.5.3 Геометрические параметры опор при проектировании определяются величиной, передаваемой на кинематическую систему вертикальной нагрузки, прочности применяемого при изготовлении опор материала и расчетного горизонтального перемещения сейсмоизолированной части здания при сейсмическом воздействии.

А.5.4 Качающиеся опоры применяют, как правило, совместно со специальными демпферами вязкого или гистерезисного типа.

А.5.5 Применение кинематической системы сейсмоизоляции с качающимися опорами может быть рекомендовано, как правило, в зданиях с жесткой конструктивной схемой.

А.6 Фрикционно-подвижные опоры со сферическими поверхностями скольжения

А.6.1 Сейсмоизолирующие фрикционно-подвижные опоры со сферическими поверхностями скольжения (или маятниковые скользящие опоры) – это скользящие опоры, в которых контактные поверхности скольжения имеют сферическую форму.

Примечание – Сейсмоизолирующие фрикционно-подвижные опоры со сферическими поверхностями скольжения называют маятниковыми скользящими опорами, так как расположенная на них сейсмоизолированная часть здания совершает при сейсмических воздействиях колебания, подобные движениям маятника при наличии трения (рисунки А.7–А.8).

А.6.2 Конструктивные решения всех видов маятниковых скользящих опор предусматривают наличие:

- одной или нескольких вогнутых сферических поверхностей скольжения;
- одного или нескольких ползунов;
- ограждающих бортиков, ограничивающих горизонтальные перемещения ползунов.

Элементы маятниковых скользящих опор изготавливаются, как правило, из нержавеющей стали, а их сферические поверхности имеют покрытия из материалов, обладающих заданными фрикционными свойствами.

А.6.3 Маятниковые скользящие опоры, в зависимости от особенностей конструктивных решений, подразделяются на опоры:

- с одной сферической поверхностью скольжения; далее – одномаятниковые скользящие опоры;
- с двумя сферическими поверхностями скольжения; далее – двухмаятниковые скользящие опоры;
- с четырьмя сферическими поверхностями скольжения; далее – трехмаятниковые скользящие опоры.

А.6.4 В маятниковых опорах всех типов:

- формы ползунов и плит обеспечивают однородное распределение напряжений в местах их примыкания и исключают возможность возникновения неблагоприятных локальных эффектов;

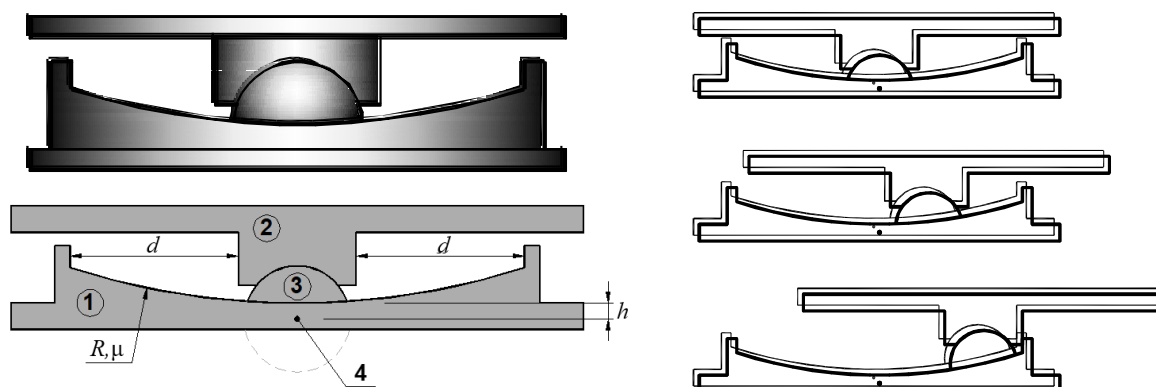
- при перемещениях ползунов по сферическим поверхностям, сейсмоизолированная часть здания приподнимается и составляющая гравитационной силы, параллельная горизонтальной поверхности, стремится вернуть ее в положение устойчивого равновесия;

- диссипативные свойства взаимосвязаны с фрикционными свойствами материалов, контактирующих на сопрягаемых сферических поверхностях плит и ползунов; наиболее часто они характеризуются коэффициентом эффективного вязкого демпфирования ξ со значениями в пределах от 10 % до 30 % критического значения.

А.6.5 Спектр собственных колебаний сейсмоизолированных частей здания, сейсмоизолированных с помощью маятниковых опор всех типов, практически не зависит от массы сейсмоизолированных частей здания.

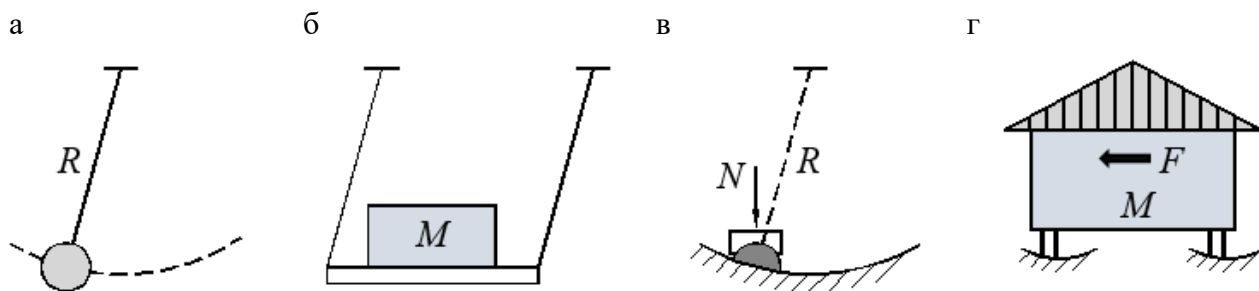
А.6.6 Одномаятниковая скользящая опора состоит из двух горизонтальных плит, одна из которых имеет сферическую вогнутую поверхность, и расположенного между плитами сферического шарнирного ползуна.

Общий вид и схема поведения одномаятниковой скользящей опоры показаны на рисунке А.8, а принцип действия – на рисунке А.9.



1 – нижняя стальная плита со сферической вогнутой поверхностью, по которой происходит скольжение; 2 – верхняя стальная плита; 3 – сферический шарнирный ползун; 4 – точка поворота

Рисунок А.8 – Общий вид и схема поведения одномаятниковой опоры



а – колебания гравитационного маятника с одной точкой подвеса; б – колебания гравитационного маятника с двумя точками подвеса; в – маятниковые колебания при скольжении сферического ползуна по сферической поверхности; г – здание на маятниковых опорах

Рисунок А.9 – Принцип действия одномаятниковой опоры

А.6.7 Особенности поведения и сейсмоизолирующие свойства одномаятниковой скользящей опоры зависят от радиуса кривизны сферической поверхности R и величины коэффициента трения скольжения μ ползуна по сферической поверхности.

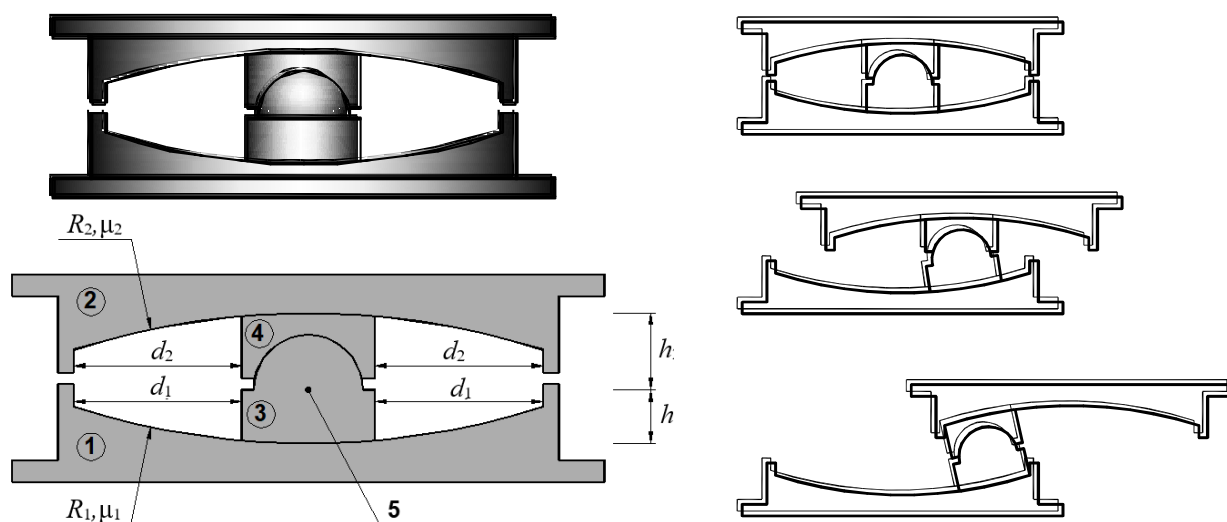
Примечание – Спектр собственных колебаний сейсмоизолированной части здания, сейсмоизолированной с помощью одномаятниковых скользящих опор, зависит преимущественно от выбранного радиуса кривизны сферической поверхности в опорной плите сейсмоизолирующей опоры и не зависит от интенсивности внешнего воздействия, а также амплитуд колебаний сейсмоизолированной части здания.

А.6.8 Современные сейсмоизолирующие системы с одномаятниковыми скользящими опорами способны обеспечивать:

- периоды колебаний сейсмоизолированных частей здания до 3 с и более;
- взаимные перемещения субструктур и сейсмоизолированных частей здания до 1 м и более.

А.6.9 Двухмаятниковая скользящая опора состоит из двух горизонтальных плит, имеющих сферические вогнутые поверхности, и расположенных между ними двух ползунов.

Общий вид и схема поведения двухмаятниковой скользящей опоры показаны на рисунке А.10.



1 – нижняя стальная плита со сферической вогнутой поверхностью; 2 – верхняя стальная плита со сферической вогнутой поверхностью; 3 – верхний ползун со сферической вогнутой поверхностью; 4 – нижний ползун со сферической выпуклой поверхностью; 5 – точка поворота

Рисунок А.10 – Общий вид и схема поведения двухмаятниковой опоры

А.6.10 Особенности поведения двухмаятниковой скользящей опоры зависят от радиусов кривизны верхних и нижних сферических поверхностей R_1 и R_2 , а также величин коэффициентов трения скольжения μ_1 и μ_2 ползунков по сферическим поверхностям.

А.6.11 В двухмаятниковых скользящих опорах радиусы сферических вогнутых поверхностей и коэффициенты трения могут быть одинаковыми или разными.

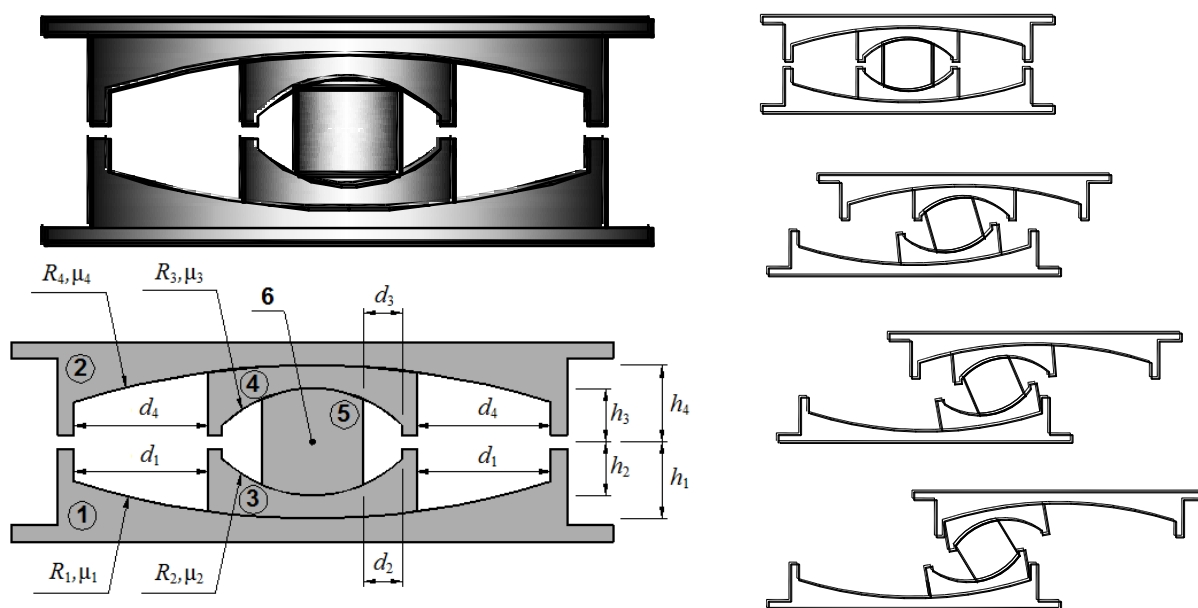
Важное достоинство двухмаятниковых скользящих опор – это их более компактные размеры, чем у одномаятниковых.

Примечание – В двухмаятниковых скользящих опорах реализован механизм двух маятников, последовательно включающихся в работу в зависимости от спектрального состава и интенсивности сейсмических воздействий.

А.6.12 В двухмаятниковых скользящих опорах движения шарнирных ползунков могут происходить по верхним и по нижним сферическим поверхностям (рисунок А.10). Благодаря этому, взаимные смещения двухмаятниковых скользящих опор могут быть в два раза больше, чем у одномаятниковых скользящих опор с теми же габаритными размерами.

А.6.13 Возможность использования в двухмаятниковых скользящих опорах верхних и нижних сферических поверхностей с разными радиусами кривизны и коэффициентами трения, позволяет увеличивать сейсмоизолирующие свойства этих опор.

А.6.14 Трехмаятниковая скользящая опора состоит из двух плит (верхней и нижней) со сферическими вогнутыми поверхностями и трех ползунков (верхнего, нижнего и внутреннего) со сферическими поверхностями. Общий вид и схема поведения трехмаятниковой скользящей опоры показаны на рисунке А.11.



1 – нижняя стальная плита со сферической вогнутой поверхностью; 2 – верхняя стальная плита со сферической вогнутой поверхностью; 3 – нижний ползун со сферической вогнутой поверхностью; 4 – верхний ползун со сферической вогнутой поверхностью; 5 – внутренний шарнирный ползун; 6 – точка поворота

Рисунок А.11 – Общий вид и схема поведения трехмаятниковой опоры

А.6.15 Особенности поведения трехмаятниковой скользящей опоры зависят от радиусов кривизны верхних и нижних сферических поверхностей R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , а также величин коэффициентов трения скольжения μ_1 , μ_2 , μ_3 и μ_4 ползунов по сферическим поверхностям.

А.6.16 В трехмаятниковых скользящих опорах, как и в двухмаятниковых, радиусы сферических вогнутых поверхностей и коэффициенты трения могут быть одинаковыми или разными.

П р и м е ч а н и е – В трехмаятниковой скользящей опоре реализован механизм трех маятников, последовательно включающихся в работу в зависимости от спектрального состава и интенсивности сейсмических воздействий. По мере увеличения перемещений трехмаятниковых опор увеличивается эффективная длина маятника (увеличивается период колебаний сейсмоизолированной части здания) и повышается эффективное демпфирование.

А.6.17 Комбинируя значения радиусов кривизны сферических поверхностей и коэффициентов трения скольжения можно запроектировать трехмаятниковые скользящие опоры, способные эффективно снижать сейсмические нагрузки на сейсмоизолированную часть здания при землетрясениях с очень высокой интенсивностью и со сложным спектральным составом.

А.7 Трехкомпонентная пружинно-демпферная система. Упругие витые пружины с многокомпонентными (3D) вязкоупругими демпферами

А.7.1 Трехкомпонентная пружинно-демпферная система состоит из упругих витых пружин, несущих статическую и воспринимающих сейсмическую нагрузки, и параллельно включенных многокомпонентных

вязкоупругих демпферов, обеспечивающих в широких пределах необходимое демпфирование для сейсмоизолированной системы (рисунки А.12, А.13).



Рисунок А.12 – Установка ТПДС при параллельном размещении блока витых пружин и вязкоупругого демпфера

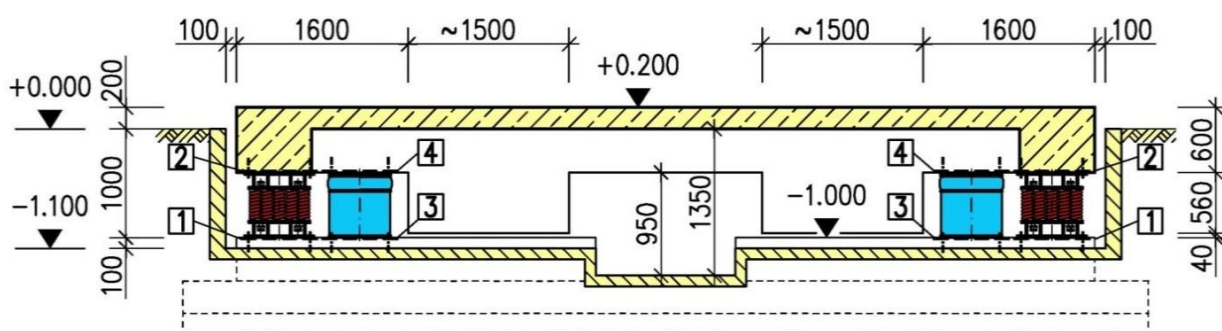


Рисунок А.13 – Принципиальная схема разрезного фундамента с сейсмоизоляцией ТПДС

А.7.2 Варьирование параметрами витых пружин позволяет получать необходимые первые собственные частоты сейсмоизолированной системы в горизонтальном и вертикальном направлениях относительно доминантной частоты сейсмического воздействия (рисунок А.14,а), а демпферы ВД обеспечивают систему необходимым демпфированием во всех степенях свободы, что позволяет существенно сокращать перемещения сейсмоизолированной системы при сохранении ее высокой изолирующей способности (рисунок А.14,б).

А.7.3 Несущая способность блоков витых пружин находится в диапазоне от 1 кН до 7000 кН.

Блок витых пружин имеет линейную зависимость «сила – перемещение» во всем диапазоне нагрузок и перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях (рисунок А.14,б).

А.7.4 Максимальные сейсмические перемещения блоков пружин могут достигать 300 мм и более.

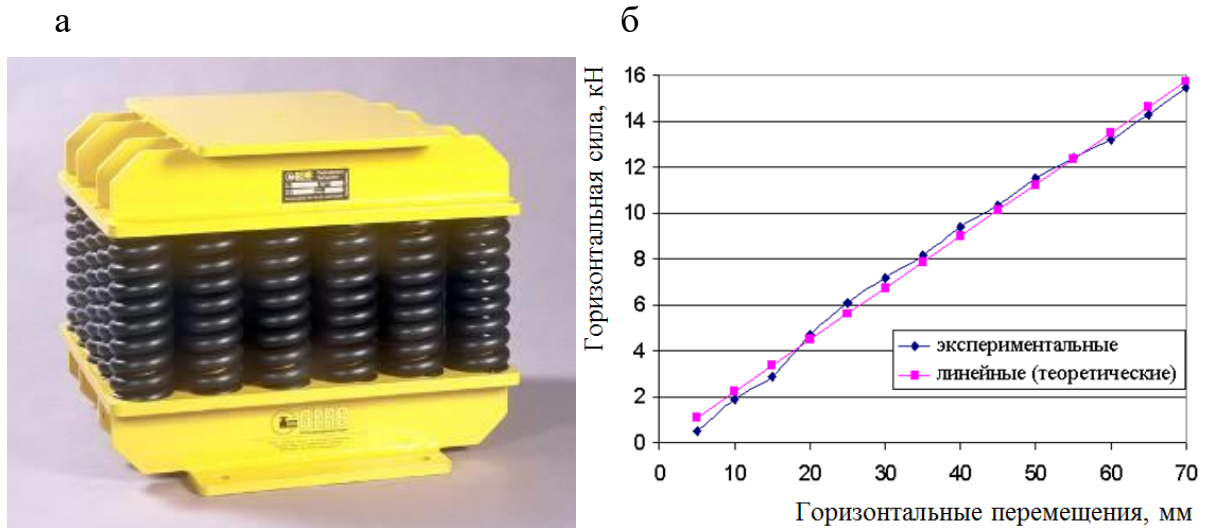


Рисунок А.14 – Блок витых пружин для пространственной 3D изоляции (а); линейная зависимость «сила-перемещение» для витой пружины (б)

А.7.5 Многокомпонентные вязкоупругие демпферы (рисунок А.15) имеют нелинейную частотную демпфирующую характеристику. Их динамическая жесткость состоит из упругой и неупругой (вязкой) частей и описываются 4-звенной динамической моделью Максвелла (рисунок А.16).

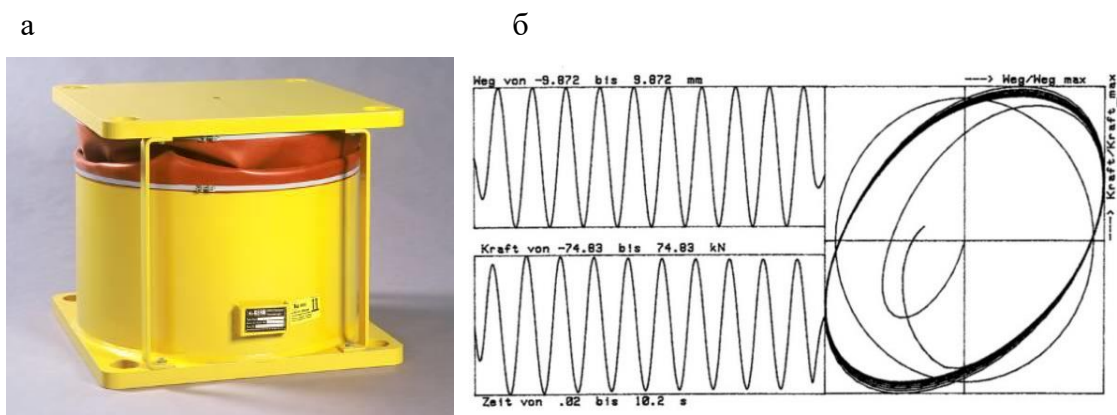


Рисунок А.15 – Вязкоупругий пространственный 3D демпфер (а); зависимость «сила-перемещение» для вязкоупругого демпфера

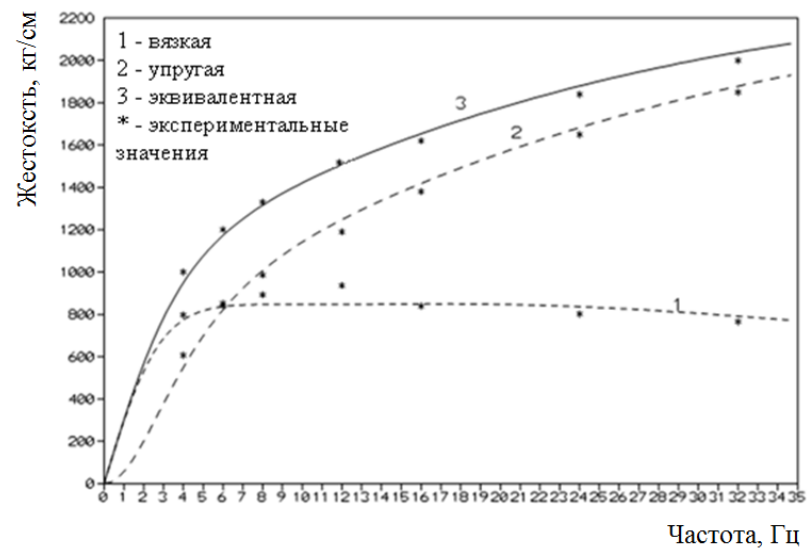


Рисунок А.16 – Зависимость вязкоупругой реакции демпфера от частоты нагружения

Приложение Б

Схема методов расчета сейсмоизолированных зданий

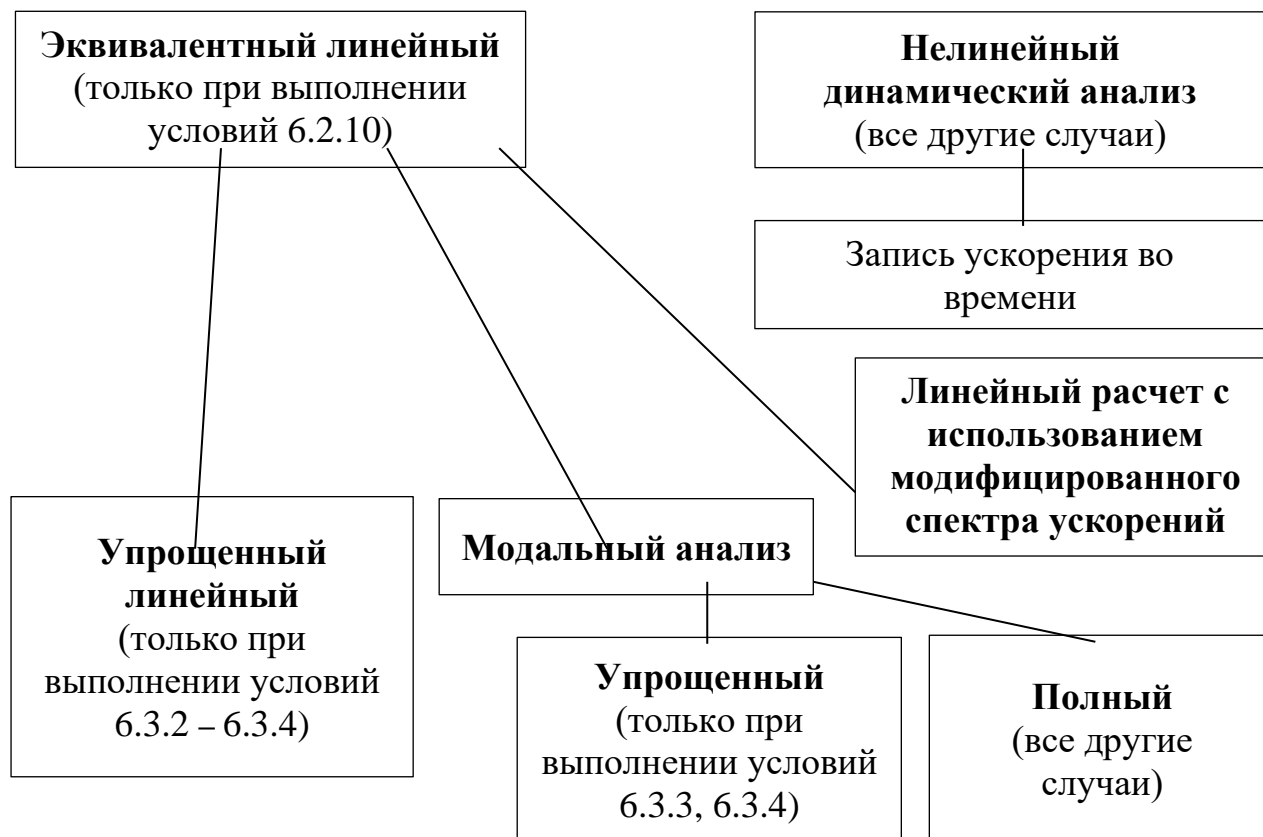


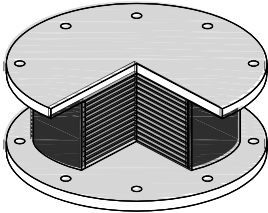
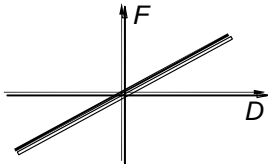
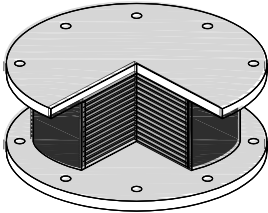
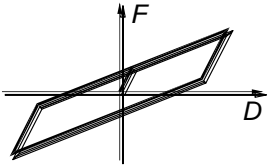
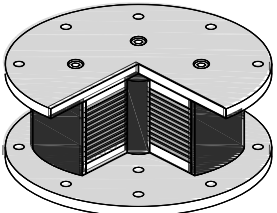
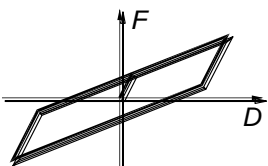
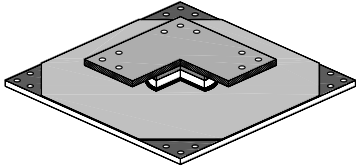
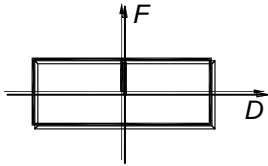
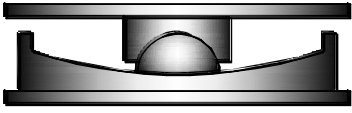
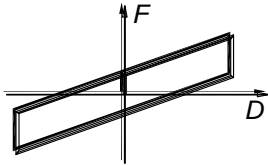
Рисунок Б.1 – Схема методов расчета сейсмоизолированных зданий

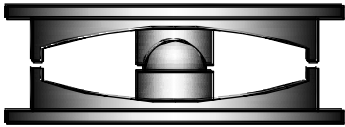
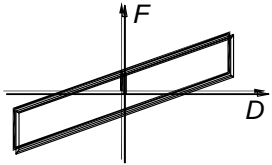
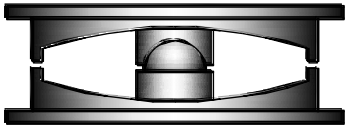
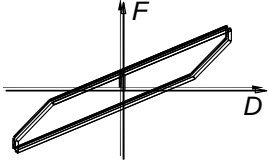

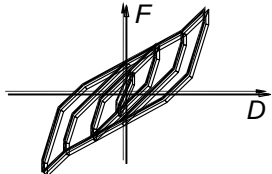

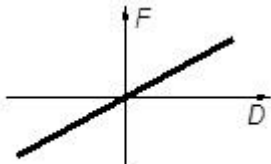

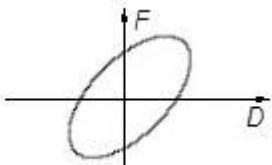
Приложение В

Моделирование систем сейсмоизоляции

Идеализированные зависимости «сила-перемещение», применяемые для описания поведения систем сейсмоизоляции при сейсмических воздействиях, приведены в таблице В.1.

Т а б л и ц а В.1 – Идеализированные зависимости «сила-перемещение», используемые для описания поведения систем сейсмоизоляции

Тип сейсмоизолирующих элементов		Схема сейсмоизолирующих элементов	Идеализированная зависимость «сила-перемещение» ($F-D$)
Эластомерные опоры	с низкой способностью к диссипации энергии		
	с высокой способностью к диссипации энергии		
	со свинцовым сердечником		
Фрикционно-подвижные опоры	с плоскими горизонтальными поверхностями скольжения		
	одномаятниковые со сферическими поверхностями скольжения		

	двухмятниковые со сферическими поверхностями скольжения при $R_1=R_2$ и $\mu_1\approx\mu_2$		
	двухмятниковые со сферическими поверхностями скольжения при $R_1=R_2$ и $\mu_1\neq\mu_2$		
	трехмятниковые со сферическими поверхностями скольжения		
Система сейсмоизоляции с контролируемыми перемещениями (СКП)	Упругая линейная пространственная (3D) опора, состоящая из набора витых пружин		
	Вязкоупругий пространственный (3D) демпфер ВД		

Приложение Г

Форма протокола установки сейсмоизолирующих опор в проектное положение

Наименование объекта: _____

г. _____

Дата __ _____

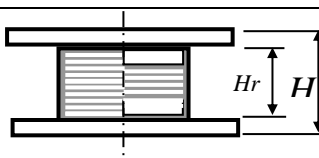
ПРОТОКОЛ № _____

установки сейсмоизолирующих опор в проектное положение

Тип опоры _____

Местоположение _____
(наименование осей /или их пересечения по данным проекта)

Т а б л и ц а Г.1 – Геометрические размеры опор

Эскиз	Габариты, мм		Схема в плане	Примечания
		H _r		
	H			
	A			
	B			

Т а б л и ц а Г.2 – Определение местоположения опоры

Контролируемый параметр	Значение параметра		Отклонение	Предельное отклонение, мм, не более
	по проекту	фактическое		
1 Расположение опоры относительно центра проектной оси опоры				5,0
2 Проектная отметка верха нижней закладной, (абс. отм.)				5,0
3 Различие высот между опорами на одном основании				5,0
4 Отметка по высоте отклонения нижней плоскости				5,0
5 Отметка верхней плоскости резинометаллической опоры после установки				10,0
<u>Соответствует, не соответствует</u> (ненужное зачеркнуть)				
Для примечаний _____				

Т а б л и ц а Г.3 – Геометрические размеры опор

Раздел 1	Проверка горизонтальной поверхности		
	$\psi = \left \frac{\delta_v}{d_f} \right $		
Фактические отклонения, мм			Предельное отклонение
δ_v	d_f	ψ	
			$ \psi \leq \pm 0,5\%$
<u>Соответствует, не соответствует</u> (ненужное зачеркнуть)			

Т а б л и ц а Г.4 – Контролируемые параметры закрепления опор

Наименование	По проекту	Фактическое
1 Марка болтов		
2 Количество болтов		
3 Усилие закручивания болтов		
4 Подготовка поверхности закладной детали		
5 Подготовка поверхности соединительных пластин опоры		
6 Антикоррозийная защита закладных изделий		
7 Антикоррозийная защита соединительных пластин опоры		

Подписи сторон

Генеральный подрядчик

(ФИО)

Заказчик

(ФИО)

Ключевые слова: здания сейсмоизолированные, сейсмическая изоляция, система сейсмоизоляции, сейсмоизолирующий слой, устройства сейсмозащиты, сейсмоизолирующие элементы, демпфирующие элементы, сейсмостойкость, эластомерные опоры, резинометаллические опоры, маятниковые скользящие опоры, кинематические опоры
