НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ SATBAYEV UNIVERSITY

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова
Кафедра «Геофизика и сейсмология»

GPH7142 - Инженерная сейсмология и сейсмостойкость
7М05302 – «Сейсмология

Лекция– 11
На тему «Сейсмостойкое строительство»

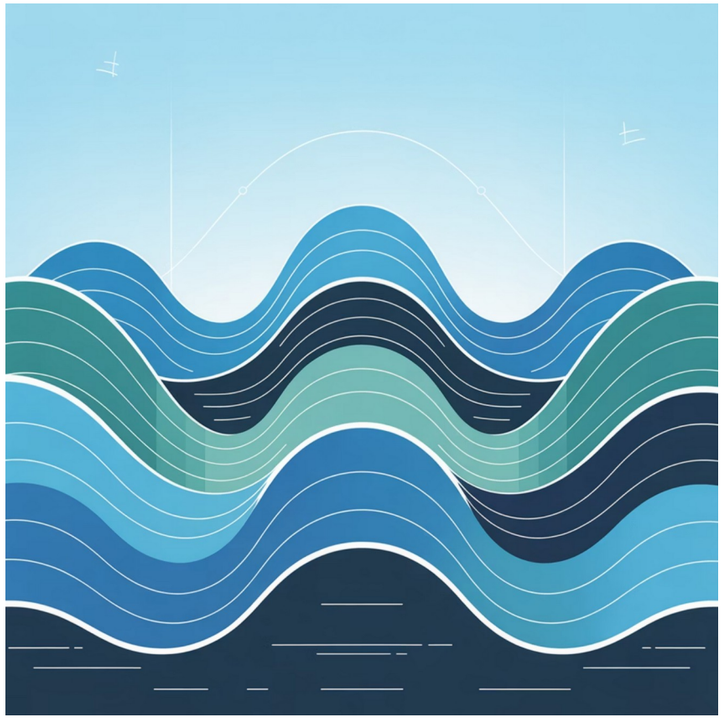
Преподаватель: ***Ратов Боранбай Товбасарович*** – доктор технических наук, профессор

Введение в сейсмостойкое проектирование

Сейсмостойкое строительство представляет собой комплексный подход к проектированию и возведению зданий и сооружений, способных выдерживать воздействие землетрясений различной интенсивности. Эта область инженерного искусства объединяет знания из сейсмологии, строительной механики, материаловедения и архитектуры.

По данным Всемирной организации здравоохранения, землетрясения ежегодно уносят тысячи жизней и причиняют экономический ущерб в миллиарды долларов. Около **40% населения Земли** проживает в сейсмически опасных зонах, что делает разработку эффективных методов сейсмостойкого строительства критически важной задачей современной инженерии.

Основная цель сейсмостойкого проектирования — не только предотвращение полного разрушения конструкций, но и минимизация повреждений, обеспечение безопасной эвакуации людей и сохранение функциональности критически важных объектов инфраструктуры даже после сильных сейсмических событий.



Важно: Современные нормативы требуют, чтобы здания не только выдерживали расчётные нагрузки, но и сохраняли возможность восстановления после землетрясения.

Природа сейсмических воздействий

Землетрясения возникают в результате внезапного высвобождения энергии в земной коре, накапливающейся из-за движения тектонических плит. Это высвобождение энергии создаёт сейсмические волны, которые распространяются во всех направлениях от эпицентра землетрясения.

Продольные волны (P-волны)

Самые быстрые сейсмические волны, распространяющиеся со скоростью 5-8 км/с в земной коре. Они вызывают сжатие и растяжение горных пород в направлении распространения волны. Эти волны первыми достигают поверхности и регистрируются сейсмографами.

Поперечные волны (S-волны)

Распространяются медленнее P-волн (3-5 км/с) и вызывают колебания частиц перпендикулярно направлению распространения. Не проходят через жидкости. Именно S-волны причиняют наибольшие разрушения конструкциям из-за поперечных смещений.

Поверхностные волны

Самые медленные, но наиболее разрушительные волны. Включают волны Рэлея (вертикальные круговые движения) и Лява (горизонтальные поперечные колебания). Вызывают наибольшие повреждения зданий из-за большой амплитуды колебаний.

Для количественной оценки силы землетрясений используются магнитуда (шкала Рихтера, моментная магнитуда) и интенсивность (шкала MSK-64 или модифицированная шкала Меркалли). Магнитуда характеризует энергию землетрясения в очаге, тогда как интенсивность описывает степень воздействия на конкретной территории.

Основные принципы сейсмостойкого проектирования

Современное сейсмостойкое строительство базируется на нескольких фундаментальных концепциях, которые позволяют создавать здания, способные противостоять сейсмическим воздействиям различной интенсивности.

01

Прочность конструкции

Способность несущих элементов воспринимать сейсмические нагрузки без разрушения. Достигается правильным подбором материалов, сечений элементов и армирования.

02

Жёсткость системы

Ограничение деформаций и перемещений конструкции в допустимых пределах. Предотвращает чрезмерные колебания и повреждения ненесущих элементов.

03

Пластичность и диссипация энергии

Способность конструкции поглощать сейсмическую энергию через контролируемые неупругие деформации без потери несущей способности.

04

Регулярность и симметрия

Равномерное распределение жёсткости и массы по высоте и плану здания. Минимизирует крутильные колебания и концентрацию напряжений.

05

Непрерывность силового потока

Обеспечение надёжной передачи сейсмических сил от перекрытий через вертикальные элементы к фундаменту без разрывов или резких изменений жёсткости.

Особое внимание уделяется концепции **«сильный узел — слабый элемент»**, согласно которой узлы соединений должны оставаться в упругой стадии работы, в то время как пластические деформации локализуются в элементах, специально для этого предназначенных.

Конструктивные системы сейсмостойких зданий

Рамные системы

Состоят из колонн и ригелей, соединённых жёсткими узлами. Обеспечивают высокую пластичность и эффективно перераспределяют усилия. Широко применяются в железобетонном и стальном строительстве до 25 этажей.

Стеновые системы

Используют монолитные железобетонные стены жёсткости как основные вертикальные несущие элементы. Обладают высокой жёсткостью и прочностью. Эффективны для высотных зданий до 40+ этажей.

Рамно-связевые системы

Комбинируют преимущества рамных и стеновых систем. Рама воспринимает вертикальные нагрузки, связи обеспечивают жёсткость. Оптимальны для зданий средней этажности 10-30 этажей.

Системы с сейсмоизоляцией

Специальные опорные устройства между фундаментом и надземной частью позволяют зданию перемещаться относительно основания, существенно снижая сейсмические нагрузки на 40-80%.

Факторы выбора системы

- Сейсмичность района строительства
- Высота и функциональное назначение здания
- Грунтовые условия площадки
- Экономическая целесообразность
- Архитектурные требования
- Технологические возможности

Тенденция: В современном строительстве всё чаще применяются гибридные системы, объединяющие различные конструктивные решения для достижения оптимального сочетания прочности, жёсткости и экономичности.

Материалы в сейсмостойком строительстве

Выбор материалов играет определяющую роль в обеспечении сейсмостойкости конструкций. Каждый материал обладает уникальными характеристиками, влияющими на поведение здания при землетрясении.

Железобетон

Преимущества: Высокая прочность на сжатие, огнестойкость, технологичность, возможность создания монолитных конструкций. Бетон класса B25-B40 с арматурой класса A500C обеспечивает необходимую несущую способность.

Особенности применения: Требуется тщательное армирование узлов, обеспечение анкеровки стержней, применение поперечной арматуры для предотвращения хрупкого разрушения. Конструктивное армирование составляет 1,5-3% от площади сечения.

Недостатки: Большой собственный вес, увеличивающий сейсмические нагрузки, необходимость выдерживания бетона, сложность контроля качества в полевых условиях.

Конструкционная сталь

Преимущества: Высокая прочность на растяжение и сжатие, отличная пластичность, меньший вес по сравнению с железобетоном, заводская готовность элементов, быстрота монтажа. Сталь марок C345-C440 обеспечивает оптимальное соотношение прочности и пластичности.

Особенности применения: Применяются горячекатаные и сварные профили, болтовые и сварные соединения. Критически важна защита от коррозии и огня. Узлы проектируются с расчётом на циклические нагрузки.

Недостатки: Высокая стоимость, необходимость антикоррозионной защиты, требования к огнезащите, потеря устойчивости тонкостенных элементов.

Композитные материалы

Преимущества: Высокое соотношение прочности к весу, коррозионная стойкость, возможность создания элементов сложной формы. Фибробетон с добавлением стальных или синтетических волокон улучшает трещиностойкость и пластичность.

Особенности применения: Используются для усиления существующих конструкций, создания диссипативных элементов, производства сейсмоизоляторов. Углеродные и базальтовые композиты применяются для внешнего армирования.

Перспективы: Развитие умных материалов с памятью формы, самовосстанавливающихся бетонов, наноструктурированных композитов открывает новые возможности для повышения сейсмостойкости.

Расчётные модели и методы анализа

Сейсмический расчёт конструкций является сложной инженерной задачей, требующей применения современных вычислительных методов и программных комплексов. Точность расчёта определяет безопасность и экономическую эффективность проектируемого здания.

Основные методы расчёта

1

Статический метод

Сейсмическая нагрузка представляется эквивалентными статическими силами. Применим для регулярных зданий до 50-70 м высотой. Прост в использовании, но не учитывает динамические эффекты.

2

Динамический спектральный метод

Использует спектры ответа для определения максимальных реакций конструкции. Учитывает несколько форм колебаний. Рекомендован для большинства зданий повышенной ответственности.

3

Нелинейный динамический анализ

Прямое интегрирование уравнений движения с использованием акселерограмм реальных землетрясений. Наиболее точный метод, учитывающий упругопластическую работу конструкций.

Программные комплексы

- **ЛИРА-САПР** — отечественная система для расчёта зданий
- **SAP2000** — международный стандарт проектирования
- **ETABS** — специализирован для многоэтажных зданий
- **SeismoStruct** — нелинейный сейсмический анализ

Современные нормы СП 14.13330.2018 требуют выполнения расчётов не менее чем по двум независимым методикам для ответственных объектов.

Учитываемые факторы

Характеристики грунта

- Категория грунта по сейсмическим свойствам
- Резонансные эффекты
- Нелинейность деформирования

Свойства конструкций

- Периоды собственных колебаний
- Коэффициенты демпфирования
- Пластические деформации

Параметры воздействия

- Сейсмичность площадки
- Расчётная интенсивность
- Спектральный состав колебаний

Современные технологии сейсмозащиты

Инновационные системы сейсмозащиты представляют собой передовые инженерные решения, значительно повышающие безопасность зданий при землетрясениях. Эти технологии активно внедряются в мировой практике строительства.

Сейсмоизоляция основания

Резинометаллические и фрикционные опорные части устанавливаются между фундаментом и надземной конструкцией. Они позволяют зданию перемещаться горизонтально относительно основания при землетрясении, увеличивая период колебаний системы и снижая ускорения в 3-5 раз.

- Эластомерные опоры со свинцовым сердечником
- Фрикционно-маятниковые изоляторы
- Системы с упругим скольжением

Применение: Наиболее эффективна для зданий до 20 этажей, больниц, музеев, дата-центров. Стоимость составляет 3-7% от общей стоимости строительства.

Демпферы и поглотители энергии

Специальные устройства, устанавливаемые в конструкциях для рассеивания сейсмической энергии и снижения колебаний. Работают по принципу контролируемого разрушения или деформирования специальных элементов.

- Вязкоупругие демпферы
- Металлические диссипаторы
- Вязкостные гидравлические демпферы
- Фрикционные устройства

Эффективность: Снижают перемещения на 30-50%, повреждения основных элементов на 40-60%. Особенно эффективны в высотных зданиях и мостах.

Динамические гасители колебаний

Массивные маятниковые или пружинные системы, настроенные на основную частоту колебаний здания. Создают противофазные колебания, гася резонансные явления.

- Пассивные настроенные массовые демпферы (TMD)
- Активные системы с сервоприводами (AMD)
- Гибридные полуактивные устройства

Пример: Taipei 101 (Тайвань) оборудован сферическим маятником массой 660 тонн, снижающим колебания на 40%.

Выбор системы сейсмозащиты зависит от множества факторов: типа здания, сейсмичности района, грунтовых условий, экономических соображений. Часто применяется комбинация различных технологий для достижения максимального эффекта.

Нормативная база и требования стандартов

Сейсмостойкое строительство в России регламентируется системой нормативных документов, обеспечивающих единые подходы к проектированию и строительству в сейсмических районах. Соблюдение этих норм является обязательным условием обеспечения безопасности зданий и сооружений.

СП 14.13330.2018

«Строительство в сейсмических районах»

Основной документ, определяющий принципы проектирования, методы расчёта, требования к конструкциям. Содержит карты сейсмического районирования, спектры ускорений, коэффициенты.

СП 63.13330.2018

«Бетонные и железобетонные конструкции»

Устанавливает требования к проектированию железобетонных конструкций, включая особенности для сейсмических районов. Регламентирует армирование, материалы, расчётные схемы.

СП 16.13330.2017

«Стальные конструкции»

Определяет правила проектирования стальных конструкций зданий и сооружений в обычных и сейсмических условиях. Включает требования к узлам и соединениям.

Категории сейсмичности

Территория России разделена на зоны по степени сейсмической опасности. СП 14.13330.2018 устанавливает расчётную сейсмичность для трёх уровней вероятности превышения:

Вероятность превышения	Период повторяемости	Интенсивность
10% за 50 лет	500 лет	Основная
5% за 50 лет	1000 лет	Проектная
1% за 50 лет	5000 лет	Максимальная

Для зданий массового строительства расчёт ведётся на **проектную сейсмичность** (7, 8 или 9 баллов). Особо ответственные объекты проверяются также на максимальную сейсмичность.



Категории зданий по ответственности

- **I класс (γn = 1.5)**: больницы, школы, объекты с массовым пребыванием людей
- **II класс (γn = 1.25)**: жилые и общественные здания
- **III класс (γn = 1.0)**: производственные здания
- **IV класс (γn = 0.8)**: временные сооружения

Международные стандарты

- Еврокод 8 (EN 1998)

  Европейский стандарт проектирования сейсмостойких конструкций. Используется в странах ЕС и принят во многих других государствах.

- ASCE 7-16 (США)

  Американский стандарт минимальных расчётных нагрузок, включая сейсмические воздействия. Широко применяется в мировой практике.

- ISO 3010

  Международный стандарт, определяющий основы проектирования конструкций на сейсмические воздействия.

Примеры реализованных проектов

Изучение опыта реального строительства и поведения зданий при землетрясениях позволяет совершенствовать методы проектирования и повышать надёжность сейсмостойких конструкций.

Taipei 101, Тайвань

Характеристики: Высота 508 м, 101 этаж, построен в 2004 году в зоне 9-балльной сейсмичности и тайфунов.

Технологии: Мега-колонны из высокопрочного бетона, стальной каркас, настроенный массовый демпфер весом 660 тонн на 87-92 этажах, 8 сейсмических колонн диаметром 3 метра.

Результаты: Успешно выдержал землетрясения магнитудой до 6,8 баллов. Демпфер снижает колебания на 40% при землетрясениях и на 30% при ветровых нагрузках.

Госпиталь Крайстчерч, Новая Зеландия

Характеристики: Медицинский комплекс площадью 75 000 м², построен в 2020 году после разрушительного землетрясения 2011 года (6,3 балла).

Технологии: 98 сейсмических изоляторов на основании, 35 вязкоупругих демпферов, усиленная железобетонная конструкция с рамно-связевой системой.

Инновации: Модульная конструкция для быстрого восстановления, системы непрерывного мониторинга сейсмических воздействий, резервное энергоснабжение.

Российский опыт

Жилой комплекс в Петропавловске-Камчатском

Серия 9-этажных домов (2015-2019 гг.) в районе 9-балльной сейсмичности. Применены монолитные железобетонные рамно-связевые конструкции с усиленным армированием узлов. Дополнительные диафрагмы жёсткости на всю высоту здания. Фундамент на свайном основании с учётом вечной мерзлоты.

Особенности: Увеличенные антисейсмические швы (100 мм), двойное армирование перекрытий, замкнутые хомуты в колоннах с шагом 50 мм в критических зонах.

Мост через пролив Босфор Восточный, Владивосток

Вантовый мост длиной 3,1 км (2012 г.) в районе 7-8 балльной сейсмичности. Пилоны высотой 324 м, центральный пролёт 1104 м.

Конструкция: Стальной коробчатый пролётный строение на высокопрочных вантах, железобетонные пилоны на массивных фундаментах. Установлены маятниковые опорные части и демпферы для гашения колебаний.

Расчёт: Выполнено трёхмерное моделирование с учётом нелинейной работы, ветровых и сейсмических нагрузок.

> «Анализ поведения зданий при реальных землетрясениях показывает, что правильно спроектированные и качественно построенные сейсмостойкие конструкции способны сохранять целостность даже при воздействиях, превышающих расчётные.»

Заключение и перспективы развития

Сейсмостойкое строительство представляет собой динамично развивающуюся область инженерного знания, которая продолжает совершенствоваться благодаря накоплению практического опыта, развитию вычислительных методов и появлению новых материалов и технологий.

Ключевые выводы

1. **Комплексный подход**
   Эффективная сейсмозащита требует интеграции архитектурных, конструктивных и технологических решений на всех этапах проектирования и строител
2. **Качество исполнения**
   Даже самый совершенный проект может быть скомпрометирован низким качеством строительных работ. Контроль качества и соблюдение технологии критически важны.
3. **Экономическая целесообразность**
   Затраты на сейсмостойкое строительство составляют 5-15% от общей стоимости, но предотвращают потенциальные потери, многократно превышающие эти вложения.

> **Статистика**
> По данным ООН, инвестиции в сейсмостойкое строительство окупаются в соотношении **1:7** — каждый рубль, вложенный в сейсмозащиту, предотвращает потери в среднем 7 рублей при землетрясении.