

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



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

GRH7142 - Инженерная сейсмология и сейсмостойкость  
7M05302 – «Сейсмология»

### **Лекция— 7**

На тему «Практический метод расчета на сейсмические воздействия»

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

# Введение в сейсмическое проектирование

Сейсмическое воздействие представляет собой одну из наиболее опасных и непредсказуемых нагрузок, которые должны учитываться при проектировании зданий и сооружений. В отличие от статических нагрузок, землетрясение создает динамические колебания, распространяющиеся через грунт и вызывающие вынужденные колебания конструкций.

Основная задача инженера-конструктора — обеспечить безопасность людей и сохранность имущества путем правильного учета сейсмических воздействий на всех этапах проектирования. Современные методы расчета позволяют с достаточной точностью моделировать поведение конструкций при землетрясениях различной интенсивности.

Практический метод расчета основывается на упрощенных, но достаточно точных подходах, которые могут быть применены в реальной инженерной практике без использования сложного программного обеспечения на начальных этапах проектирования.

## Ключевые понятия

- Сейсмичность площадки строительства
- Балльность землетрясения по шкале MSK-64
- Спектр ответа конструкции
- Коэффициент динамичности
- Период собственных колебаний
- Демпфирование колебаний

# Нормативная база и основные принципы

В Российской Федерации расчет конструкций на сейсмические воздействия регламентируется сводом правил СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». Этот документ устанавливает требования к проектированию, строительству и реконструкции зданий и сооружений в районах сейсмичностью 6, 7, 8 и 9 баллов по шкале MSK-64.



## Цель расчета

Обеспечение безопасности людей и предотвращение обрушения конструкций при расчетном землетрясении



## Степени ответственности

Здания классифицируются по уровням ответственности: повышенный, нормальный и пониженный



## Методы расчета

Линейно-спектральный, нелинейный динамический, прямое динамическое интегрирование

Основной принцип современного сейсмостойкого проектирования — это многоуровневая защита. При слабых землетрясениях конструкции должны оставаться в упругой стадии работы без повреждений. При сильных землетрясениях допускаются повреждения, но здание не должно обрушиться, обеспечивая безопасную эвакуацию людей.

# Определение расчетных сейсмических нагрузок

## Базовая формула

Сейсмическая нагрузка на здание определяется по следующей формуле:

$$S_i = K_1 \cdot A \cdot S_{pi} \cdot Q_i \cdot \eta_i$$

где:

- **S<sub>i</sub>** — сейсмическая нагрузка на уровне *i*
- **K<sub>1</sub>** — коэффициент, учитывающий назначение сооружения
- **A** — коэффициент, учитывающий сейсмичность площадки
- **S<sub>pi</sub>** — коэффициент динамичности
- **Q<sub>i</sub>** — вес конструкций на уровне *i*
- **η<sub>i</sub>** — коэффициент, учитывающий форму колебаний

Важно понимать, что каждый из этих коэффициентов учитывает различные факторы, влияющие на сейсмическую нагрузку. Правильное определение всех параметров — залог безопасного проектирования.

## Коэффициент сейсмичности A

Балльность	Значение A
6 баллов	0.025
7 баллов	0.050
8 баллов	0.100
9 баллов	0.200

Коэффициент K1 принимается в зависимости от класса ответственности здания: для повышенного уровня K1 = 1.5, для нормального K1 = 1.0, для пониженного K1 = 0.8.

# Определение периода собственных колебаний

Период собственных колебаний  $T$  — один из важнейших параметров при сейсмическом расчете. Он характеризует время, за которое конструкция совершает одно полное колебание. От периода зависит величина коэффициента динамичности и, следовательно, расчетная сейсмическая нагрузка.

## Упрощенная формула для зданий

Для многоэтажных зданий период первой формы колебаний можно определить по упрощенной формуле:

$$T_1 = 0.0175 H \sqrt{\frac{1}{A}}$$

где  $H$  — высота здания в метрах,  $A$  — коэффициент, характеризующий жесткость здания (для каркасных зданий  $A = 0.5-0.7$ , для зданий со связями  $A = 1.0-1.5$ )

## Формула Релея

Более точное определение периода возможно по формуле Релея:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum Q_i u_i^2}{g \sum Q_i u_i}}$$

где  $Q_i$  — вес на уровне  $i$ ,  $u_i$  — горизонтальное перемещение от условной горизонтальной нагрузки,  $g$  — ускорение свободного падения

## Численные методы

В современной практике период колебаний определяется с помощью программных комплексов (ЛИРА, SCAD, SAP2000), которые используют метод конечных элементов для построения динамической модели здания и решения задачи на собственные значения.

# Коэффициент динамичности и спектр ответа

## Понятие спектра ответа

Спектр ответа — это зависимость максимального отклика конструкции от ее периода собственных колебаний при заданном землетрясении. Нормативный спектр учитывает характеристики грунтов основания и интенсивность ожидаемого землетрясения.

Коэффициент динамичности  $\beta$  показывает, во сколько раз динамическая нагрузка больше статической. Он определяется по нормативным кривым в зависимости от периода колебаний  $T$  и категории грунта.

Практически для зданий высотой 5-9 этажей на грунтах II категории коэффициент динамичности составляет 2.5-3.0, что означает, что динамическая сейсмическая нагрузка в 2.5-3 раза превышает статическую нагрузку той же интенсивности.

## Категории грунтов

- **I категория:** Скальные грунты ( $\beta_{\max} = 2.0-2.5$ )
- **II категория:** Крупнообломочные и песчаные грунты плотные ( $\beta_{\max} = 2.5-3.0$ )
- **III категория:** Песчаные средней плотности, супеси, суглинки ( $\beta_{\max} = 3.0-4.0$ )
- **IV категория:** Рыхлые пески, глинистые грунты ( $\beta_{\max} = 4.0-5.0$ )

Максимальное значение  $\beta$  достигается при  $T = 0.3-0.6$  с в зависимости от категории грунта. При малых и больших периодах коэффициент динамичности уменьшается.

# Последовательность практического расчета



## Шаг 1: Сбор исходных данных

Определите сейсмичность площадки по картам ОСР (общего сейсмического районирования), категорию грунтов основания по инженерно-геологическим изысканиям, класс ответственности здания по назначению.



## Шаг 2: Расчет весов

Вычислите постоянные и временные нагрузки на каждом уровне здания. В сейсмический расчет включается полная постоянная нагрузка и часть временной (30-50% в зависимости от назначения помещений).



## Шаг 3: Определение периода

Найдите период первой формы колебаний  $T_1$  по упрощенной формуле или методом Релея. Для более точных результатов используйте программное обеспечение для динамического анализа.



## Шаг 4: Вычисление нагрузок

Определите коэффициент динамичности  $\beta$  по графикам для соответствующей категории грунта и периода  $T$ . Рассчитайте сейсмические нагрузки  $S_i$  для каждого уровня здания по базовой формуле.



## Шаг 5: Проверка несущих элементов

Выполните расчет прочности и устойчивости несущих конструкций с учетом сейсмических нагрузок. Проверьте выполнение условий по предельным состояниям первой и второй группы.

# Конструктивные мероприятия по повышению сейсмостойкости

Помимо расчетного обоснования, важнейшую роль в обеспечении сейсмостойкости играют конструктивные решения. Правильное конструирование часто важнее точных расчетов, поскольку позволяет создать резервы прочности и пластичности.

## Регулярность конструкции

Здание должно иметь простую геометрическую форму в плане и по высоте. Избегайте резких изменений жесткости и массы по этажам. Симметричное расположение несущих элементов предотвращает крутильные колебания.

## Фундаментная плита

Единая жесткая фундаментная плита обеспечивает совместную работу всех вертикальных несущих элементов и исключает неравномерные осадки при землетрясении.

## Дополнительное армирование

В критических зонах (узлы, опорные участки) предусматривается усиленное армирование, поперечное армирование колонн, конструктивные пояса на уровне перекрытий.

## Надежные узлы

Узловые соединения должны быть способны воспринимать циклические нагрузки без разрушения. Особое внимание — соединениям сборных элементов, анкеровке арматуры, сварным швам.

## Диафрагмы жесткости

Монолитные перекрытия выполняют функцию горизонтальных диафрагм, объединяющих вертикальные элементы и распределяющих между ними горизонтальные нагрузки.

## Антисейсмические швы

Сложные в плане здания разделяются антисейсмическими швами на отдельные отсеки с независимой работой. Ширина шва должна исключать соударение частей здания.



# Практический пример расчета

## Исходные данные

Рассмотрим 5-этажное жилое здание с монолитным железобетонным каркасом. Здание расположено в районе сейсмичностью 8 баллов на грунтах II категории. Высота этажа 3.0 м, общая высота здания  $H = 15$  м. Класс ответственности — нормальный ( $K_1 = 1.0$ ).

## Расчет периода колебаний

Используем упрощенную формулу для каркасного здания:

$$T_1 = 0.0175 \cdot 15 \cdot \sqrt{\frac{1}{0.6}} = 0.34 \text{ с}$$

## Определение коэффициента динамичности

Для грунтов II категории и периода  $T = 0.34$  с по нормативным графикам находим  $\beta = 2.8$

## Расчетная сейсмическая нагрузка

Принимаем вес одного этажа  $Q = 1200$  кН. Коэффициент  $A$  для 8 баллов:  $A = 0.1$

$$S = 1.0 \cdot 0.1 \cdot 2.8 \cdot 1200 = 336 \text{ кН}$$

На основании полученных усилий выполняется проверка прочности колонн, диафрагм жесткости и фундаментов с учетом комбинации сейсмических нагрузок с постоянными и временными нагрузками.

## Распределение по высоте

Сейсмическая нагрузка распределяется по высоте здания пропорционально произведению массы и высоты:

- 5 этаж ( $h=15$  м):  $S_5 = 112$  кН
- 4 этаж ( $h=12$  м):  $S_4 = 90$  кН
- 3 этаж ( $h=9$  м):  $S_3 = 67$  кН
- 2 этаж ( $h=6$  м):  $S_2 = 45$  кН
- 1 этаж ( $h=3$  м):  $S_1 = 22$  кН

Суммарная горизонтальная нагрузка:  $\Sigma S = 336$  кН

Максимальный изгибающий момент в основании здания:  $M = 112 \times 15 + 90 \times 12 + 67 \times 9 + 45 \times 6 + 22 \times 3 = 3453$  кН·м

# Ключевые выводы и рекомендации

1

## Комплексный подход

Сейсмостойкое проектирование требует сочетания расчетных методов и конструктивных мероприятий. Недостаточно только рассчитать нагрузки — необходимо обеспечить правильное конструирование узлов и деталей.

2

## Учет местных условий

Особое внимание уделяйте категории грунтов основания, так как она существенно влияет на сейсмическую нагрузку. Используйте данные инженерно-геологических изысканий, а не справочные значения.

3

## Регулярность и симметрия

Стремитесь к простым регулярным конструктивным схемам. Избегайте L-образных, Т-образных форм без антисейсмических швов. Симметрия снижает крутильные эффекты.

4

## Проверка программой

Даже используя упрощенные методы на начальных этапах, обязательно выполните уточненный расчет в специализированных программах для окончательного проектирования.

❏ **Важно помнить:** Сейсмостойкость — это не только расчет, но и культура проектирования и строительства. Качество выполнения работ, контроль на всех этапах, использование качественных материалов не менее важны, чем правильные расчеты.

Овладение практическими методами расчета на сейсмические воздействия — важный этап профессионального развития инженера-конструктора. Продолжайте изучать нормативную документацию, анализировать опыт землетрясений и совершенствовать свои навыки проектирования надежных сооружений.