

**ПРОБЛЕМА УЧЕТА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СООРУЖЕНИЯ С
ОСНОВАНИЕМ ПРИ ОЦЕНКЕ
СЕЙСМОСТОЙКОСТИ
СООРУЖЕНИЙ**

ОСНОВНЫЕ задачи:

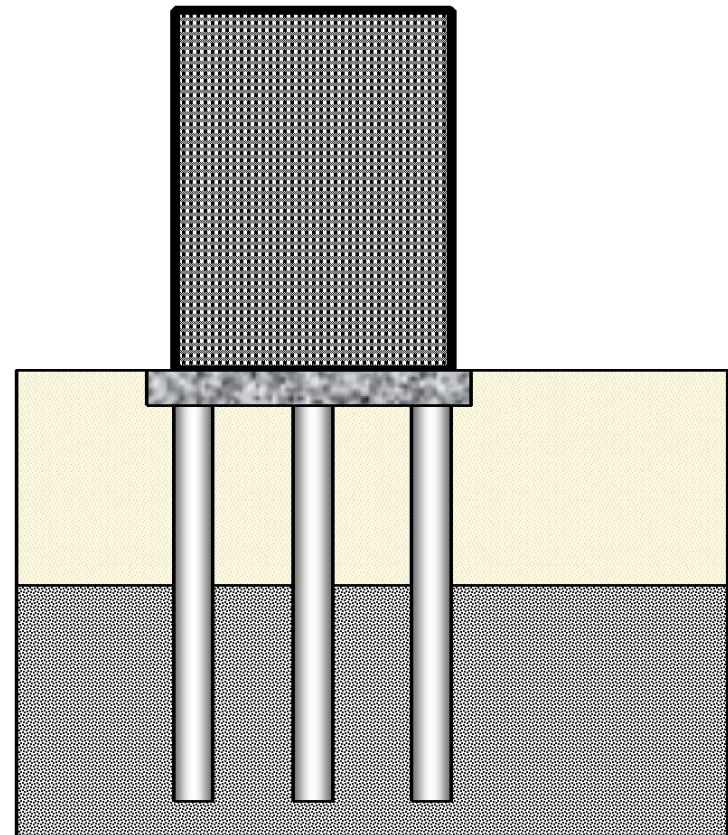
- задание сейсмологической информации на свободной дневной поверхности;
- задание расчетного воздействия на сооружения;
- задание модели грунтового основания;
- разработка методики расчета сейсмостойкости сооружений с учетом основания;
- установление общих качественных закономерностей взаимодействия сооружения с грунтом;
- установление особенностей взаимодействия сооружения с грунтом для рассматриваемого сооружений.

ЗАДАНИЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

- Микросейсморайонирование площадки строительства, т.е. оценку характера сейсмического воздействия на площадке строительства при отсутствии сооружения.
- Задание расчетного воздействия на сооружение по результатам микросейсморайонирования

Микросейсморайонирование площадки строительства

- Микросейсморайонирование площадки строительства обычно проводится по инструментальным записям микросейсмов и другим данным для особо ответственных сооружений. Эта работа выполняется специализированными сейсмологическими подразделениями. Для массового строительства приходится пользоваться рекомендациями таблицы 5 СНИП 2-7-81 «Строительство в сейсмических районах» определяющей расчетный уровень колебаний свободной дневной поверхности в зависимости от описательной характеристики грунтов, слагающих верхнюю 10-метровую толщу основания. Использование этой таблицы вызывает две проблемы. Во-первых, во многих случаях отсутствует информация о геологии на площадке строительства до указанной отметки. Во-вторых, любая регламентация толщины принимаемого в расчет слоя грунта вне зависимости от размеров сооружения приводит к парадоксам. Например, при расположении слоя пылеватого песка мощностью $h=4.99$ м на скальной породе верхняя 10-метровая толща должна относиться к первой категории, а при $h=5.01$ м – уже к третьей категории.

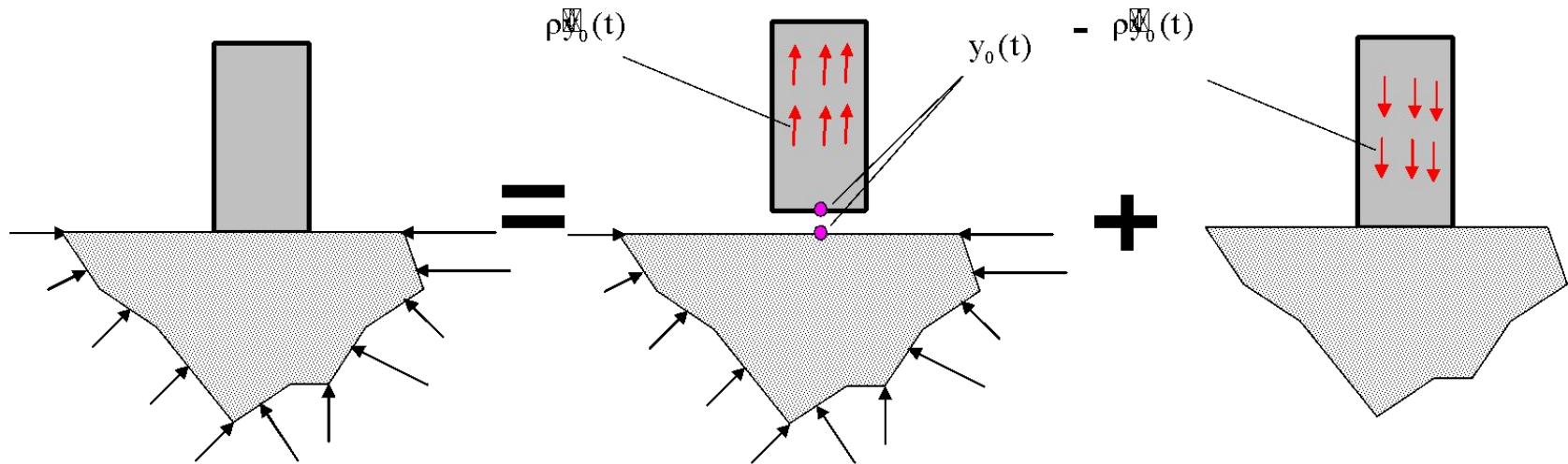


Проблема задания расчетного воздействия на сооружение

- Проблема задания расчетного воздействия на сооружение состоит в том, что обычно известны расчетная акселерограмма или уровень сейсмического воздействия на дневной поверхности при отсутствии сооружения, которые не могут быть непосредственно использованы в уравнениях колебаний системы. К сожалению, в действующих СНиП эта проблема игнорируется. Воздействие, заданное на основе микросейсморайонирования прикладывается непосредственно к сооружению, а взаимодействие с основанием не учитывается. Как показывают исследования рекомендации СНиП 2-7-81 приемлемы для расчета сравнительно небольших гибких сооружений с периодом основного тона колебаний более 1 сек и для расчета обычных сооружений на плотных грунтах с модулем деформации более 400 кг/см². Даже для таких сооружений взаимодействие сооружения с основанием может иметь принципиальное значение. Так, во время Шемахинского землетрясения 1903 г. В.Вебером описаны два, расположенные рядом, одноэтажных здания построенных соответственно на скале и на двухметровом слое песка. Здание на скале оказалось разрушенным, а на слое песка – получило незначительные повреждения. Такого рода примеры широко описаны в литературе, но не получили отражения при составлении норм. Более того, использование сложившегося в России нормативного подхода к заданию сейсмического воздействия на сооружения приводит в ряде случаев к неверным проектным решениям. На слабых грунтах, отнесенных СНиП 2-7-81 к третьей категории, уровень нагрузок на сооружения повышается и конструкция усиливается. Это первоначально объяснялось тем, что степень повреждаемости сооружений на слабых грунтах традиционно больше, чем на плотных. Однако анализ повреждений показывает, что они связаны в первую очередь с нарушением несущей способности основания, неравномерностью осадок, тиксотропными явлениями в грунте и т.д. Для повышения сейсмостойкости таких сооружений необходимо усиление грунтового основания, а формальное увеличение сейсмической нагрузки по СНиП 2-7-81 приводит к необходимости усиления сооружения.

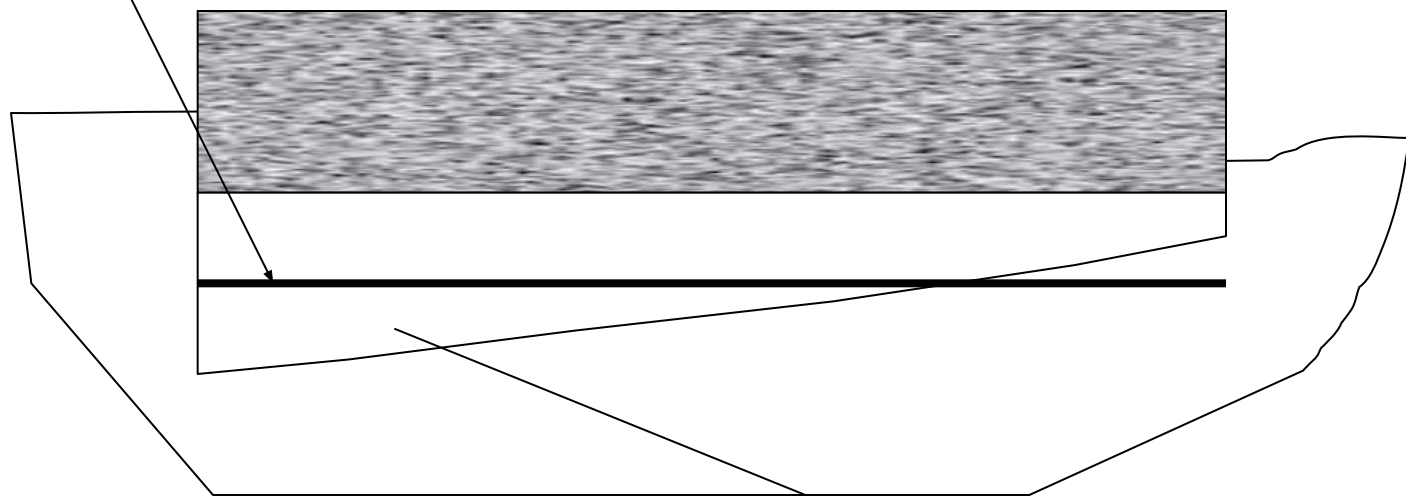
Проблема задания расчетного воздействия на сооружение

- Принцип декомпозиции Ломбардо-Лятхера



Протяженные сооружения

Средний уровень ускорений



Эпюра ускорений
под фундаментом

Протяженные сооружения

- При расчетах протяженных массивных объектов (больших плотин, АЭС и т. п.) изложенный прием задания сейсмического воздействия может быть обобщен с учетом неоднородности поля ускорений по площади сооружения. В этом случае в качестве внешней нагрузки к сооружению необходимо приложить объемные силы

$$F_x = -\rho \cdot (u_x + z\phi_y - y\phi_x);$$

$$F_y = -\rho \cdot (u_y - z\phi_x - x\phi_z);$$

$$F_z = -\rho \cdot (u_z + x\phi_y - y\phi_x).$$

где x , y , z - координаты точки, в которой приложена нагрузка, в правой системе координат с началом в центре тяжести фундамента; ρ - плотность материала сооружения; u_x , u_y , u_z - составляющие смещения основания при отсутствии сооружения, соответственно вдоль осей X , Y , Z ; ϕ_x , ϕ_y , ϕ_z - углы поворота площадки расположения сооружения относительно осей X , Y , Z .

Если обозначить через A_x , A_y и A_z расчетные ускорения вдоль осей X , Y , Z в долях ускорения силы тяжести g , то углы ϕ_x , ϕ_y , ϕ_z могут быть оценены по следующим формулам:

$$\phi_x = \frac{A_z}{L} \cdot \frac{l_y}{L} \cdot \frac{\pi^2 g}{3}; \quad \phi_y = \frac{A_y}{L} \cdot \frac{l_x}{L} \cdot \frac{\pi^2 g}{3}; \quad \phi_z = \frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{L} \cdot \frac{l_0}{L} \cdot \frac{\pi^2 g}{3};$$

где l_x и l_y - размер подошвы фундамента в направлениях по осям X и Y ; l_0 - размер подошвы фундамента в направлении фронта сейсмической волны, L - длина сейсмической волны.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

- Модели с малым числом степеней свободы

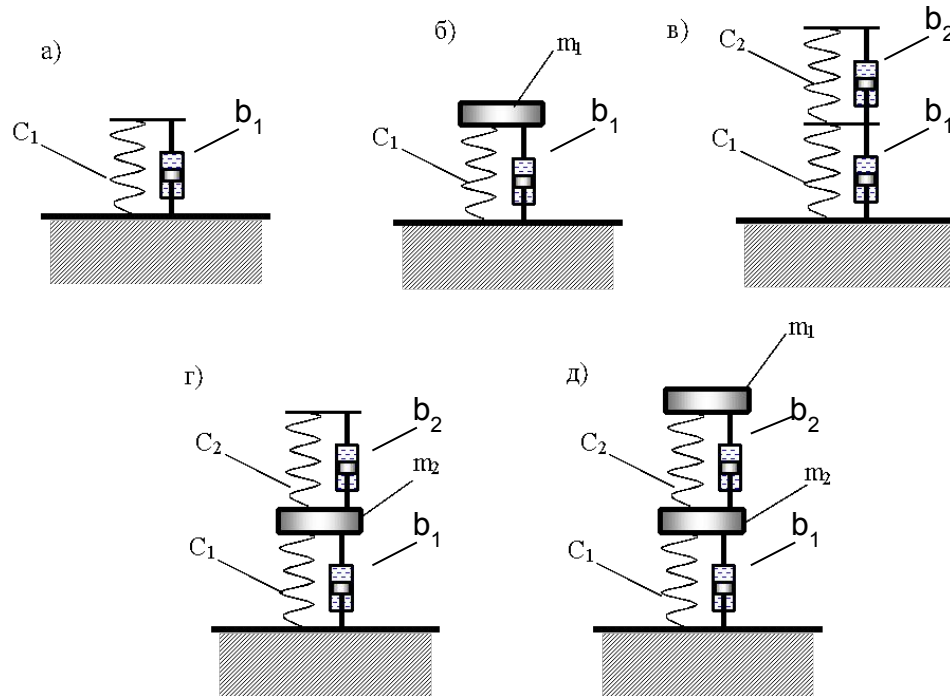


Рис. 4.1 Динамические модели грунтового основания с малым числом степеней свободы

- а) модель с $\frac{1}{2}$ степенью свободы; б) модель с одной степенью свободы;
в) модель с $2\frac{1}{2}$ степенями свободы; г) модель с полутора степенями свободы;
д) модель с двумя степенями свободы;

C_1 и C_2 – жесткости пружин, моделирующих упругие свойства грунта;
 b_1 и b_2 – коэффициенты демпфирования элементов, моделирующих рассеяние энергии в грунте;

m_1 – присоединенная масса грунта; m_2 – приведенная масса грунта.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

Модели с малым числом степеней свободы

- 1. Все модели характеризуются значительным демпфированием, определяемым параметрами b_1 и b_2 . Это связано с тем, что в демпферах модели должно поглотиться столько энергии, сколько уносится фактически в грунт упругими волнами
- 2. Учет инерционности основания не приводит к появлению присоединенной к фундаменту массы грунта m_1 . Инерционность основания обуславливает волновой отток энергии в грунт и величину демпфирования модели. Как показывают исследования [144] присоединенная масса грунта возникает вследствие его неоднородности и гистерезисных потерь в нем.
- 3. Теоретически полученные в настоящее время модели грунтового основания, базирующиеся на ПФ или ИПФ упругого полупространства завышают рассеяние энергии в основание по сравнению с натурным. В связи с этим в инструктивной литературе параметры моделей корректируются по усредненным натурным данным. При этом погрешности моделирования реальных оснований оказываются весьма существенными. По этой причине в нормах многих стран, например, США существует рекомендация о проведении тройного расчета сооружения при значении модуля упругости основания равном $E/2$, E и $2E$, где E – модуль упругости, полученный по данным изысканий.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

Модели с малым числом степеней свободы. СНиП

- В имеющихся нормативных документах жесткость пружины при вертикальных колебаниях $K_1=K_z$ определяется коэффициентом упругого равномерного сжатия C_z , который выражен через модуль деформации грунта E_0 :

$$K_z = C_z F; \quad C_z = E_0 \cdot \tilde{b}_0 (1 + \xi)$$

где, $\xi = \sqrt{\frac{F_0}{F}}$ ($F_0=10 \text{ м}^2$); - коэффициент, принимаемый для песков 1.0, для супесей и суглинков 1.2, для глин и крупнообломочных грунтов 1.5. Аналогично оцениваются жесткости пружин K_x и K_ϕ , моделирующих сдвиговые и поворотные колебания фундамента

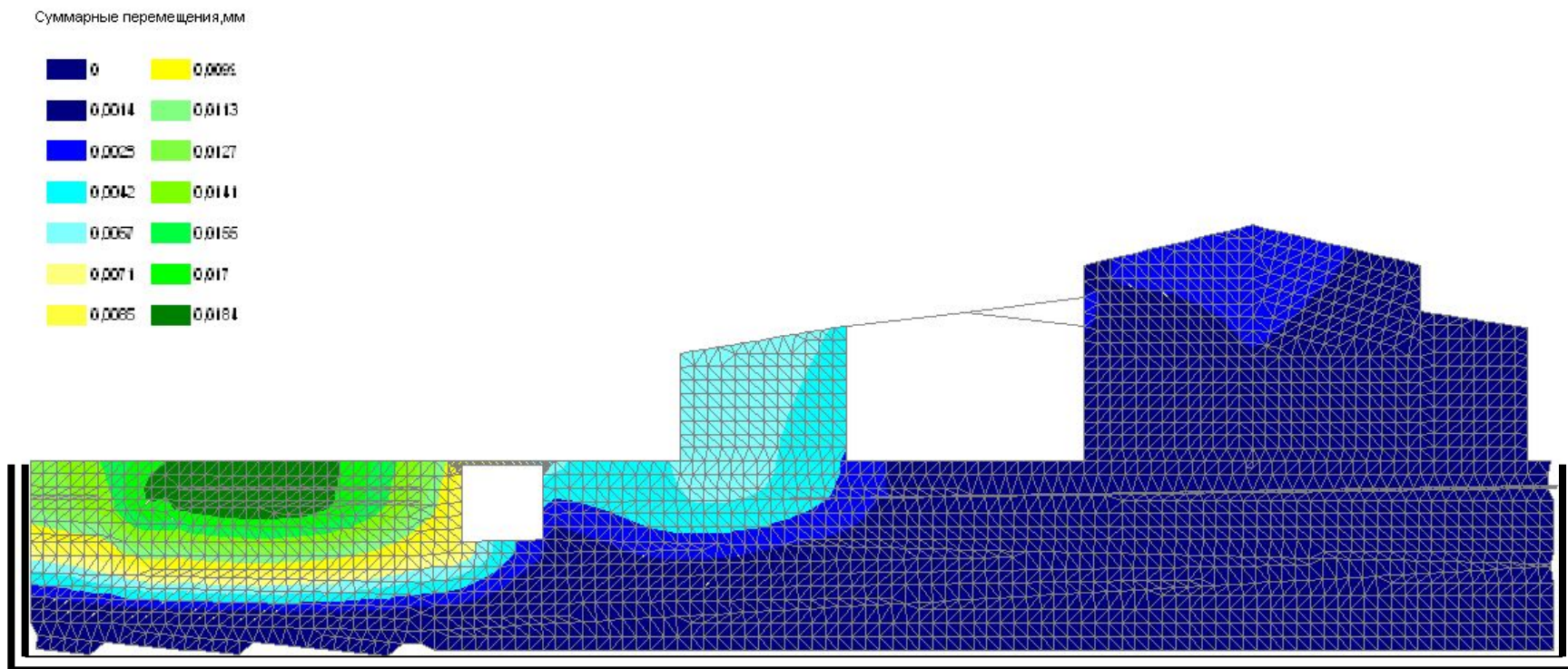
$$K_x = C_x F; \quad C_x = 0.7 C_z; \quad K_\phi = C_\phi J; \quad C_\phi = 2 C_z;$$

Здесь C_x – коэффициент равномерного упругого сдвига, а C_ϕ - коэффициент упругого неравномерного сжатия основания, F – площадь, а J – момент инерции подошвы фундамента. Параметры демпфирования b_z , b_x и b_ϕ рассматриваемой модели, определяются затуханием в долях критического

$$\xi_z = \frac{0.7}{\sqrt{p_{cp}}}; \quad \xi_x = 0.6 \xi_z; \quad \xi_\phi = 0.5 \xi_z \quad p_{cp} - \text{среднее давление по подошве фундамента в Тс/м}^2$$

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

- Модели с большим числом степеней свободы



ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

- Модели с большим числом степеней свободы.
- Лисмерова граница

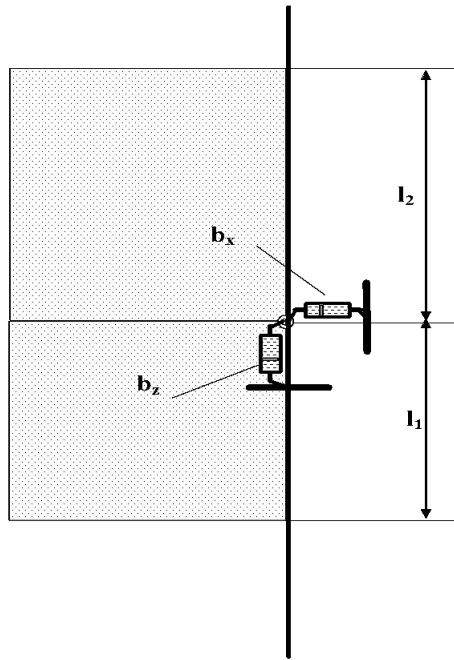


Схема расстановки демпферов по боковой границе вырезанной области основания

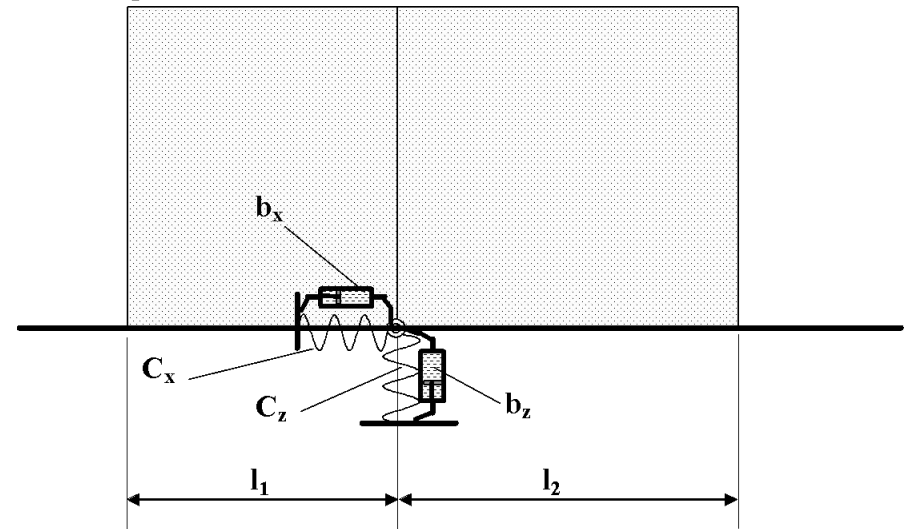


Схема расстановки пружин по нижней границе вырезанной области основания

$$\tilde{b}_z = a_1 \sqrt{E\rho} \quad ; \quad \tilde{b}_x = a_2 \cdot \sqrt{E\rho}$$

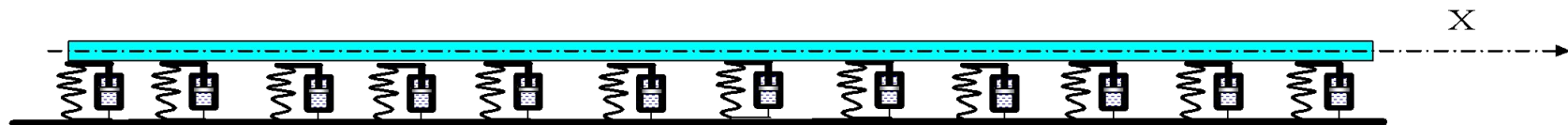


Рис.2.7. Модель нижней отброшенной части основания

ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ

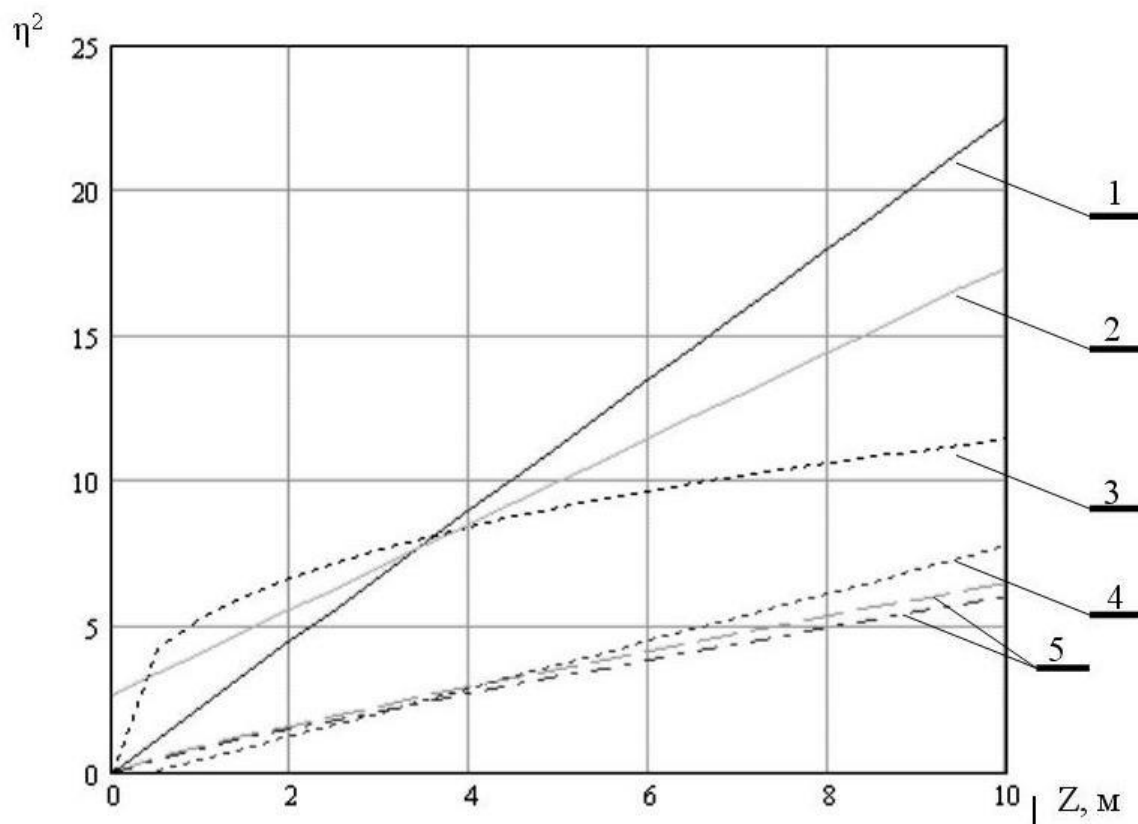


Рис. 2.2. Зависимости η^2 от глубины по различным данным
1 – по СНиП «Свайные фундаменты» и данным [70]; 2 – по данным [106];
3 – по методическим указаниям [85]; 4 – по экспериментальным данным О.А.Савинова [6]; 5 – по японским рекомендациям [195]
(пунктир для воздействия 7 баллов, штрих-пунктир – для воздействия 9 баллов.)

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ОСНОВАНИЯ

- 1. По характеристикам демпфирования в отдельных элементах сооружения и в основании строится матрица демпфирования системы по Е.С. Сорокину **B_c**
- 2. Определяются коэффициенты демпфирования по формам колебаний (спектр демпфирования)
- 3. По каждой форме вводится поправка K_ψ в зависимости от фактического рассеяния энергии по данной форме.

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ОСНОВАНИЯ

- Уравнение движения системы «сооружение-основание» имеет вид:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{R}\mathbf{Y} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}_0; \quad \mathbf{B} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{\Lambda}^{1/2}\mathbf{X}\mathbf{B}_c + \mathbf{B}_v$$

$$\ddot{\mathbf{Y}}_0 = \sum_{S=1}^3 \ddot{y}_{oS} \cdot \mathbf{V}_{pS} \quad - \text{вектор кинематических возбуждений};$$

$\ddot{y}_{oS}$ – расчетная акселерограмма в направлении “S” (S принимает значение x, y или z);

$\mathbf{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n\}$ – вектор обобщенных координат; $\mathbf{V}_{pS}$ – вектор проекций воздействия на направления обобщенных координат. Обычно для масс сооружения соответствующие элементы вектора $\mathbf{V}_{pS}$ принимаются равными 1, а для масс грунтового массива (ящика) элемент вектора $\mathbf{V}_{pS}$ принимаются равными 0.

Матрицы $\mathbf{R}$ и $\mathbf{M}$ строятся стандартными методами строительной механики. Для построения матрицы $\mathbf{B}$ первоначально строится матрица $\mathbf{B}_c$ гистерезисного демпфирования по Е.С.Сорокину. Матрица $\mathbf{B}_c$ строится теми же методами и с использованием тех же программных средств, что и матрица жесткости $\mathbf{R}$, но с заменой модулей упругости элементов конструкции E_k на соответствующие произведения $\gamma_k E_k$, где γ_k – коэффициент неупругого сопротивления k-го элемента конструкции.

$\mathbf{X}$ и $\mathbf{\Lambda}$ – соответственно матрица собственных векторов и диагональная матрица собственных чисел $[\dots \lambda_i \dots]$ матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$; $\mathbf{B}_v$ – матрица вязкого демпфирования, обусловленная вязкими демпферами акустической границы.

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ОСНОВАНИЯ

- Расчетная сейсмическая нагрузка

$$S_{ij} = K_1 Q_i A \beta_j K_{\psi}^{(j)} \eta_{ij} \quad K_{\psi}^{(j)} = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{э}}}{\gamma_j}}$$

Коэффициент η_{ij} , учитывающий поглощение энергии, определяется в зависимости от коэффициента неупругого сопротивления γ_j по j-ой форме колебаний, категории грунтов и периода j-го тона колебаний конструкции; $\gamma_{\text{э}} = 0.1; 0.16$ и 0.22 соответственно для грунтов I, II и III категорий. Эталонные значения $\gamma_{\text{э}}$ подобраны так, чтобы расчетные нагрузки на объекты массового строительства – четырех - пятиэтажные здания, рассчитанные по предлагаемой методике и по СНиП соответствовали друг другу. При модификации спектральных кривых эти коэффициенты необходимо корректировать

$$\gamma_j = \frac{T_j^2}{4\pi^2} \frac{\sum_{s=1}^{nf} \sum_{k=1}^{nf} b_{ks}^{(r)} x_{ij} x_{si}}{\sum_{k=1}^n x_{kj}^2 m_k} + \frac{T_j}{2\pi} \cdot \frac{\sum_{s=1}^{nf} \sum_{k=1}^{nf} b_{ks}^{(B)} x_{ij} x_{si}}{\sum_{k=1}^n x_{kj}^2 m_k}$$

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ПРОЕКТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЯХ

ЛИРА SCAD MicroFE	Позволяют задать одно осредненное демпфирование на всю конструкцию в целом. Расчет на заданное воздействие с приближенным разложением по формам колебаний
COSMOS MIDAS ANSIS	Позволяют задать «групповое» демпфирование. Определяют спектр демпфирования. Позволяют вести расчет на заданное воздействие пошагово без разложения по формам колебаний. COSMOS позволяет задать Лисмерово демпфирование.

ПОЧЕМУ РАСЧЕТ ПО АКСЕЛЕРОГРАММАМ ХУЖЕ РАСЧЕТА ПО ЛСМ

- 1. Высокая стоимость, продолжительность и трудоемкость прогноза расчетных спектров и акселерограмм**
- 2. Безобразное качества сейсмологических прогнозов**
- 3. Сложность использования для типового проектирования**
- 4. Использование единственного расчетного воздействия , как единичная реализация случайного процесса, только дезориентирует проектировщика.**
- 5. Пакет расчетных акселерограмм (ПРА) требует проведения соответствующего числа расчетов. Каждый расчет несет огромную информацию, которую в полном объеме практически невозможно обработать**

ОБЩИЕ КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СООРУЖЕНИЯ С ГРУНТОМ

- **Параметры взаимодействия**

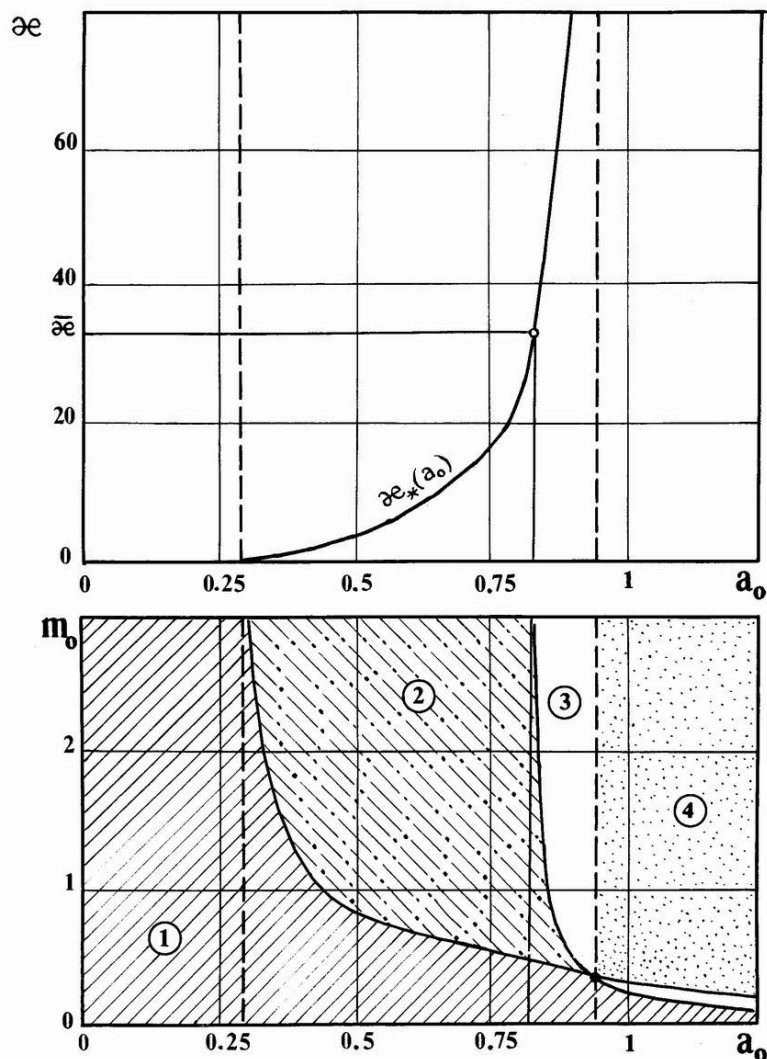
$$a_0 = \frac{\omega r}{v_2}; \quad m_0 = \frac{m}{\rho r^3}; \quad \kappa = \frac{K_x h^2}{K_\phi} \quad r = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$$

где ω — частота основного тона колебаний сооружения на жестком основании; F — площадь подошвы фундамента; ρ — плотность грунта основания; K_ϕ и K_x — поворотная и сдвиговая жесткости фундамента; h — расстояние от уровня подошвы фундамента до его центра тяжести; v_2 — скорость распространения волн сдвига в основании.

Помимо указанных параметров возможно еще использование относительной жесткости сооружения $C_0 = C/G \cdot r$, где C — жесткость сооружения, а G — модуль сдвига основания.

$$a_0 = \sqrt{\frac{C_0}{m_0}}$$

ОБЩИЕ КАЧЕСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СООРУЖЕНИЯ С ГРУНТОМ



Зона 1 характеризуется значениями . В этой зоне обратное воздействие сооружения на основание не существенно.

В зоне 2 процессы взаимодействия с основанием также не существенны. Эта зона ограничивается сверху кривой при , а при — ограничивается сверху кривой .

Зона 3 ограничена слева значением и снизу кривой . Здесь взаимодействие сооружения с основанием всегда существенно.

Зона 4 заключена между кривыми и ; в ней необходим учет обратного воздействия сооружения на грунт лишь при

В зоне 5, расположенной между кривой и линией взаимодействие с грунтом не существенно лишь при

Наконец, **в зоне 6**, заключенной между кривыми и влияние сооружения на основание существенно при

ПРИМЕР

- Пятиэтажное жилое здание с фундаментом мелкого заложения. Высота здания 15 м. Общая масса здания 3600 т. Площадь несущих стен составляет 6 м². Модуль сдвига материала несущих стен $G=12000$ МПа. Общая площадь фундамента – 432 м². Расчет проведен для двух вариантов грунта основания – песков средней плотности с модулем деформации $E_0=30$ МПа и на полускальном основании с $E_0=1000$ МПа.

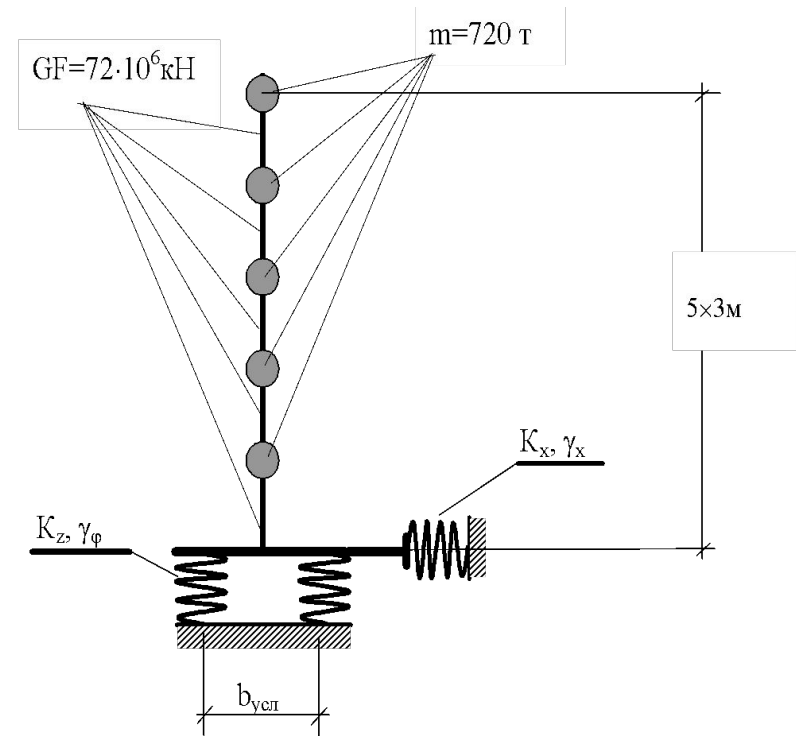


Рис.4. Расчетная схема 5-этажного здания

ПРИМЕР

Спектральные характеристики системы при $E_0 = 30 \text{ МПа}$

№ формы	1	2	3	4	5
Период $T, \text{с}$	$1.98514e-01$	$6.07900e-02$	$2.95959e-02$	$2.14500e-02$	$1.81517e-02$
Частота $k, \text{с}^{-1}$	$3.16512e+01$	$1.0335e+02$	$2.1230e+02$	$2.9292e+02$	$3.4615e+02$
Кэф. неупругого сопротивления γ	$5.14507e-01$	$3.21516e-01$	$1.39329e-01$	$1.13259e-01$	$1.02197e-01$

¶

⊕ Спектральные характеристики системы при $E_0 = 1000 \text{ МПа}$

№ формы	1	2	3	4	5
Период $T, \text{с}$	$1.424e-01$	$4.668e-02$	$2.709e-02$	$2.074e-02$	$1.802e-02$
Частота $k, \text{с}^{-1}$	$4.41e+01$	$1.345e+02$	$2.31e+02$	$3.02e+02$	$3.48e+02$
Кэф. неупругого сопротивления γ	$1.14e-01$	$1.182e-01$	$1.105e-01$	$1.051e-01$	$1.013e-01$

¶

ПРИМЕР

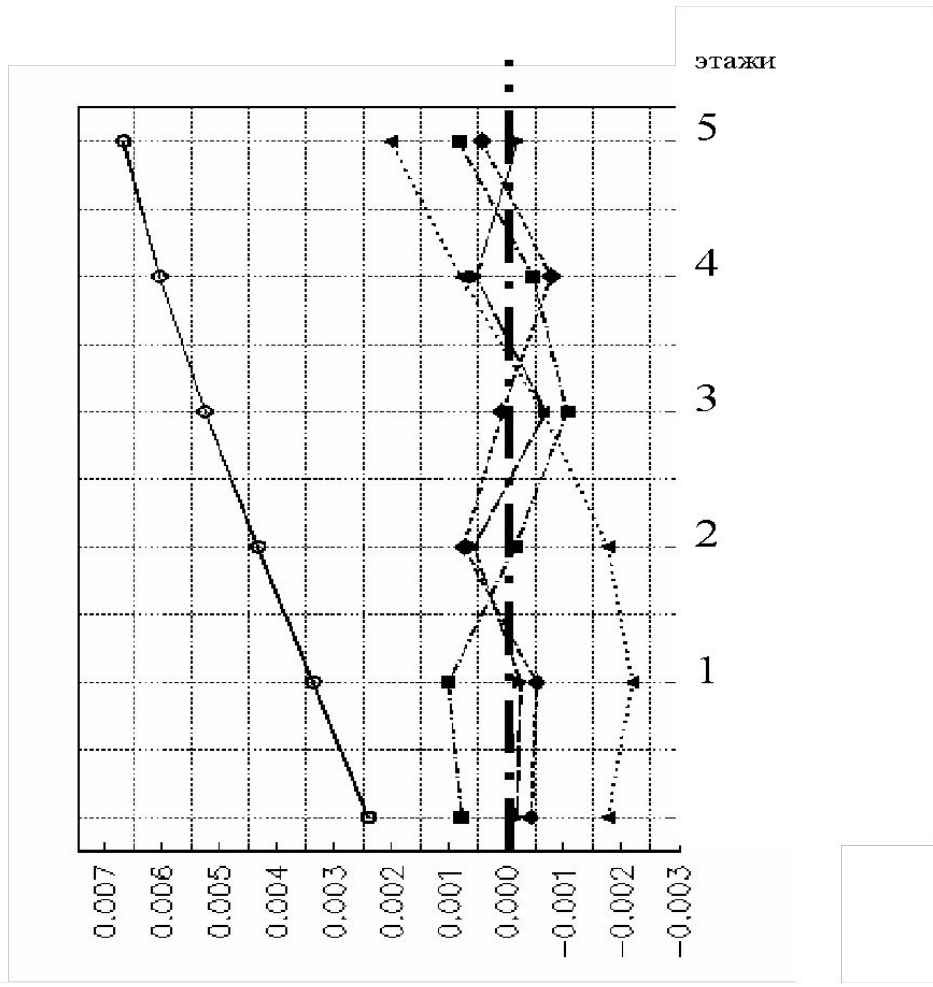


Рис.5.. Формы колебаний здания при $E_0=30\text{МПа}$
 ○ – первая форма колебаний; □ – вторая форма колебаний
 ◇ – третья форма колебаний; ◆ – четвертая форма колебаний
 ✕ – пятая форма колебаний

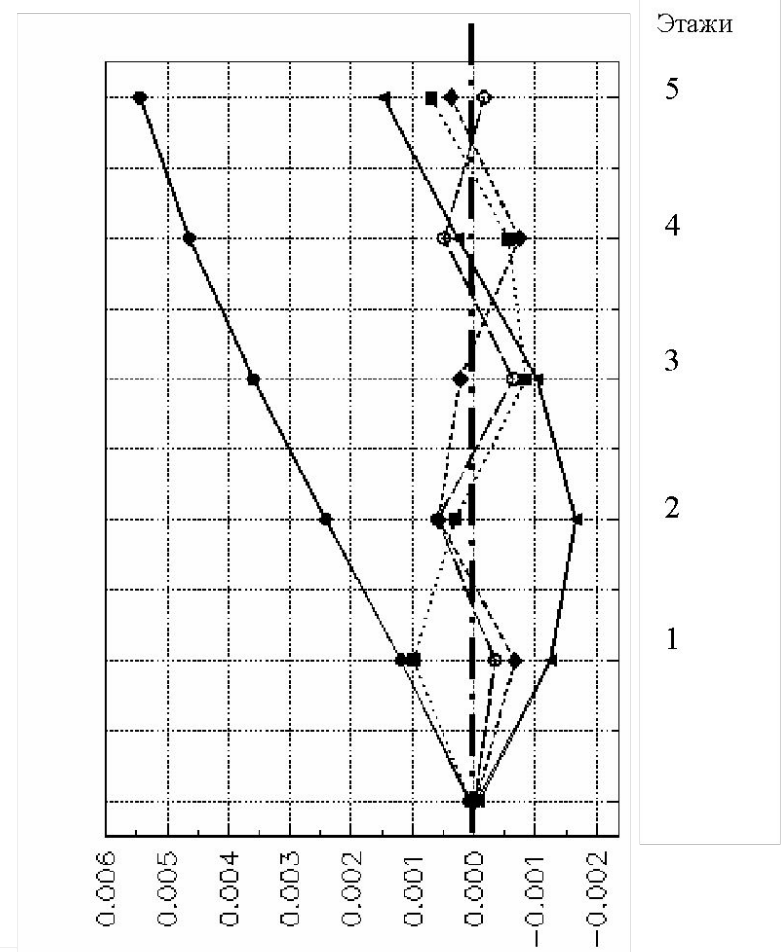
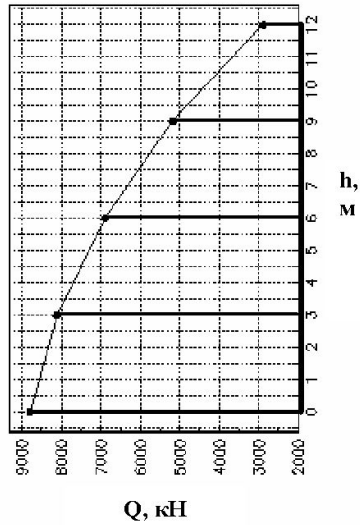
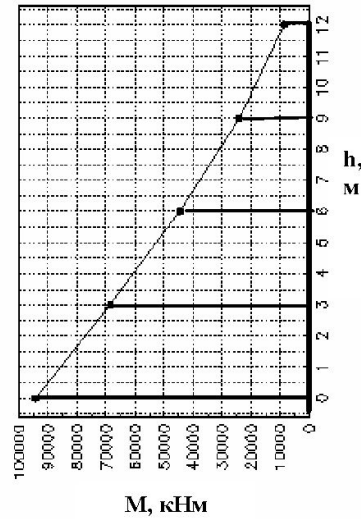


Рис 7. Формы колебаний здания при $E_0=1000\text{ МПа}$
 • - первая форма колебаний; □ - вторая форма колебаний;
 ◇ - третья форма колебаний; ◆ - четвертая форма колебаний;
 ○ - пятая форма колебаний

ПРИМЕР

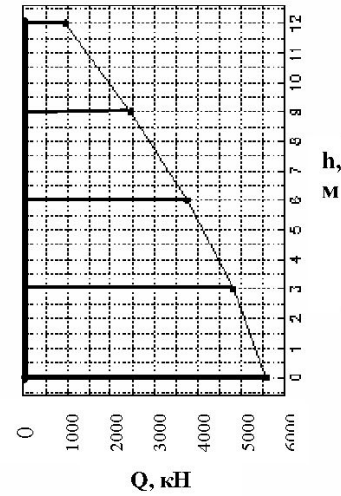


h,
м

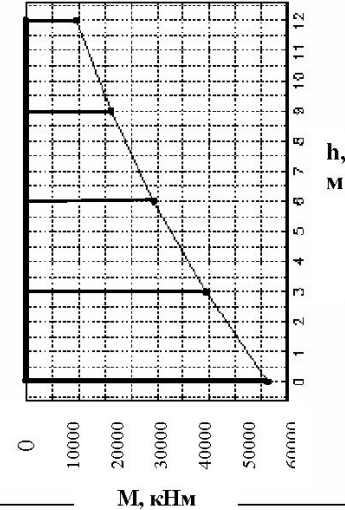


h,
м

Рис.8. Эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов по высоте здания при $E_0=1000 \text{ МПа}$



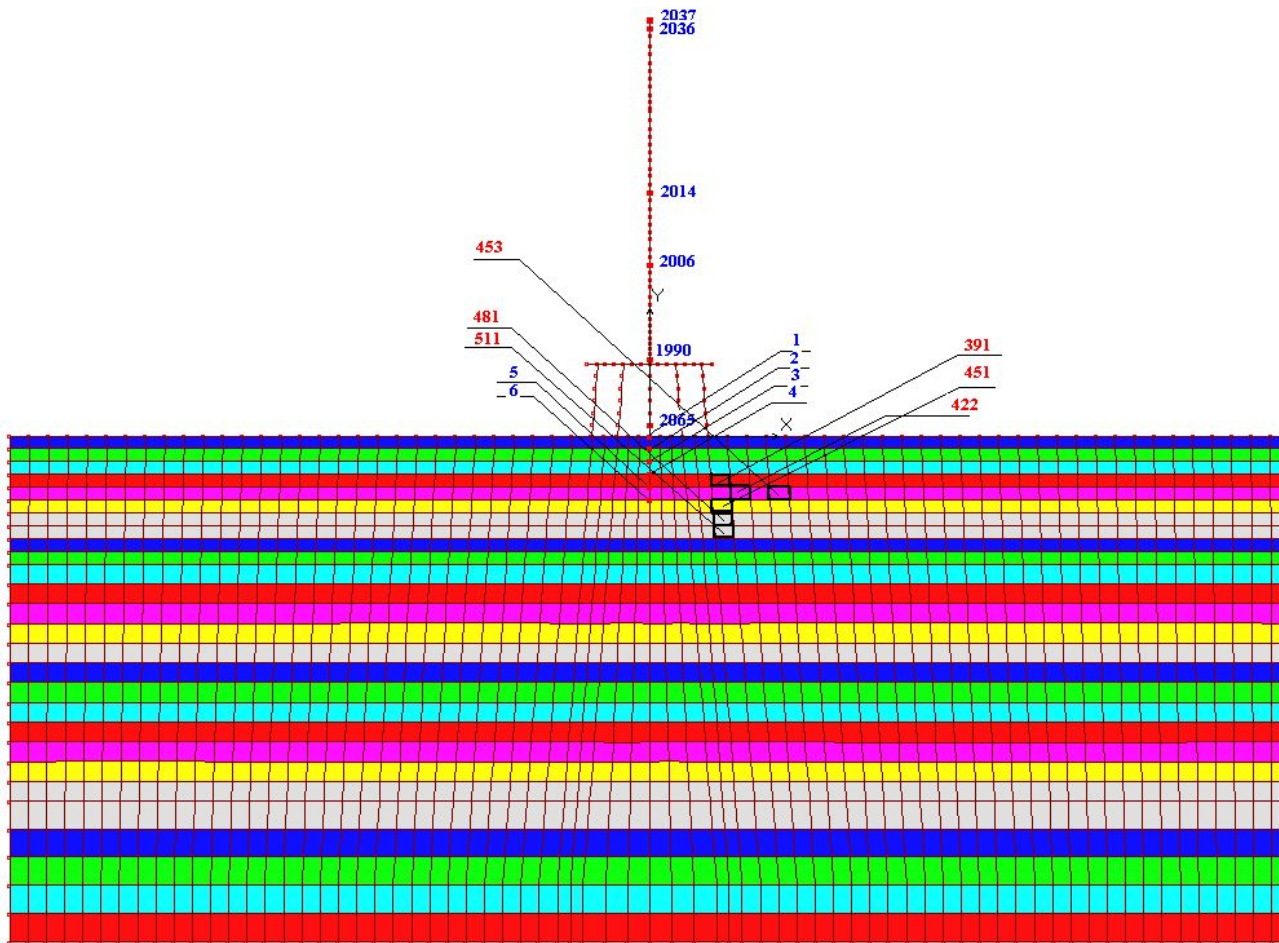
h,
м



h,
м

Рис.6. Эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов по высоте здания при $E_0=30 \text{ МПа}$

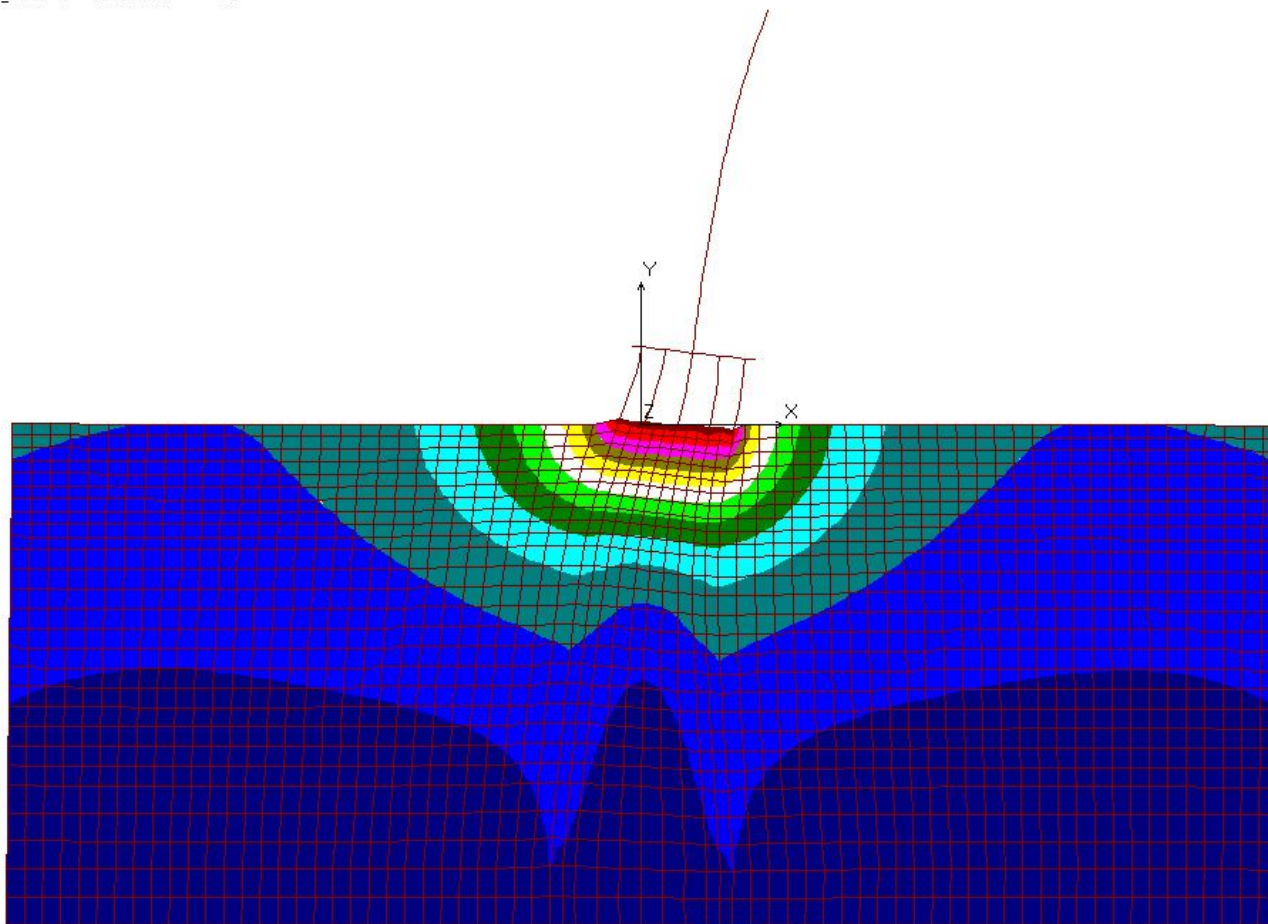
Расчётная схема опоры и грунтового основания



Форма № 1

собственных колебаний опоры

F_Mode=1 0.517897 Hz



СЕЙСМОСТОЙКИЕ ФУНДАМЕНТЫ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ

Искусственные основания

- Важнейшим для инженерной практики вопросом остается **назначение расчетного уровня сейсмического воздействия на здание**, возведенное на искусственном основании. Этот вопрос практически не затрагивается в исследованиях по механике грунтов и фундаментостроению. В последнем проекте норм Туркмении предлагается снижать расчетную нагрузку на 1 балл, т.е. в 2 раза. Это в целом справедливо для легких сооружений. По графику на рис. 2 нагрузка снижается в 1.7 раза. Для массивных сооружений расчетные ускорения основания при отсутствии сооружения снизятся, но нагрузка на сооружение возрастет. Для ответа на поставленные вопросы требуется серьезное развитие инженерных методов учета динамического взаимодействия сооружения с основанием.
- Мало исследован вопрос использования **других типов уплотненных грунтовых подушек**. Так, при строительстве на вулканических пеплах производится вытрамбовка котлована и засыпка его уплотненным грунтом, например, тем же пеплом. Его модуль деформации в 3-4 раза выше, чем пепла естественного залегания, но в 3-4 раза ниже, чем у песчано-гравийной смеси.

СЕЙСМОСТОЙКИЕ ФУНДАМЕНТЫ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ

Искусственные основания

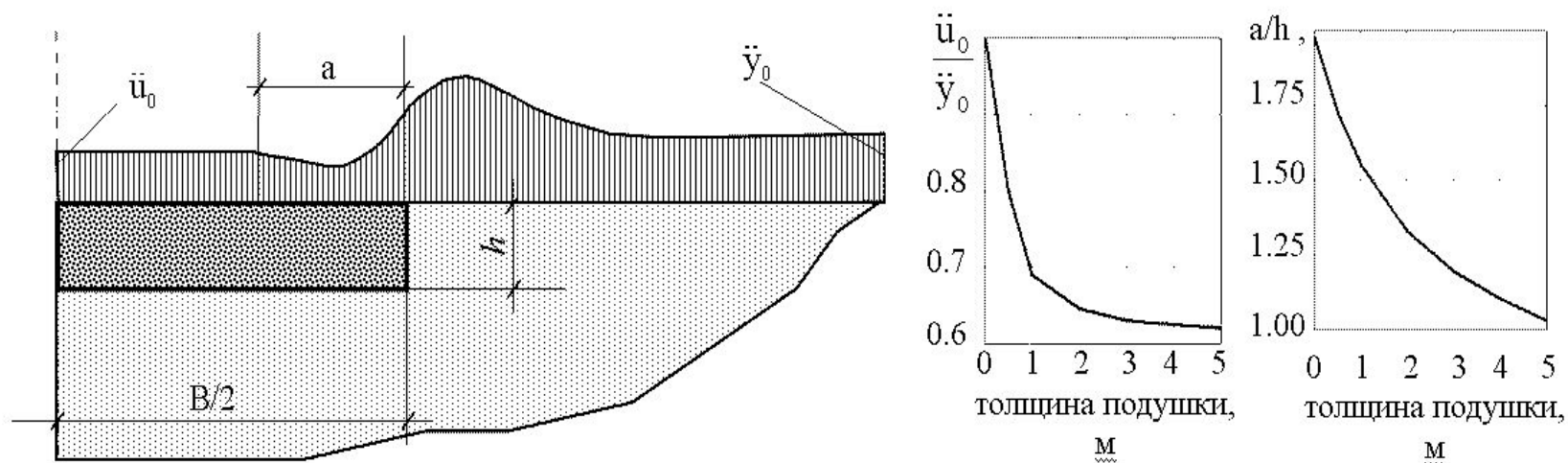


Рис.2. Характер ускорений поверхности основания в зоне грунтовой подушки

СЕЙСМОСТОЙКИЕ ФУНДАМЕНТЫ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ

Свайный ростверк с промежуточной грунтовой подушкой

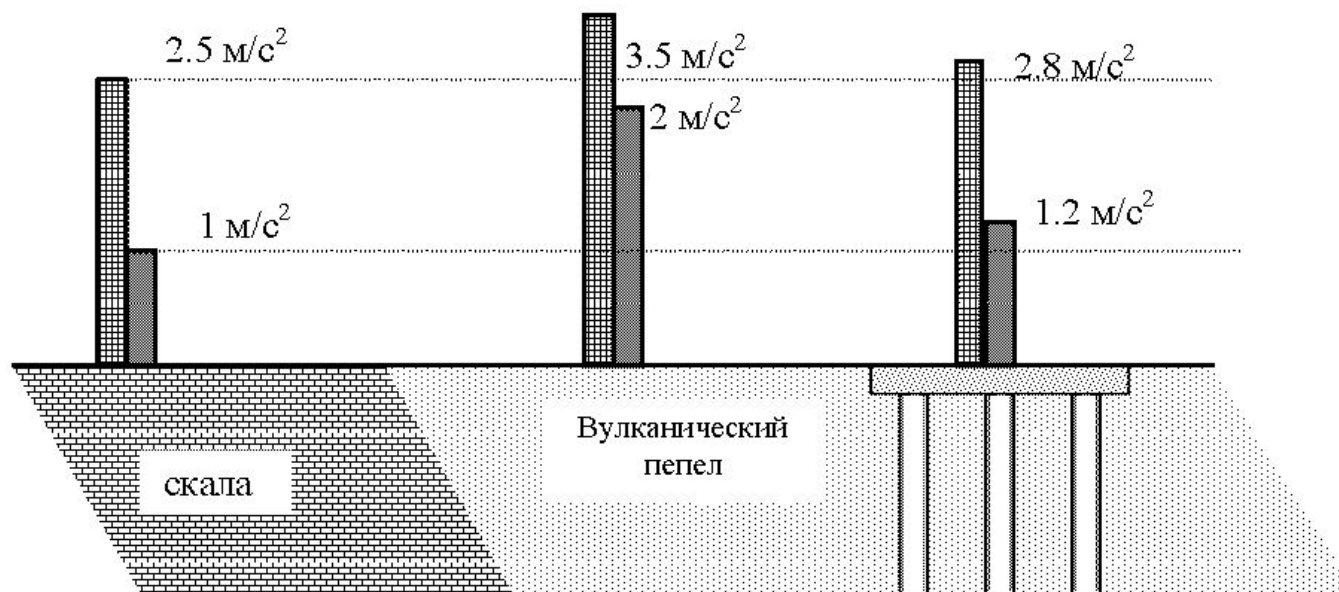


Рис.3. Характер снижения ускорений на дневной поверхности (правый столбик) и верхнем этаже (левый столбик) 4-х этажного здания