

**Специальные системы сейсмозащиты
зданий и сооружений.
Сейсоизолирующие фундаменты**

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ УСТРОЙСТВА СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

- Под сейсмоизоляцией понимается "существенное снижение сейсмического воздействия на часть сооружения, расположенную выше фундамента, путем установки каких-либо систем или элементов между частью сооружения и фундаментом" (Я.М.Айзенберг)
- Под **сейсмоизоляцией** мы будем понимать системы уменьшения энергии, передаваемой сооружению в процессе сейсмических колебаний, за счет установки в некотором уровне элементов повышенной податливости, приводящих к отстройке спектра сооружения от спектра воздействия в длиннопериодную область.
- Таким образом, любая система сейсмоизоляции должна включать три основные части: **жесткую надстройку, сейсмоизолирующий элемент и поддерживающую конструкцию.**
- Уже с возникновением и развитием теории сейсмостойкости (1900 - 1925 гг.) задаче сейсмоизоляции сооружений стало уделяться значительное внимание. Так в 1925 г. М. Вискордини описал конструкции катковых сейсмоизолирующих опор и опорных колонн со сферическими верхними и нижними торцами .
- Первый проект системы сейсмоизоляции был разработан французской корпорацией "*Oil state industry*" применительно к мостам. В 1959 г. в г. Ашхабаде (Туркмения) по проекту инженера Ф.Д.Зеленькова впервые был построен дом с сейсмоизолированным фундаментом. К числу первых сейсмоизолированных сооружений следует отнести и здание школы на резинометаллических опорах, построенного в г. Скопле (Югославия) по проекту швейцарских специалистов в 1968 г.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЗАЩИТЫ

АКТИВНЫЕ (с источником энергии)

С источником энергии, соизмеримым с энергией сейсмических колебаний сооружения

ПОЛУАКТИВНЫЕ
источник энергии используется только для запуска пассивной сейсмозащиты

ПАССИВНЫЕ

СЕЙСМОИЗОЛЯЦИЯ

Стационарная

Адаптивная

СЕЙСМОГАШЕНИЕ

ДГК

Демпферы

При отсутствии возвращающей силы (сейсмопояс)

При наличии возвращающей силы

Пластические

Вязкие (гидравлические)

На упругих элементах

Гравитационная
(на кинематических элементах)

Деформационные

Сухого трения

Подвесная

Опорная

Ударные

Свободная

Заклиненная

Упругие

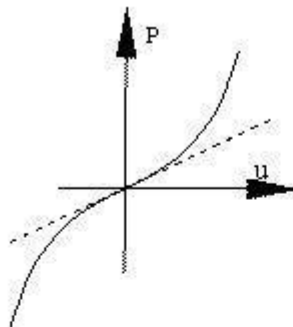
С положительной жесткостью

С отрицательной жесткостью

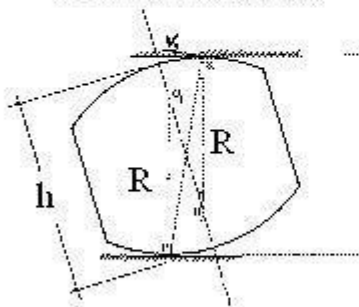
Пружинные

Маятниковые

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ПО ХАРАКТЕРУ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙ СИЛЫ



ОПОРЫ НАЗИНА

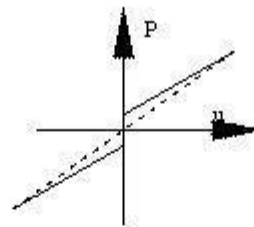


ПОЛНОЕ УРАВНЕНИЕ

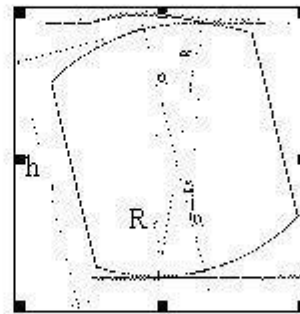
$$\ddot{\alpha} 4 - 4\chi \cos \alpha + \chi^2 |1 + 2\chi \alpha^2 \sin \alpha + \frac{\xi}{R} \chi \sin \alpha = 0$$

ЛИНЕАРИЗОВАННОЕ
УРАВНЕНИЕ

$$\ddot{\alpha} + k^2 \alpha = 0$$



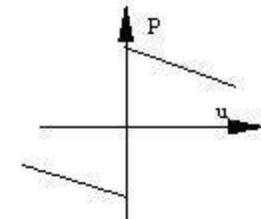
ОПОРЫ БЕЗРУКОВА



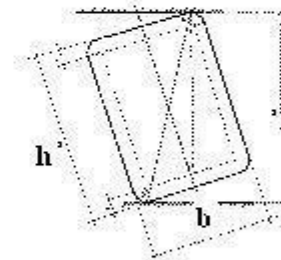
$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} 2 + \chi^2 - 2\chi(\cos \varphi - \cos \alpha) + 2\cos(\varphi - \alpha) | + \\ \alpha (\chi \sin \alpha - \sin(\varphi - \alpha)) + \frac{\xi}{R} (\sin \alpha - \sin(\varphi - \alpha)) = 0; \\ \chi = (2R - h) / R \end{aligned}$$

ЛИНЕАРИЗОВАННОЕ
УРАВНЕНИЕ

$$\chi = 2, \quad -4\chi \ddot{\alpha} + k_6^2 \chi \alpha = 0$$



ОПОРЫ КУРЗАНОВА
ОПОРЫ ЧЕРЕПИНСКОГО
ОПОРЫ НЕЙБУРГА



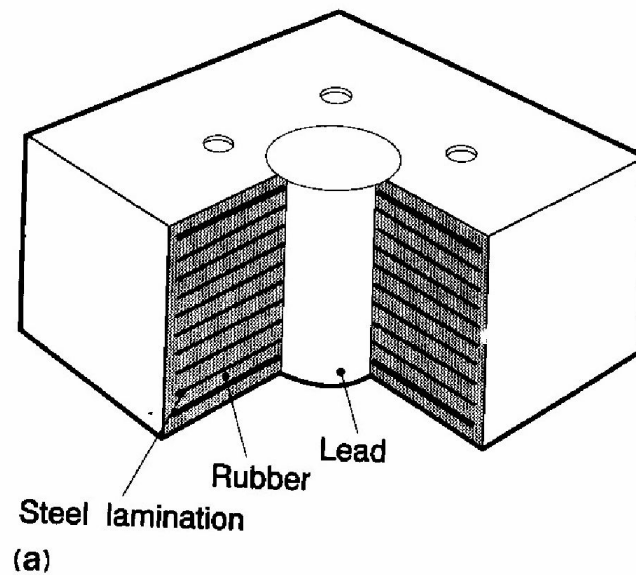
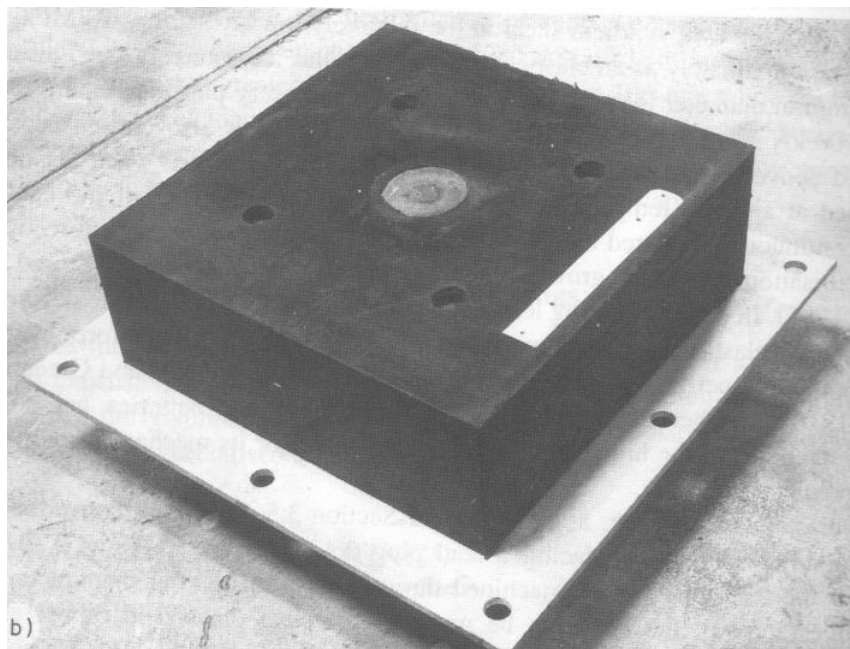
$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} 1 + \beta^2 + 4v(v + \cos \alpha + \beta \sin \alpha) | + 2v\alpha^2 (\beta \cos \alpha - \sin \alpha) + \\ + \frac{\xi}{R} (\beta \cos \alpha - \sin \alpha) \text{sign} \alpha = 0; \quad \beta = b - \frac{2r}{h}, \quad v = \frac{r}{h} \end{aligned}$$

УКОРОЧЕННОЕ УРАВНЕНИЕ

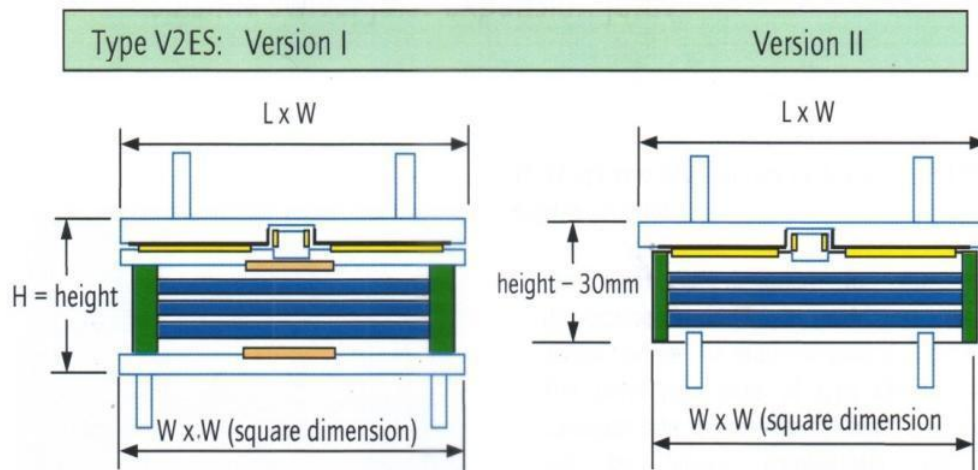
$$\ddot{\alpha} - k^2 \alpha \cdot \text{sign} \alpha = 0$$

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СЕЙСМОИЗОЛИРУЮЩИХ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ

РЕЗИНОВЫЕ ОПОРНЫЕ ЧАСТИ (РОЧ)



РОЧ ФИРМЫ MAURER SÖHNES

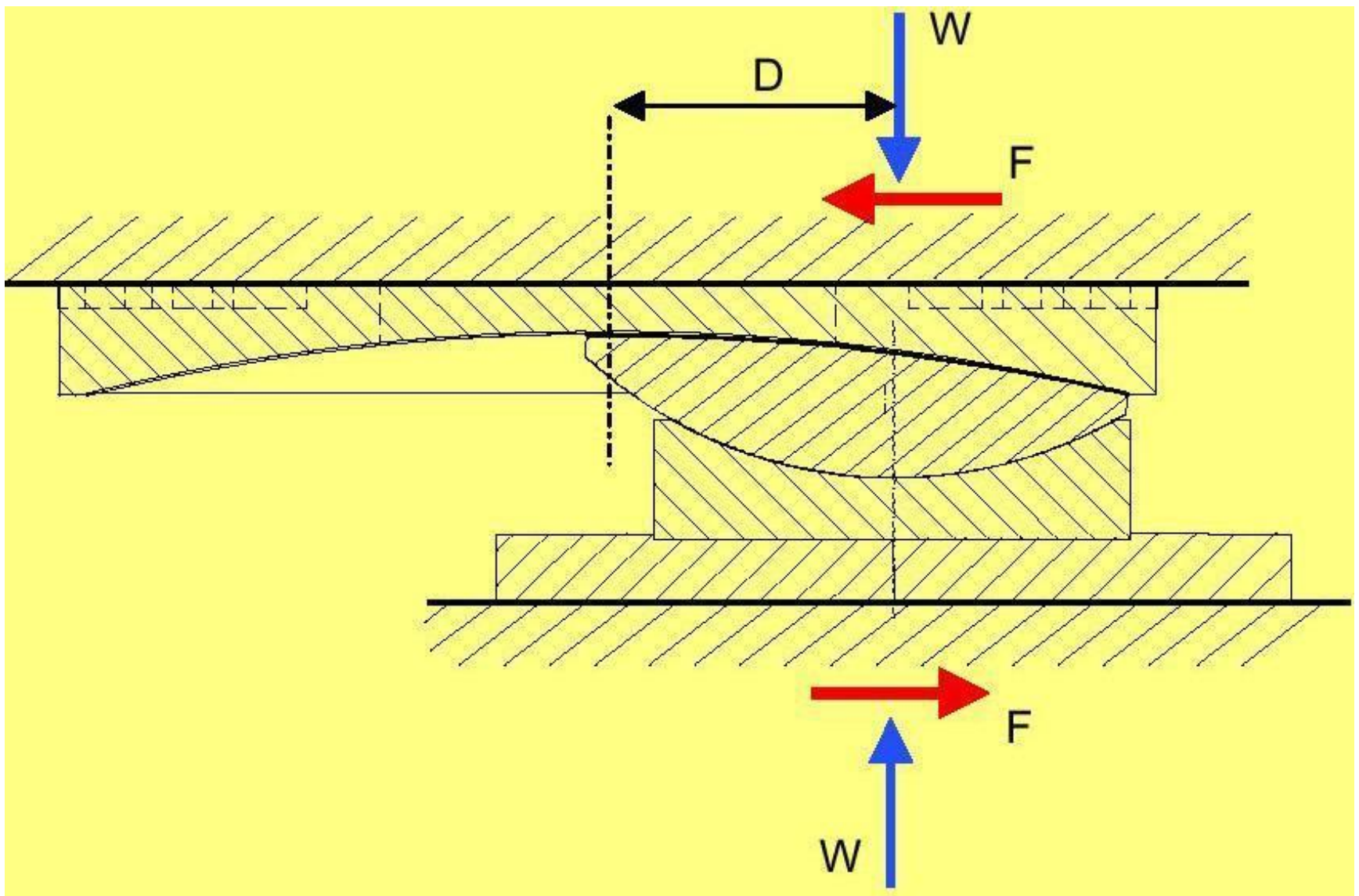


max. service load	Max. displacement s laterally (service/seismic) [+/- -mm]																	
	W			s			H			W			s			H		
	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
600	350	35	68	175	350	41	98	200	350	45	108	215	350	46	120	225		
900	400	35	68	175	400	41	98	200	400	45	108	215	400	46	120	225		
1200	450	40	82	190	450	52	113	220	450	57	132	235	450	64	165	265		
2400	550	40	82	190	550	52	113	220	550	57	132	235	550	64	165	265		
3600	650	46	98	220	650	70	150	265	650	84	198	310	650	94	248	370		
4200	700	53	113	230	700	74	158	270	700	91	202	310	700	112	285	410		
5800	800	53	150	230	800	74	158	270	800	91	202	320	800	112	285	410		
6600	850	53	150	230	850	74	158	270	850	91	202	320	850	112	285	410		
7500	900	63	180	260	900	88	189	300	900	129	297	400	900	147	378	470		
8500	950	63	180	270	950	88	189	310	950	129	297	400	950	147	378	480		
9500	1000	63	180	270	1000	88	189	330	1000	129	297	415	1000	147	378	500		
14000	1300	63	180	280	1300	88	189	330	1300	129	297	415	1300	147	378	500		
17000	1400	63	180	280	1400	88	189	330	1400	129	297	415	1400	147	378	500		

НЕКОТОРЫЕ ТИПЫ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОПОР

№	α	Тип и схема опоры	Уравнения движения опоры	Упрощенный вид однородных уравнений
1	Опора Назина В.В.		$\ddot{\alpha}(4 - 4\chi \cos \alpha + \chi^2) + 2\chi \dot{\alpha}^2 \sin \alpha + \frac{g}{R} \chi \sin \alpha = 0$ $\chi = 2 - h/R$	$\ddot{\alpha} + k_1^2 \alpha = 0; \quad k^2 = k_0^2; \quad \tau = t/t_0$
2	Опора Найбурга Э.В.		$\ddot{\alpha}(4 + 4\chi \cos \alpha + \chi^2) + 2\chi \dot{\alpha}^2 \sin \alpha + \frac{g}{r} \chi \cos \alpha \sin \alpha = 0$ $\chi = b/r$	$\ddot{\alpha} + k_2^2 1.3 (\mu^{3/2} \alpha)^{1/21} = 0$
3	Опора Курзанова А.М.		$\ddot{\alpha}(1 + \beta^2 + 4v(v + \cos \alpha + \beta \sin \alpha)) + 2v \dot{\alpha}^2 (\beta \cos \alpha - \sin \alpha) + \frac{g}{R} (\beta \cos \alpha - \sin \alpha) \text{sign} \alpha = 0;$ $\beta = b - \frac{2r}{h}; \quad v = \frac{r}{h}$	$\ddot{\alpha} + k_3^2 1.3 (\mu^{3/2} \alpha)^{1/21} = 0$
4	Опора "шар в лунке"		$\ddot{\alpha}(2 + 2 \cos \alpha) - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha + \frac{g}{r} (\chi - 1) \sin \alpha = 0$ $\chi = R/r$	$\ddot{\alpha} + k_4^2 \alpha = 0$
5	Опора "шар в двух лунках"		$\ddot{\alpha} + \frac{g}{2R} \left(1 - \frac{r}{R}\right) \sin \alpha = 0$	$\ddot{\alpha} + k_5^2 \alpha = 0$
6	Опора Безрукова Ю.И.		$\ddot{\alpha}(2 + \chi^2 - 2\chi(\cos \varphi - \cos \alpha) + 2\cos(\varphi - \alpha)) + 4\dot{\alpha} - k_1^2 1.3 / \pi (\varphi - \alpha) \mu^{3/42} (\varphi - \alpha)^{1/21} = 0$ $\dot{\alpha}^2 (\chi \sin \alpha - \sin(\varphi - \alpha)) + \frac{g}{R} (\sin \alpha - \sin(\varphi - \alpha)) = 0;$ $\chi = (2R - h)/R$	<p>при больших колебаниях: $0.1 \leq \chi \leq 0.7, \alpha = 0.1$</p> <p>при малых колебаниях: $0.1 \leq \chi \leq 0.7, \alpha = 0.01, \ddot{\alpha} - \frac{1}{2} k_6^2 (\varphi - \alpha) = 0$</p> <p>при больших колебаниях: $\chi = 2, -4\chi \ddot{\alpha} + k_6^2 \chi \alpha = 0$</p> <p>при малых колебаниях: $\chi = 2, -4\chi \ddot{\alpha} - \frac{1}{2} k_6^2 (\varphi - \alpha) = 0$</p>
7	Опора Черешинского Ю.Д.		$\ddot{\alpha}(1 + \mu_1^2 + \chi^2 + 2\chi \cos \alpha + 2\mu_1 \sin \alpha) + \frac{\dot{\alpha}^2}{2} (-2\chi \sin \alpha + 2\mu_1 \cos \alpha) + \frac{g}{R} (-\chi \sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha \text{sign} \alpha) = 0;$ $\mu_1 = \frac{b}{2R}; \quad \chi = \frac{h - R}{R}$	$\ddot{\alpha} + k_7^2 \frac{2}{\pi} \mu_1 1.3 (\mu^{3/2} \alpha)^{1/21} = 0$ <p>Примечание: $\text{sign} \alpha = \frac{2}{\pi} 1.3 \mu^{3/42} \alpha^{1/21}, \mu = 100$</p> <p>$k_1, k_2, \dots, k_7$ - частоты колебаний (безразмерные)</p>

ШАРОВАЯ ОПОРНАЯ ЧАСТЬ



**. ШАРОВАЯ ОПОРА, ПОД НАГРУЗКУ 60 КГ,
ВЫПУСКАЕМАЯ ФИРМОЙ MAURER SÖHNES**



**ШАРОВАЯ ОПОРА ДЛЯ МОСТА ВЕНИСИА-МАРТИНЕЗ В
КАЛИФОРНИИ РАЗМЕРОМ 3.73 М С ХОДОМ ± 1.34 М**



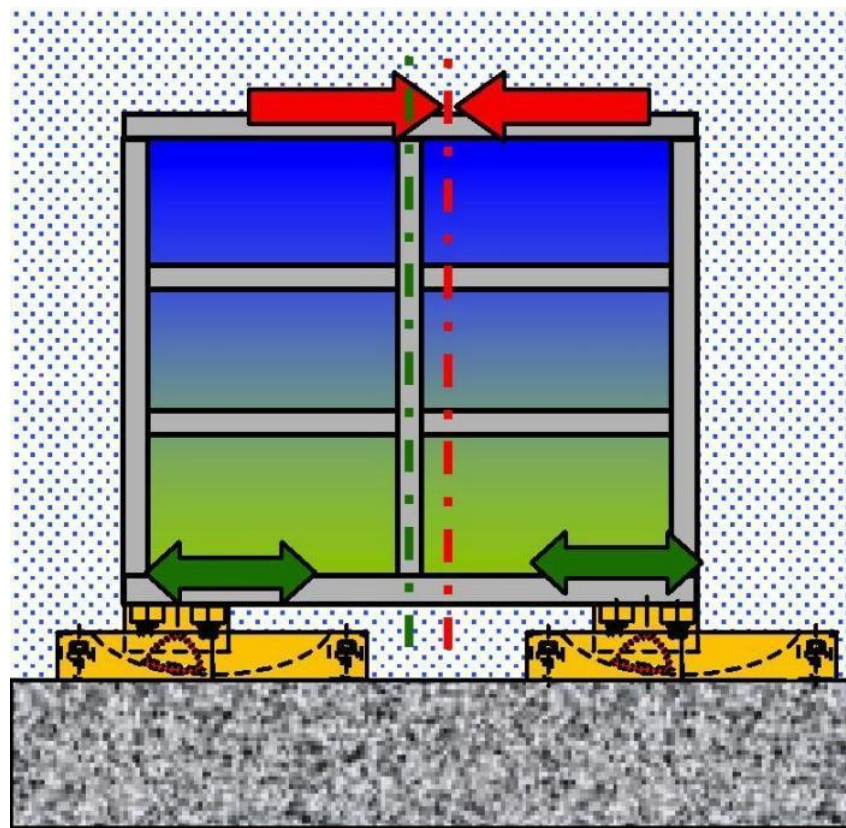
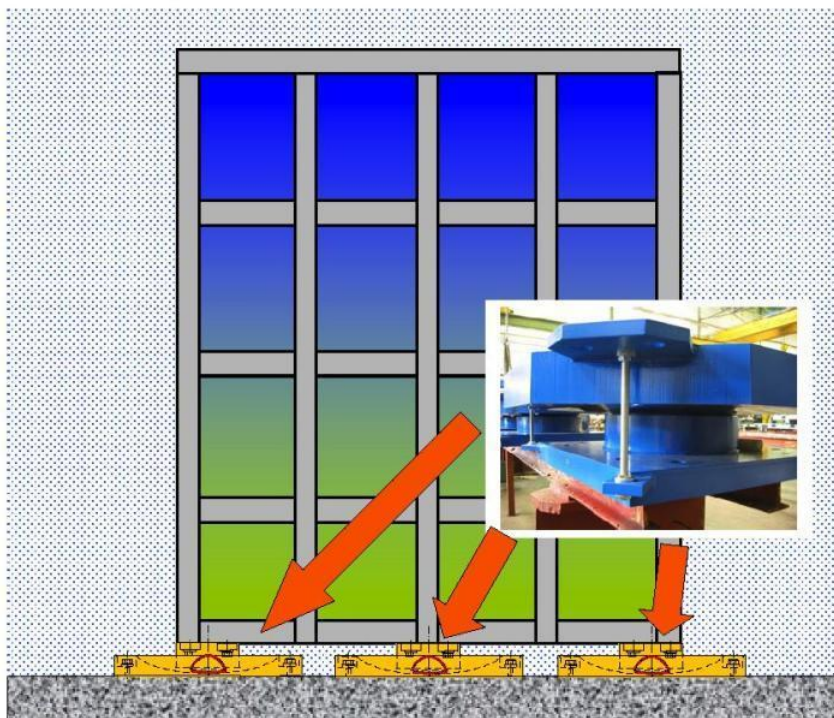
ВНЕШНИЙ ВИД СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ ФИРМЫ FIR-INDUSTRIALE



figure 3 - Isolator with Rundflon[®] spherical bearing
and CME dissipators.

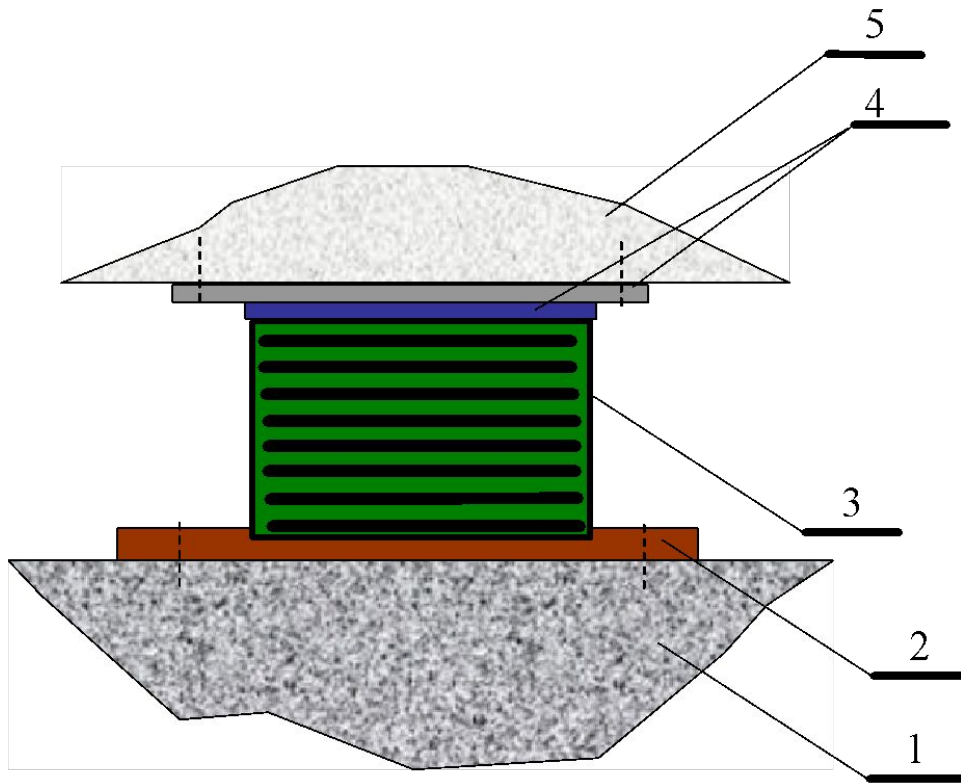
УСТАНОВКА И СМЕЩЕНИЕ ПОД НАГРУЗКОЙ СФЕРИЧЕСКИХ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ

MAURER Premium Seismic Isolation with Spherical Sliding Isolators for Buildings and Tank Structures



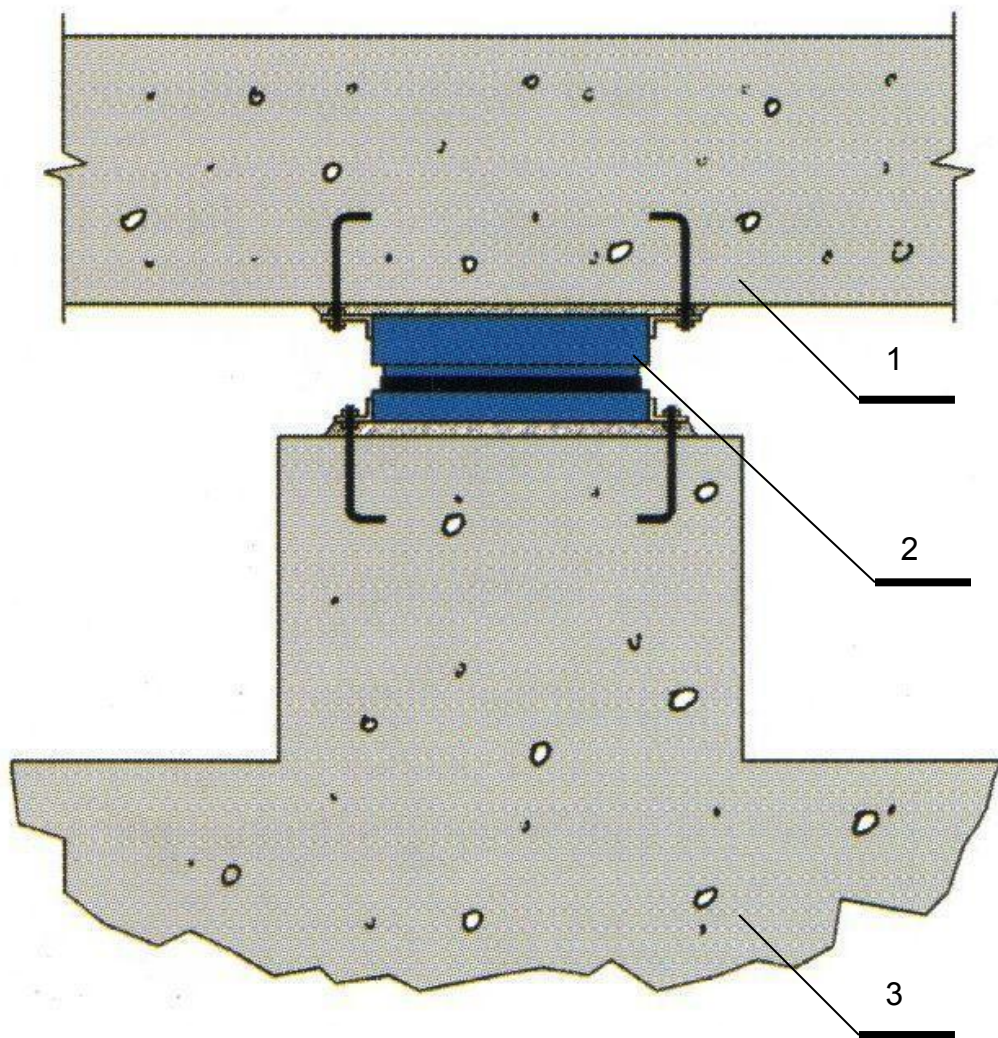
СКОЛЬЗЯЩАЯ ОПОРНАЯ ЧАСТЬ ФИРМЫ

ELECTRICITY DE FRANCE



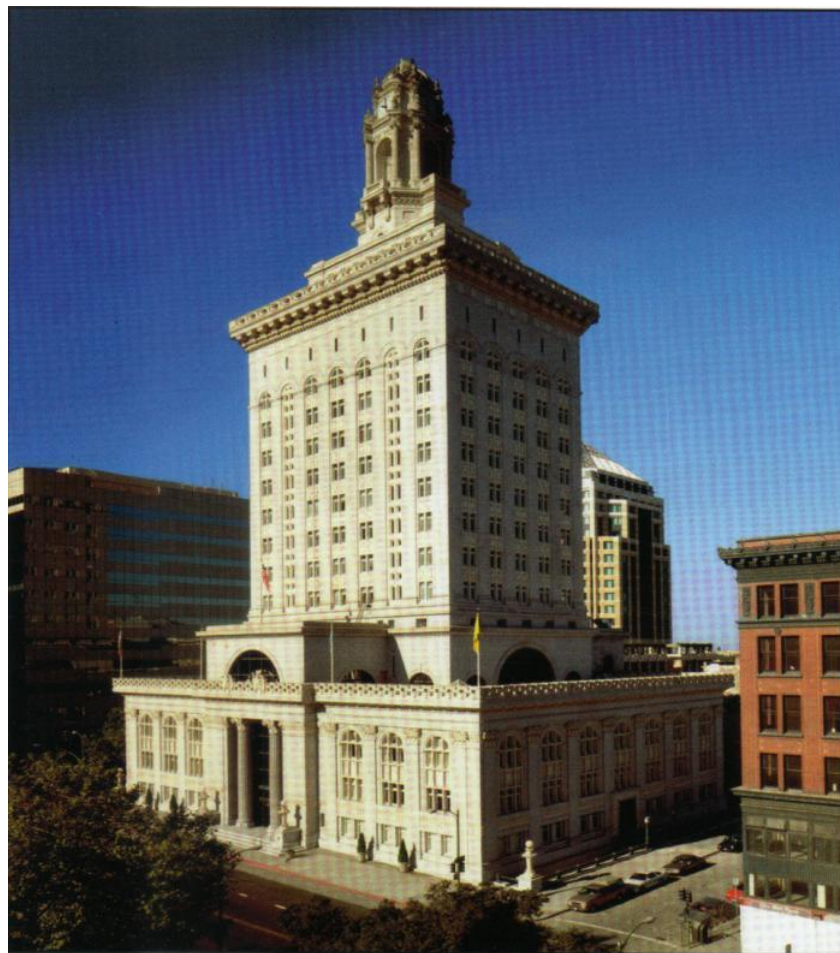
1. Нижняя фундаментная плита
2. Опорный лист
3. РОЧ
4. Фрикционная пара «нержавеющая сталь-свинцовистая бронза»
5. Верхняя фундаментная плита

СХЕМА УСТАНОВКИ СЕЙСМОИЗОЛИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

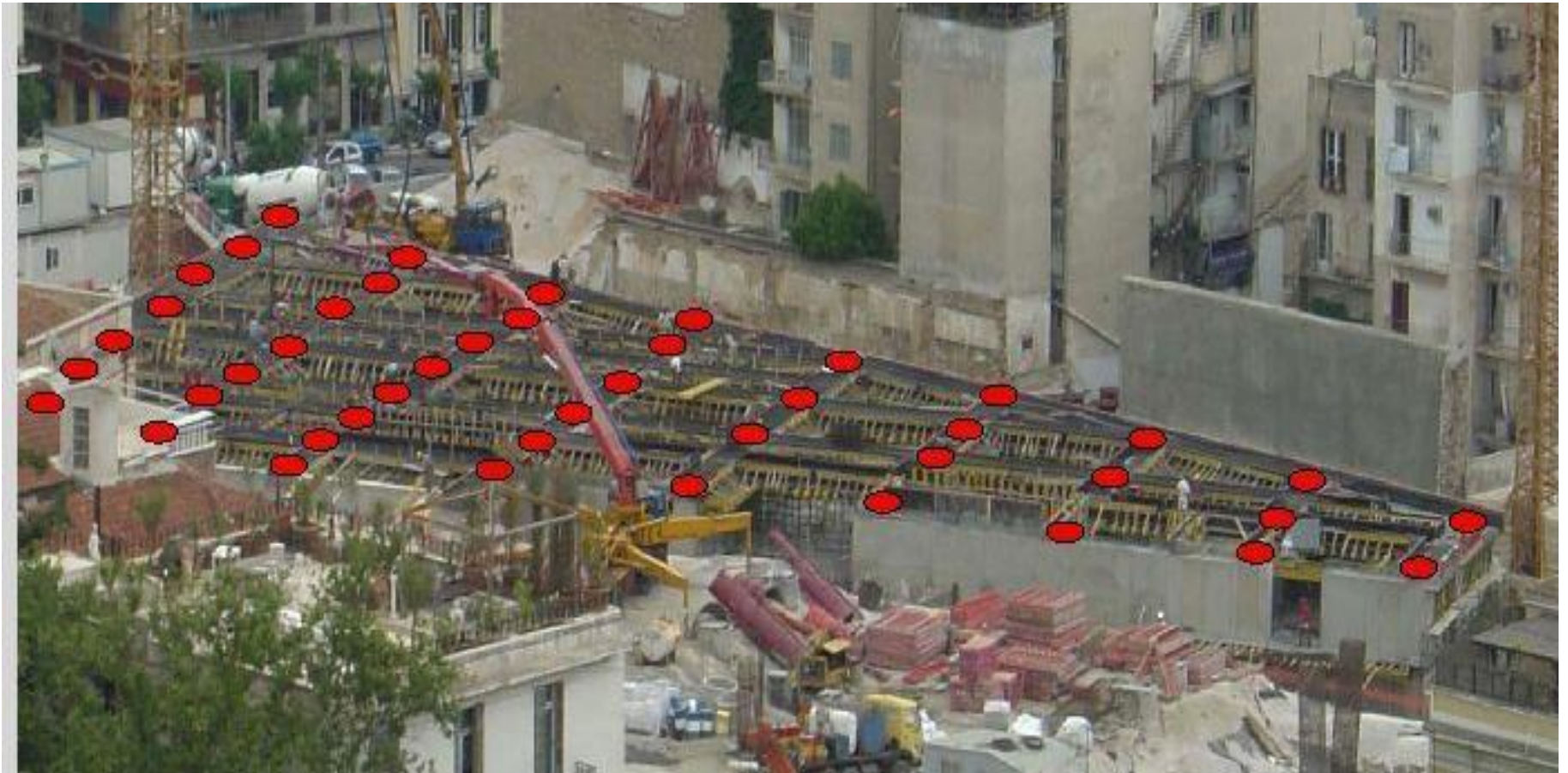


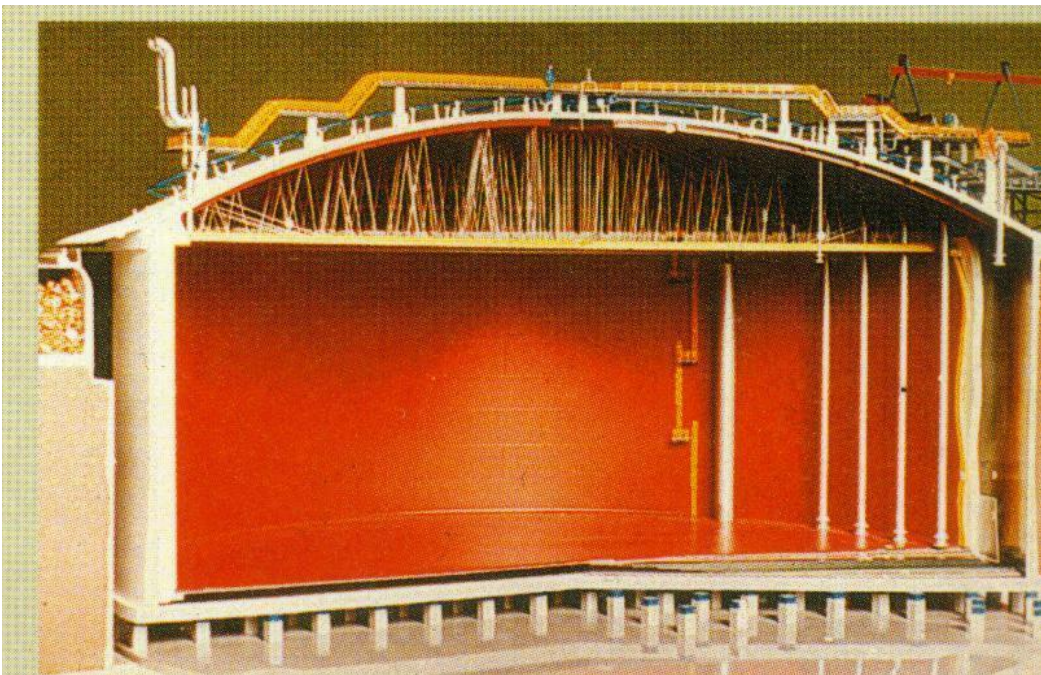
- 1 – верхняя фундаментная плита;
- 2 – сейсмоизолирующая опора;
- 3 – нижняя фундаментная плита

ОДНО ИЗ ПЕРВЫХ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННЫХ ЗДАНИЙ В Г. ОКЛЕНД (США)



**СХЕМА РАССТАНОВКИ СЕЙСМОИЗОЛИРУЮЩИХ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ (ШАРОВЫХ ОПОР) В МУЗЕЕ АКРОПОЛИС В ГРЕЦИИ
(ФИРМА MAURER SÖHNES)**



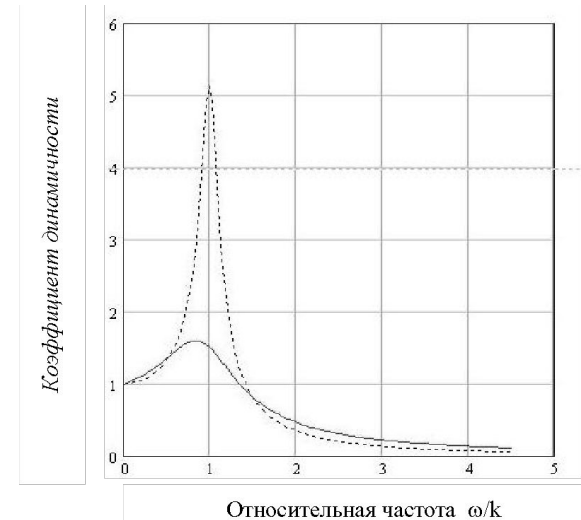


**СЕЙСМОИЗОЛЯ-
ЦИЯ РЕЗЕРВУАРА
НА ОСТРОВЕ
REVITHOUSA
В ГРЕЦИИ**

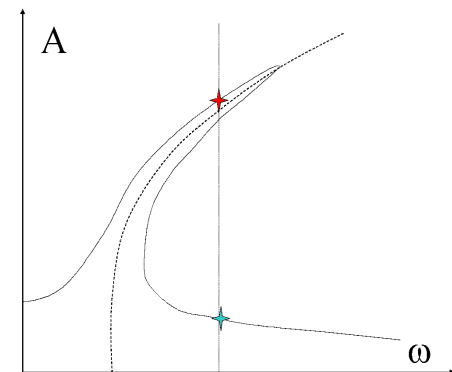


ОСНОВНАЯ КОНЦЕПЦИЯ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ СООРУЖЕНИЙ

- В первых работах по сейсмоизоляции им виброизоляции ошибочно считалось, что сейсмоизоляция должна быть слабодемпфирована. Это заблуждение связано с тем, что АЧХ сейсмической реакции линейной демпфированной системы в зоне виброизоляции поднимается с увеличением демпфирования.
- Ссылаясь на указанный эффект многие авторы стремились запроектировать слабодемпфированную сейсмоизоляцию. Последствия такого решения привели к многочисленным авариям и человеческим жертвам. Детальный анализ работы виброизоляции был дан профессором М.З. Коловским, а для задач сейсмоизоляции - профессором О.А.Савиновым.
-
- Сторонники слабодемпфированной сейсмоизоляции не обращали внимания на смещения сейсмоизолированной системы. Эти смещения достигают 30-50 см и приводят к сбросу сооружения с сейсмоизолирующих опор. Кроме того, при больших смещениях колебания системы становятся нелинейными и АЧХ – многозначной (Рис.3). Повышение демпфирования ведет как к снижению смещений системы, так и к исключению многозначных ветвей АЧХ. **В связи с этим передемпфировать систему всегда лучше, чем недодемпфировать, хотя ускорения системы при этом возрастут.**

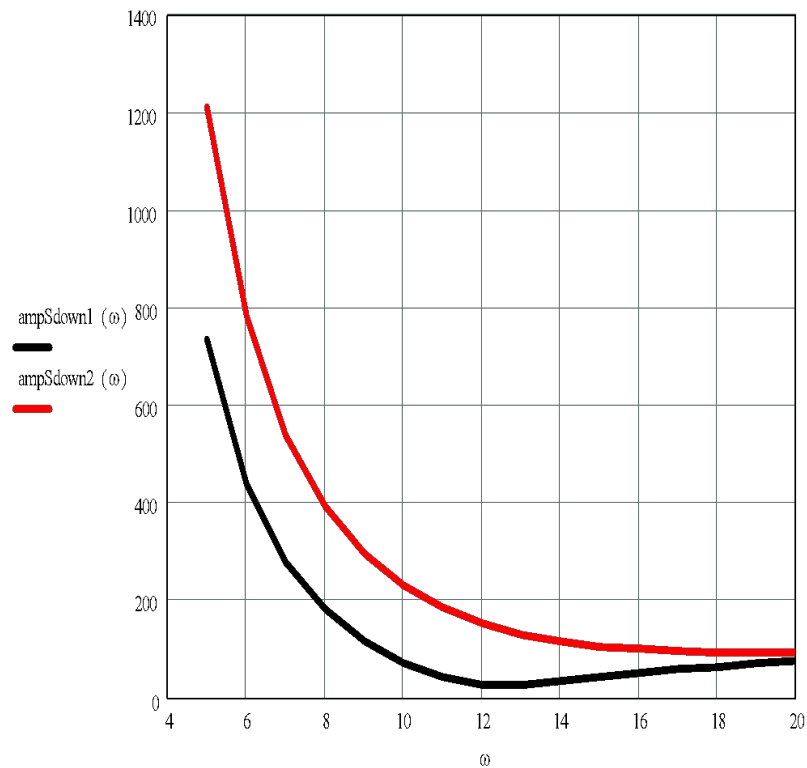
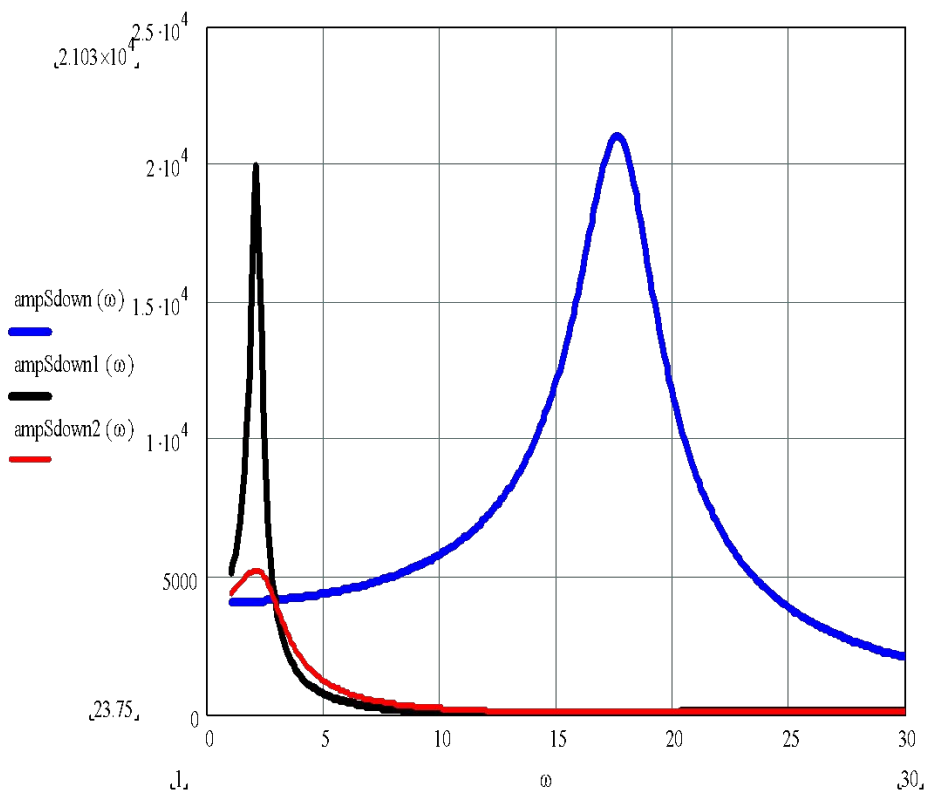


АЧХ для реакции демпфированного осциллятора
сплошная кривая - $\gamma=0.9$; пунктир - $\gamma=0.2$



ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПЕРЕДЕМПФИРОВАНИЯ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

- ВЯЗКОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ



ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПЕРЕДЕМПФИРОВАНИЯ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

СУХОЕ ТРЕНИЕ

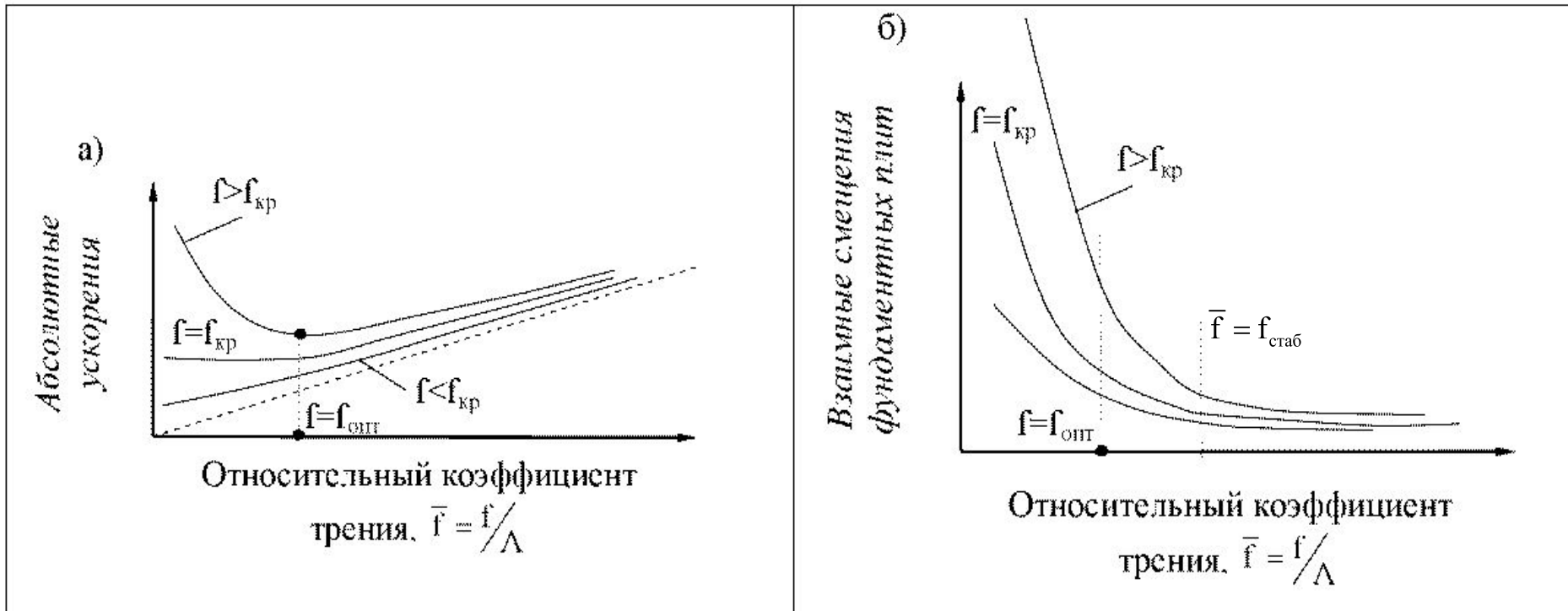
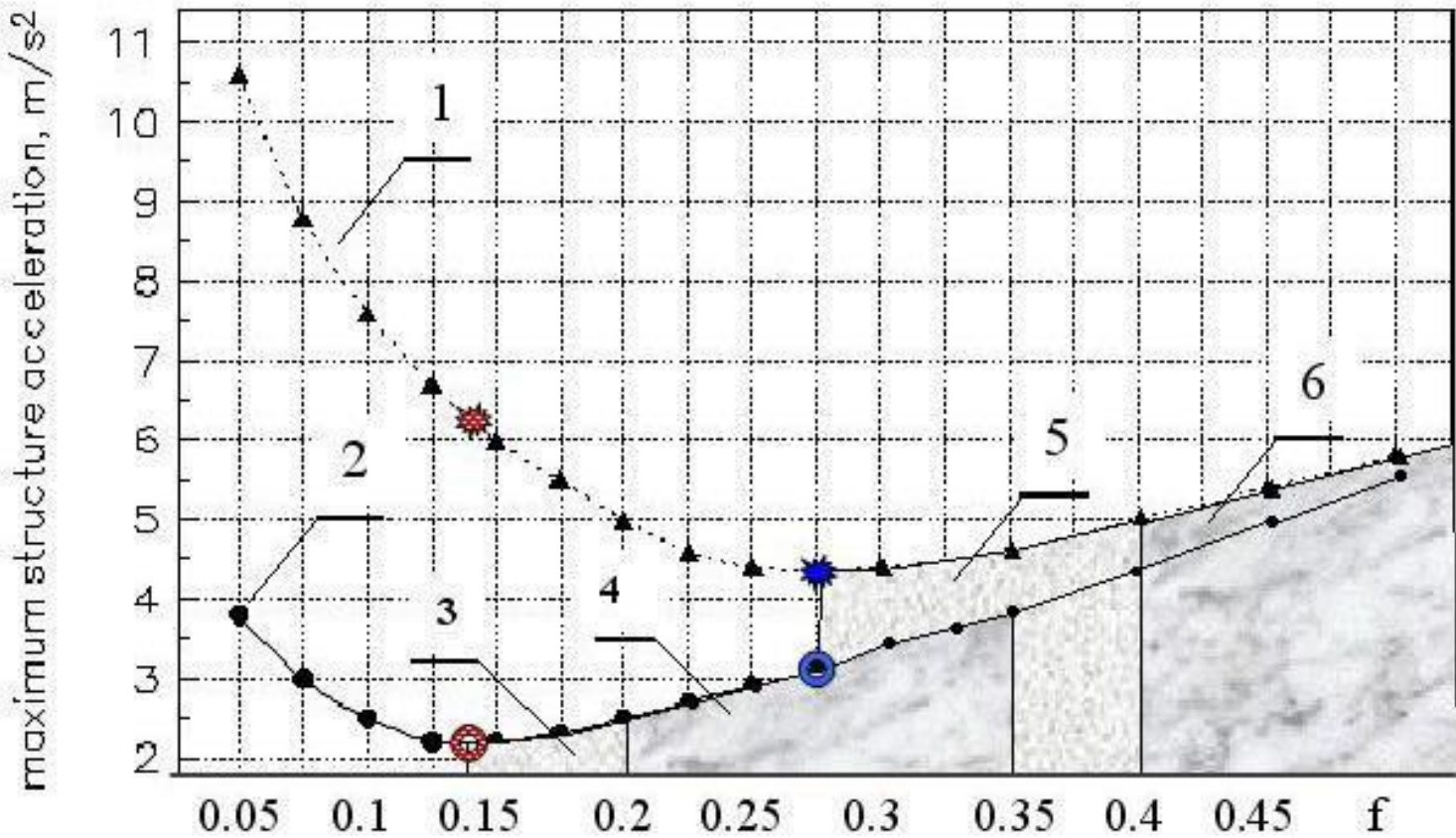


Рис.2. Зависимости абсолютного ускорения и взаимного смещения фундаментных плит сейсмоизолирующего фундамента от относительного коэффициента трения $\bar{f} = f/\Lambda$
(Λ - ускорение основания в долях ускорения силы тяжести g)

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПЕРЕДЕМПФИРОВАНИЯ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

- СУХОЕ ТРЕНИЕ



ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПЕРЕДЕМПФИРОВАНИЯ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ Сейсмоизолирующий скользящий пояс

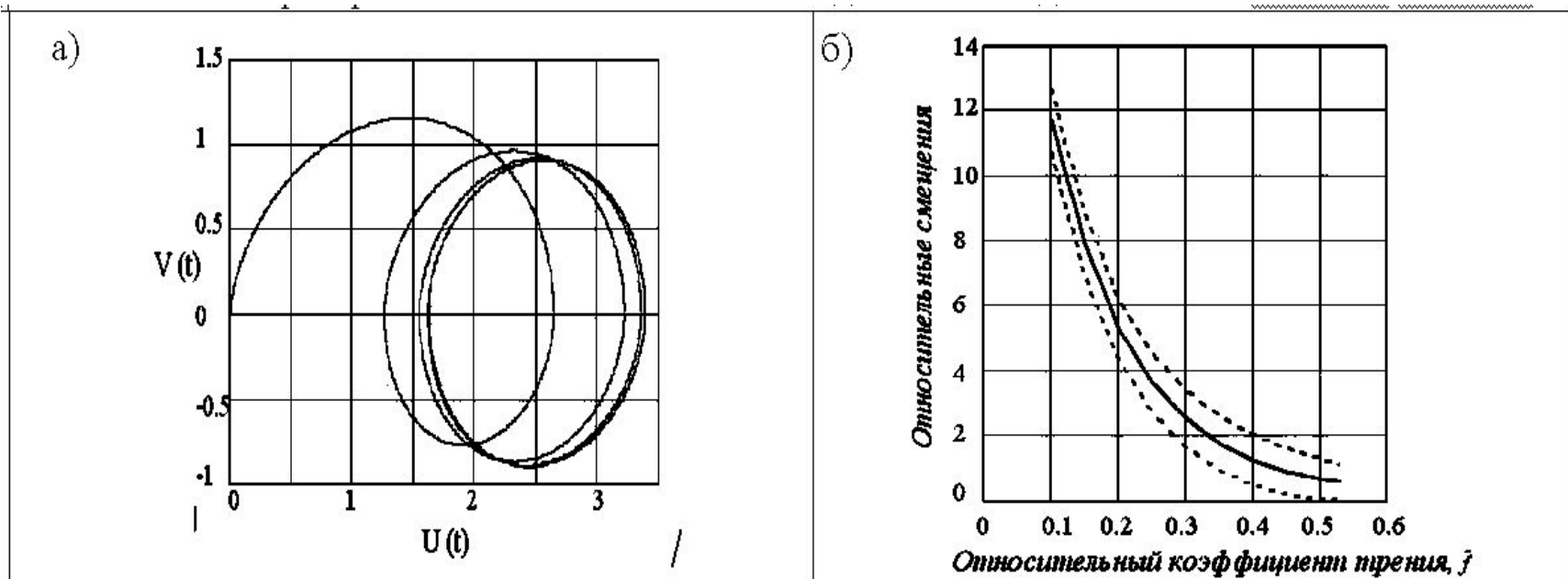
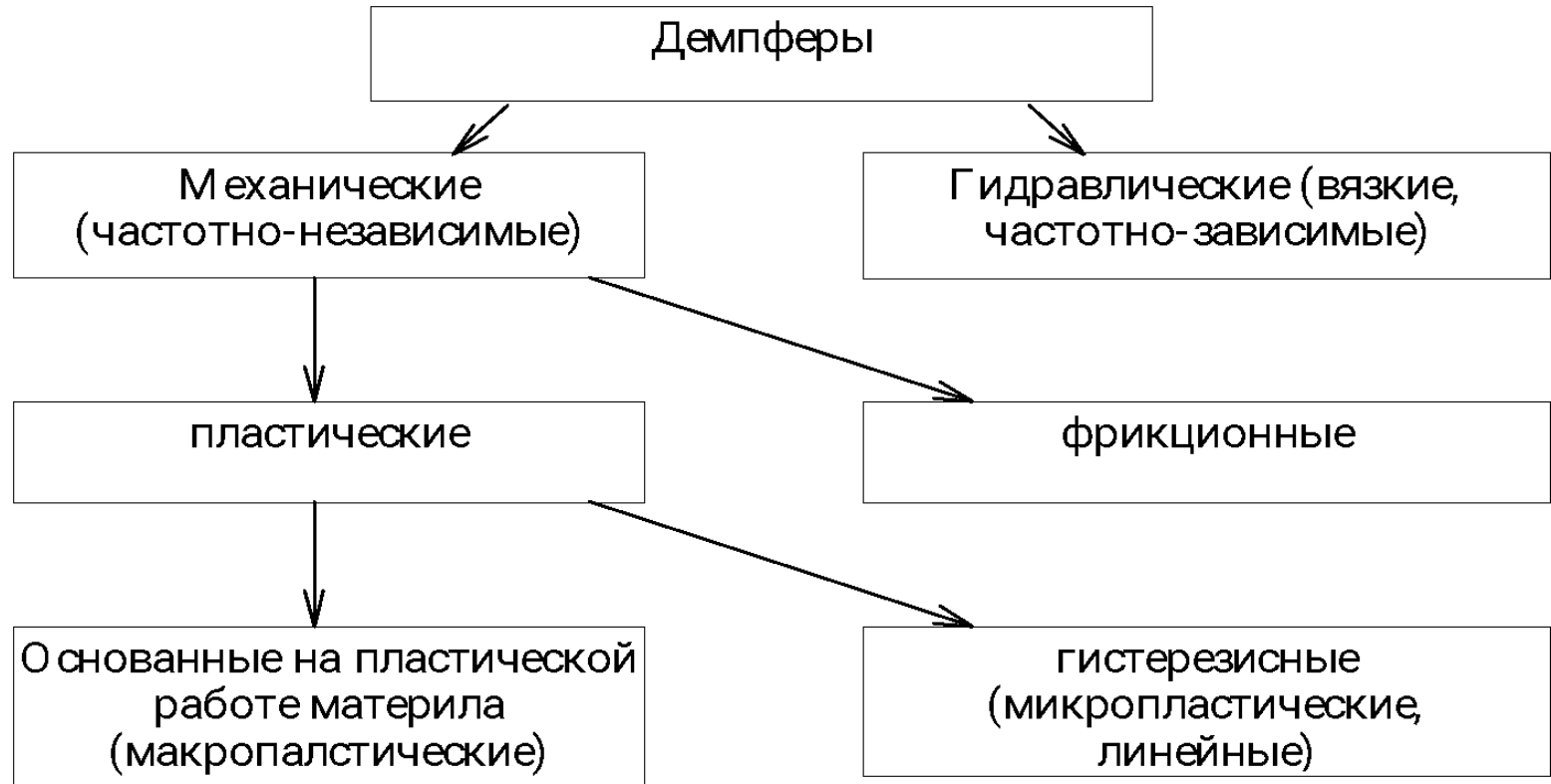


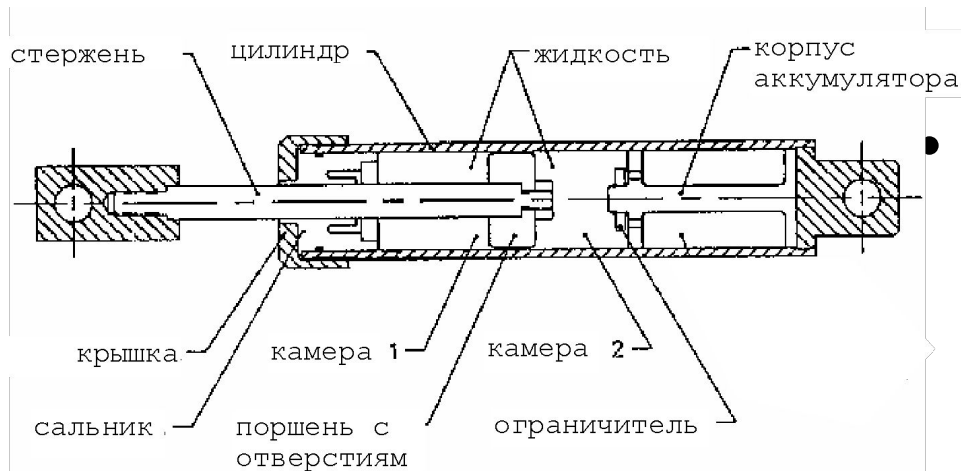
Рис.3. Траектория движения здания с сейсмоизолирующим скользящим фундаментом на фазовой плоскости (а) и зависимость перемещений здания от относительного коэффициента трения (б); сплошная линия – односторонний унос, пунктир – амплитуда вибраций

ДЕМПФИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

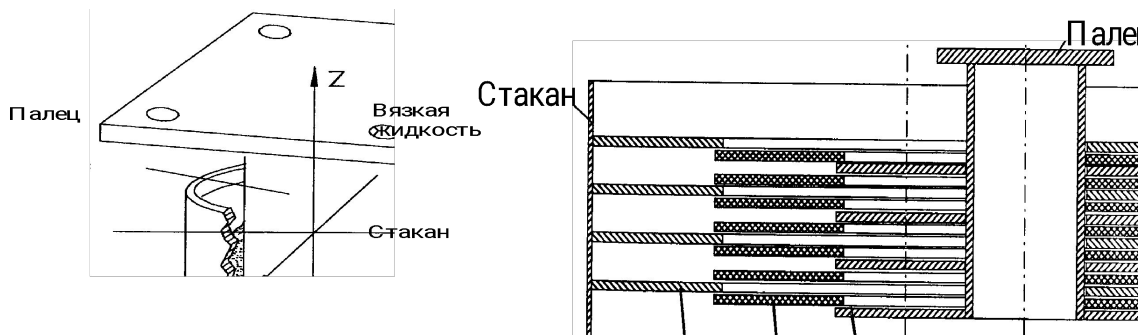


ДЕМПФИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

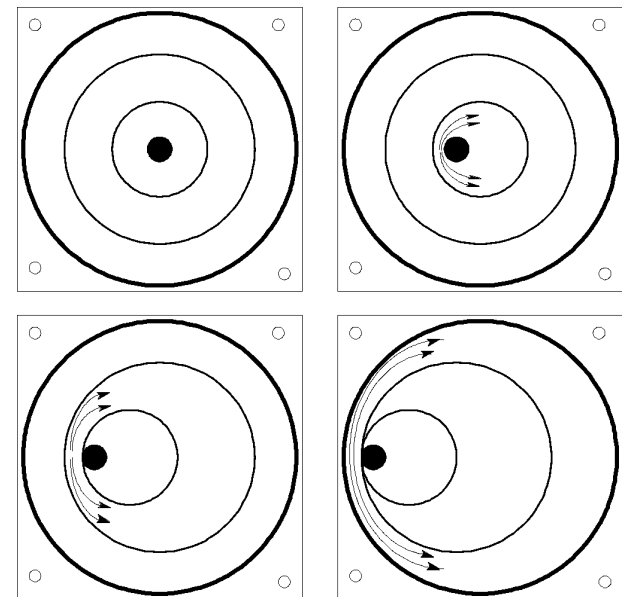
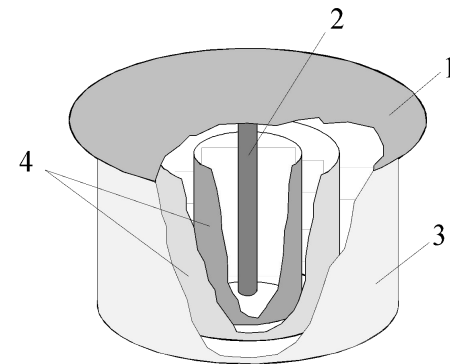
ВЯЗКИЕ ДЕМПФЕРЫ



Горизонтальный вязкий демпфер



. Вязкие демпферы фирмы Gerb стандартный и с телескопическими дисками



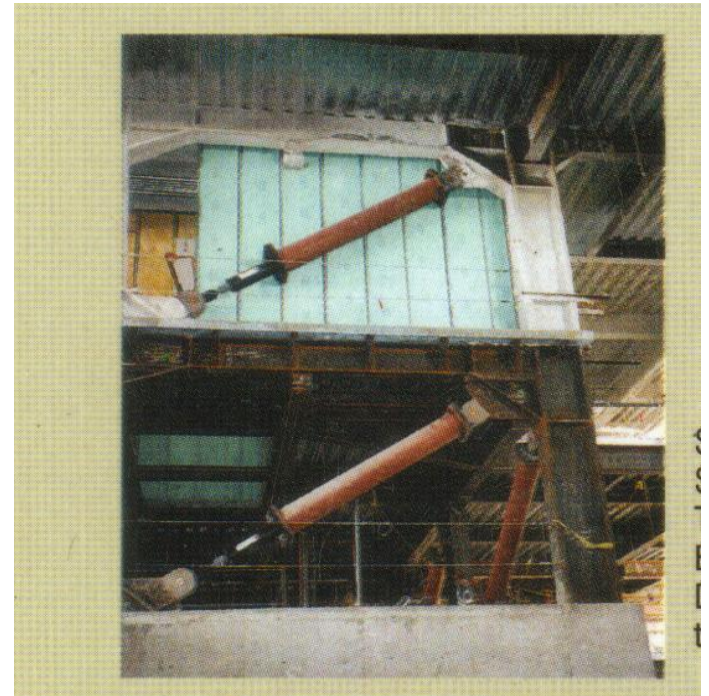
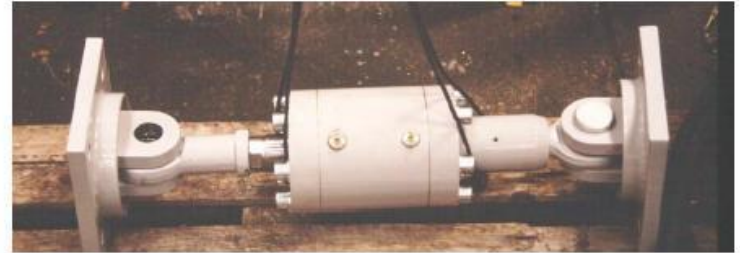
Вязкие демпферы фирмы ВИБРОСЕЙСМ

ДЕМПФИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

ВЯЗКИЕ ДЕМПФЕРЫ

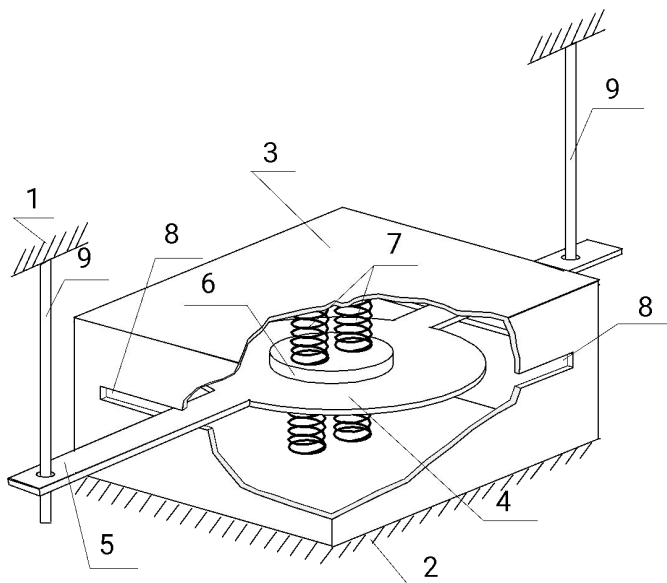


Passive Energy Dissipators for the Sidney Lanier Bridge, Georgia, USA.
The bridge utilizes Taylor Dampers to control earthquake response,
to reduce and distribute seismic loads while allowing free thermal movement.

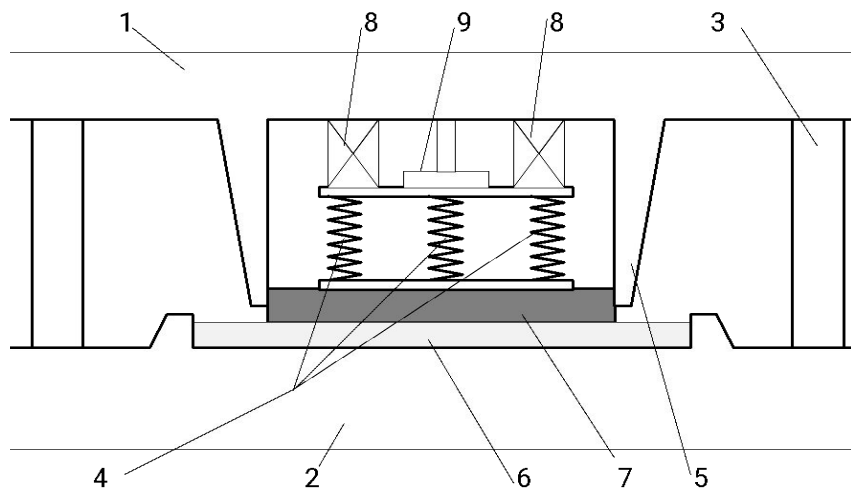


ДЕМПФИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

• ДЕМПФЕРЫ СУХОГО ТРЕНИЯ



1, 2 - верхняя и нижняя фундаментные плиты; 3 - коробчатый корпус ДСТ; 4, 6 - фрикционная пара; 5- консоль внутреннего фрикционного элемента; 7 - подпружиненные упоры; 8 - прорези, обеспечивающие свободное перемещение элемента 7; 9 - стержневые элементы.



1,2-верхняя и нижняя фундаментные плиты; 3-опорный элемент; 4-пружинное устройство; 5-выступ верхней плиты; 6-фрикционный слой из сыпучего материала; 7-железобетонная плита; 8-фиксаторы положения; 9-место установки домкрата

ДЕМПФИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ДЕМПФЕРЫ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТИПА

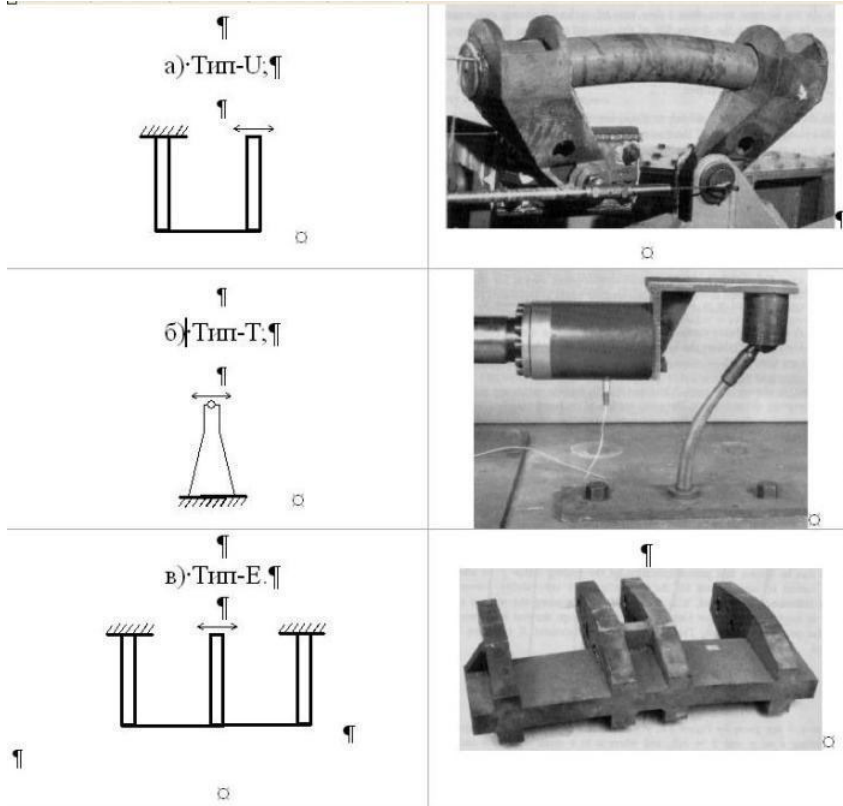
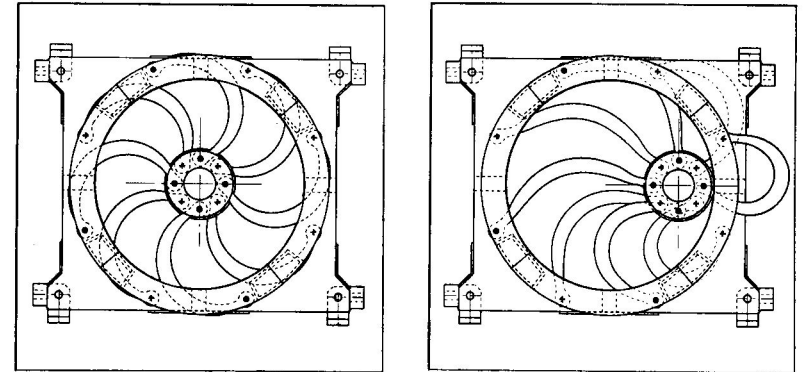
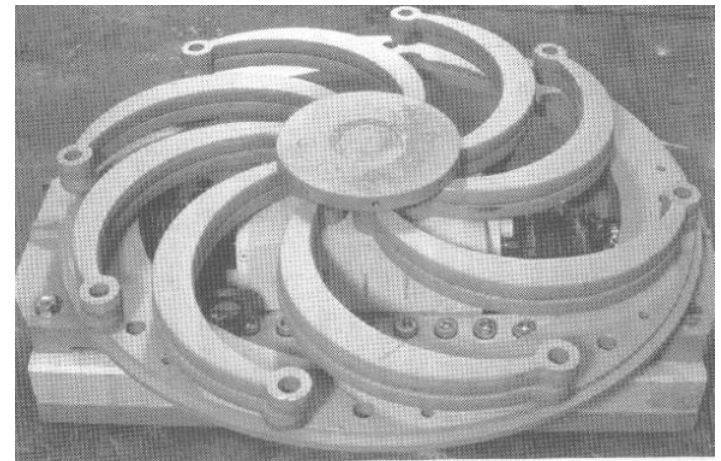


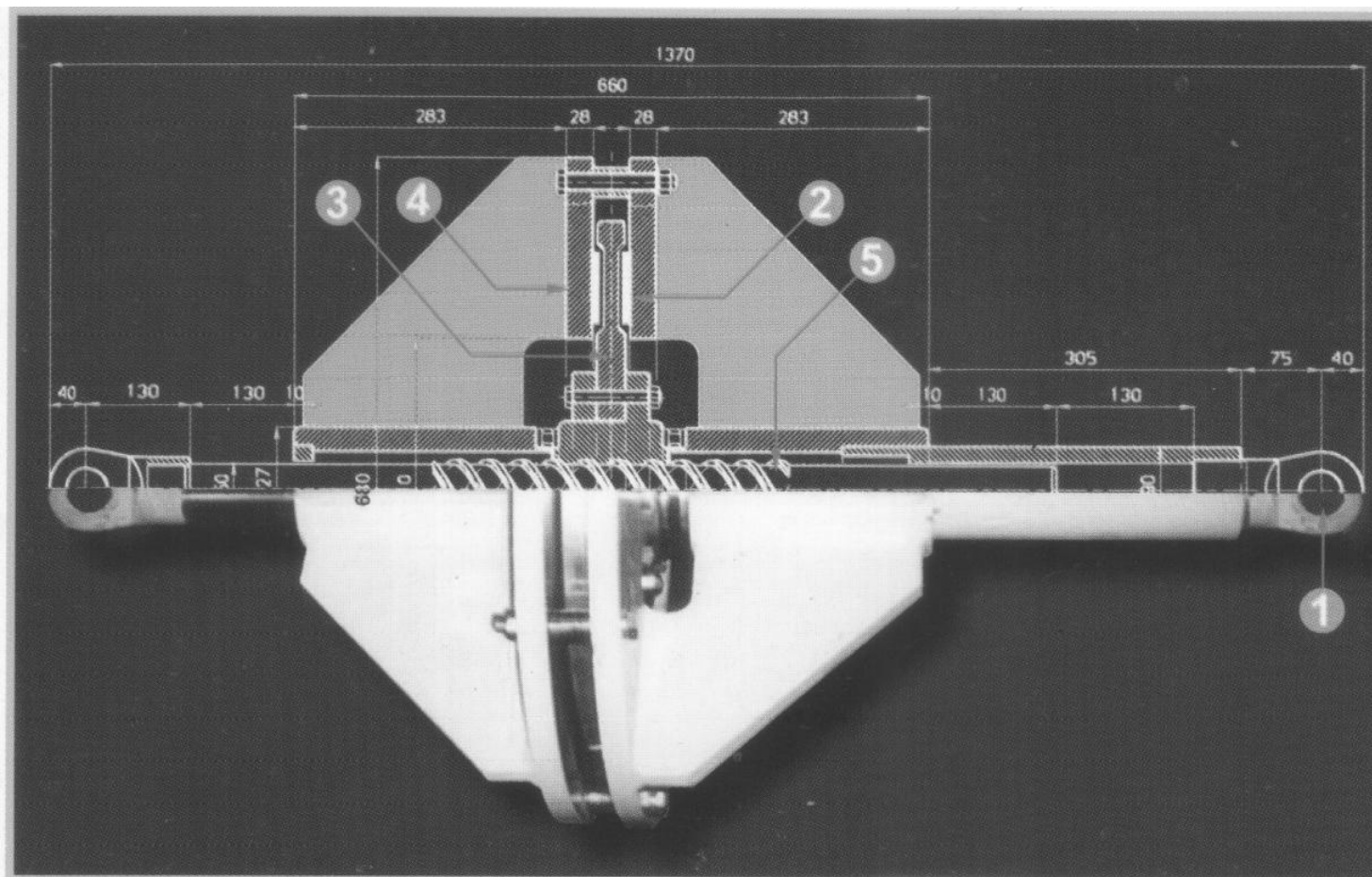
Рис. 12. Стальные демпферы



*Упруго-пластический демпфер (Италия):
в положении равновесия и при
максимальном смещении*

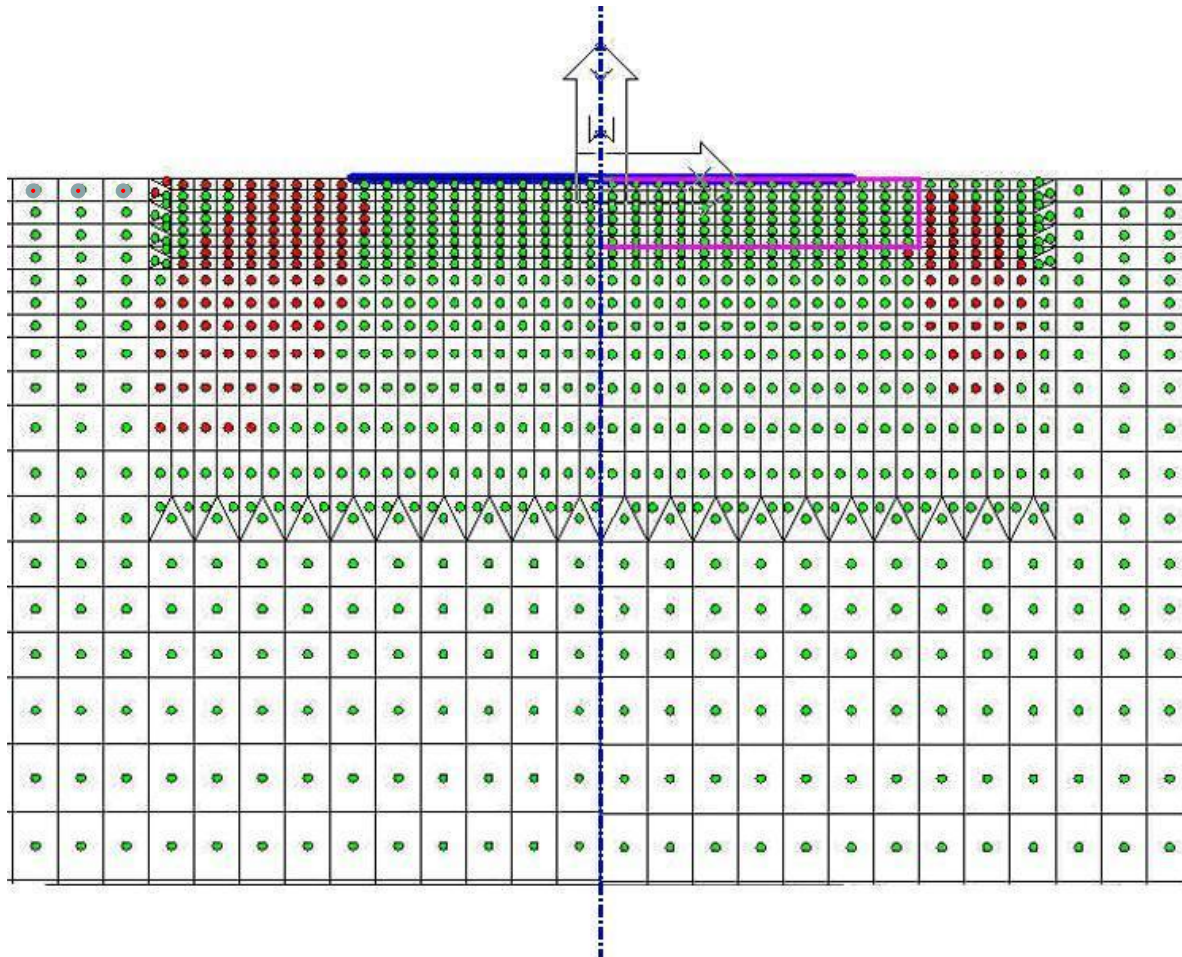


ЭЛЕКТОМАГНИТНОЕ ДЕМПФИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ФИРМЫ «АЛГА»

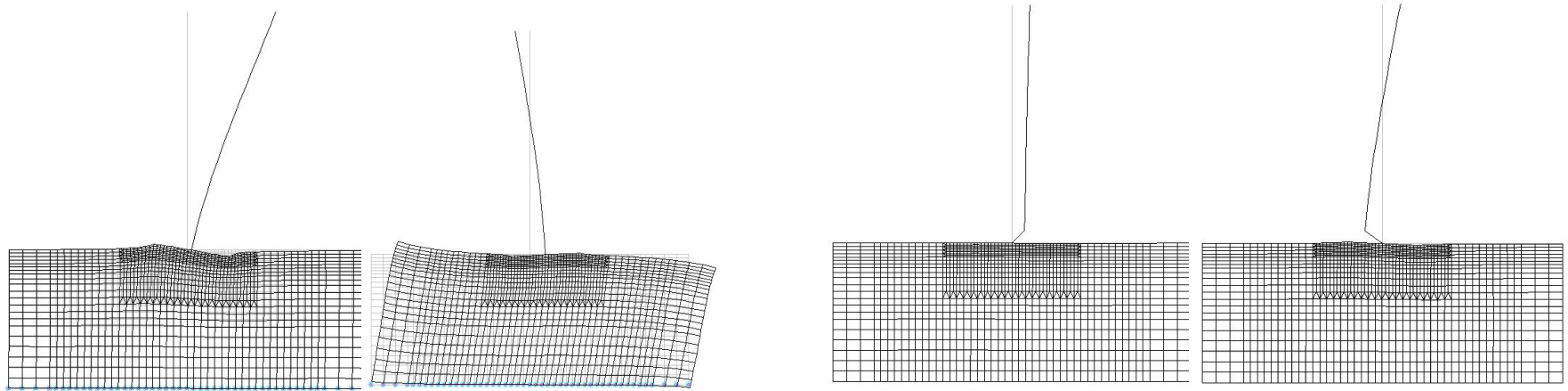


16-ЭТАЖНОЕ ЗДАНИЕ НА УПЛОТНЕННОЙ ПОДУШКЕ

Зона разжижения
слева – без подушки, справа – с подушкой



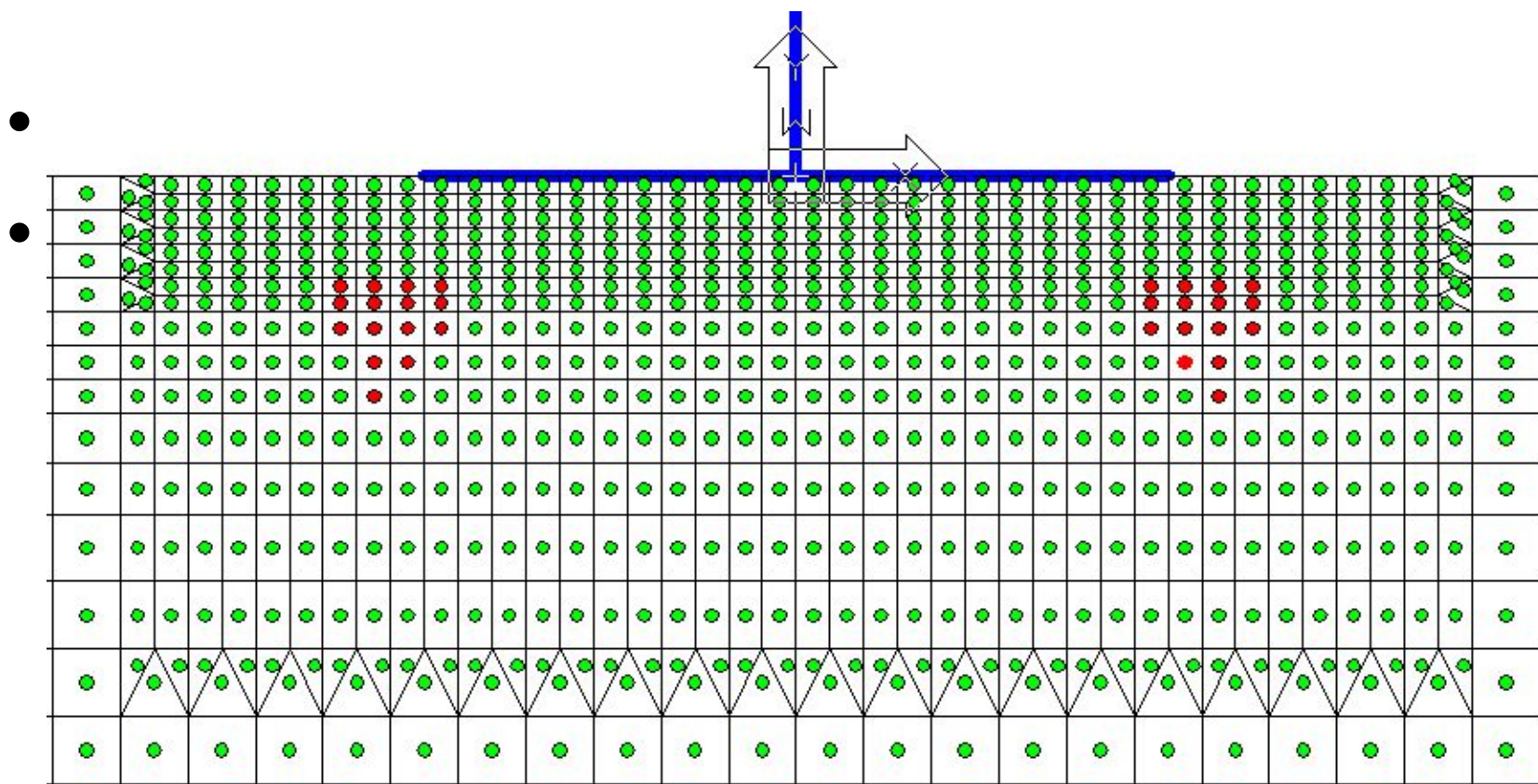
16-ЭТАЖНОЕ ЗДАНИЕ НА УПЛОТНЕННОЙ ПОДУШКЕ



Первые две формы колебаний для обычного (слева) и сейсмоизолированного (справа) зданий на грунтовой подушке толщиной 3 м

16-ЭТАЖНОЕ ЗДАНИЕ НА УПЛОТНЕННОЙ ПОДУШКЕ

- Зоны предельного состояния массива для сейсмического воздействия силой 9 баллов для здания с 3-метровой подушкой, с изоляцией



16-ЭТАЖНОЕ ЗДАНИЕ НА УПЛОТНЕННОЙ ПОДУШКЕ

Зоны предельного состояния массива для сейсмического воздействия силой 9 баллов для здания с 3-метровой подушкой, с изоляцией

