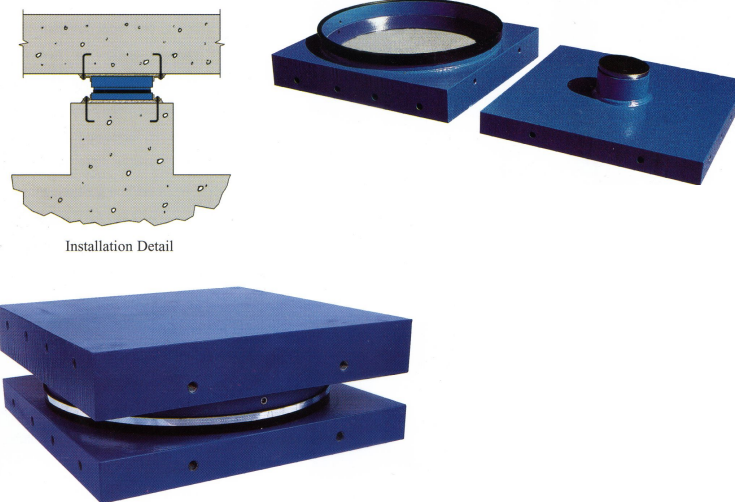


СЕЙСМОИЗОЛЯЦИЯ СООРУЖЕНИЙ (КОНЦЕПЦИЯ, ПРИНЦИПЫ УСТРОЙСТВА, ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА)

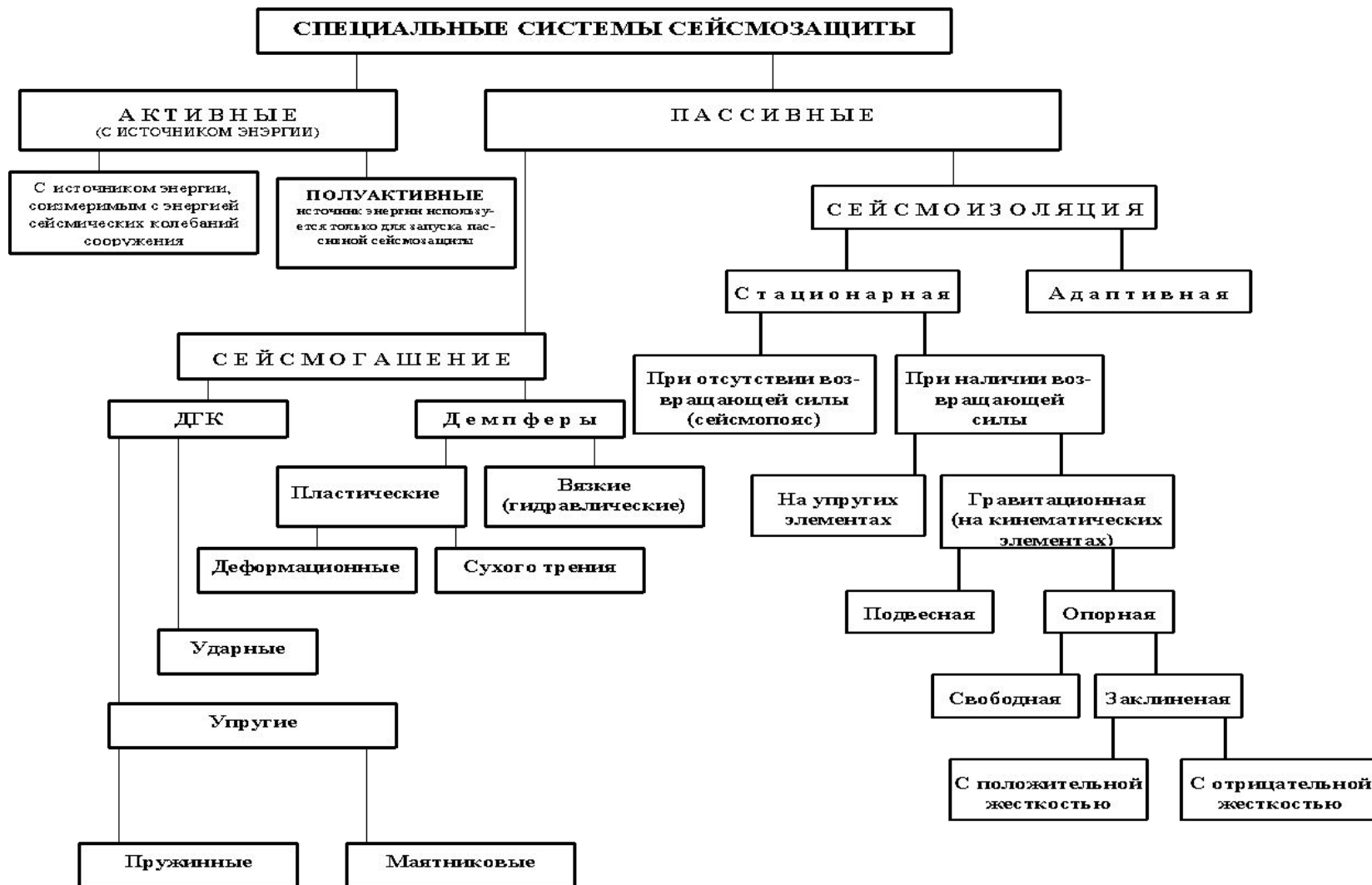
*Профессора Белаш Т.А., Беляев В.С., Уздин А.М.,
Канд. техн. наук Ермошин А.А., Кузнецова И.О.*



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.

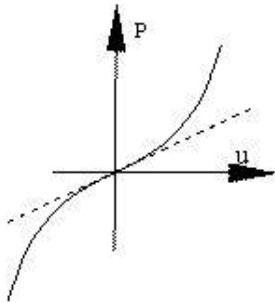
Классификация систем сейсмоизоляции по принципу их работы



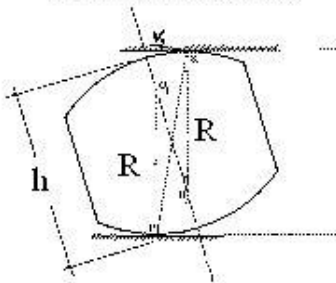
Некоторые типы кинематических опор

№	α	Тип и схема опоры	Уравнения движения опоры	Упрощенный вид однородных уравнений
1с	Опора Назина В.В.		$\ddot{\alpha}(4 - 4\chi \cos \alpha + \chi^2) + 2\chi \dot{\alpha}^2 \sin \alpha + \frac{g}{R} \chi \sin \alpha = 0$ $\chi = 2 - h/R$	$\ddot{\alpha} + k_1^2 \alpha = 0; \quad k^2 = k_0^2; \quad \tau = t/t_0$
2с	Опора Найбург Э.В.		$\ddot{\alpha}(4 + 4\chi \cos \alpha + \chi^2) + 2\chi \dot{\alpha}^2 \sin \alpha + \frac{g}{r} \chi \cos \alpha \sin \alpha = 0$ $\chi = b/r$	$\ddot{\alpha} + k_2^2 (1.3 \mu^{3/2} \alpha)^{1/21} = 0$
3с	Опора Курзанова А.М.		$\ddot{\alpha}(1 + \beta^2 + 4v(v + \cos \alpha + \beta \sin \alpha)) + 2v \dot{\alpha}^2 (\beta \cos \alpha - \sin \alpha) + \frac{g}{R} (\beta \cos \alpha - \sin \alpha) \text{sign} \alpha = 0; \quad \beta = b - \frac{2r}{h}; \quad v = \frac{r}{h}$	$\ddot{\alpha} + k_3^2 (1.3 \mu^{3/2} \alpha)^{1/21} = 0$
4с	Опора "шар в лунке"		$\ddot{\alpha}(2 + 2\cos \alpha) - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha + \frac{g}{r} (\chi - 1) \sin \alpha = 0$ $\chi = R/r$	$\ddot{\alpha} + k_4^2 \alpha = 0$
5с	Опора "шар в двух лунках"		$\ddot{\alpha} + \frac{g}{2R} \left(1 - \frac{r}{R}\right) \sin \alpha = 0$	$\ddot{\alpha} + k_5^2 \alpha = 0$
6с	Опора Безрукова Ю.И.		$\ddot{\alpha}(2 + \chi^2 - 2\chi(\cos \varphi - \cos \alpha) + 2\cos(\varphi - \alpha)) + 4\dot{\alpha} - k_1^2 \frac{13}{\pi} (\varphi - \alpha) \mu^{3/2} (\varphi - \alpha)^{1/21} = 0$ $\ddot{\alpha}^2 (\chi \sin \alpha - \sin(\varphi - \alpha)) + \frac{g}{R} (\sin \alpha - \sin(\varphi - \alpha)) = 0; \quad \chi = (2R - h)/R$	<p>при больших колебаниях: $0.1 \leq \chi \leq 0.7, \quad \alpha = 0.1$</p> <p>при малых колебаниях: $0.1 \leq \chi \leq 0.7, \quad \alpha = 0.01, \quad 4\ddot{\alpha} - \frac{1}{2} k_0^2 (\varphi - \alpha) = 0$</p> <p>при больших колебаниях: $\chi = 2, \quad -4\chi \ddot{\alpha} + k_0^2 \chi \alpha = 0$</p> <p>при малых колебаниях: $\chi = 2, \quad -4\chi \ddot{\alpha} - \frac{1}{2} k_0^2 (\varphi - \alpha) = 0$</p>
7с	Опора Черепинско-го Ю.Д.		$\ddot{\alpha}(1 + \mu_1^2 + \chi^2 + 2\chi \cos \alpha + 2\mu_1 \sin \alpha) + \frac{\dot{\alpha}^2}{2} (-2\chi \sin \alpha + 2\mu_1 \cos \alpha) + \frac{g}{R} (-\chi \sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha \text{sign} \alpha) = 0; \quad \mu_1 = \frac{b}{2R}; \quad \chi = \frac{h-R}{R}$	$\ddot{\alpha} + k_7^2 \frac{2}{\pi} \mu_1 (1.3 \mu^{3/2} \alpha)^{1/21} = 0$ <p>Примечание: $\text{sign} \alpha = \frac{2}{\pi} \frac{13}{\mu^{3/2}} \alpha^{1/21}, \quad \mu = 100$</p> <p>$k_1, k_2, \dots, k_7$ - частоты колебаний (безразмерные)</p>

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ПО ХАРАКТЕРУ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙ СИЛЫ



ОПОРЫ НАЗИНА

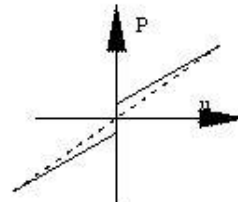


ПОЛНОЕ УРАВНЕНИЕ

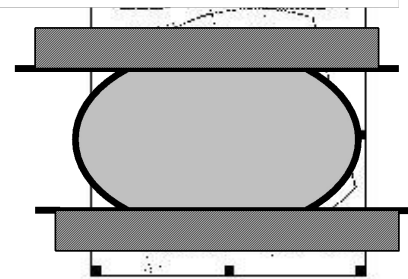
$$\ddot{\alpha} + 4 - 4\chi \cos \alpha + \chi^2 + 2\chi \alpha^2 \sin \alpha + \frac{\xi}{R} \chi \sin \alpha = 0$$

ЛИНЕАРИЗОВАННОЕ
УРАВНЕНИЕ

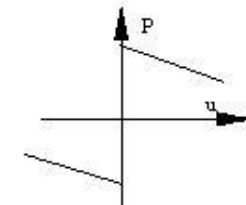
$$\ddot{\alpha} + k^2 \alpha = 0$$



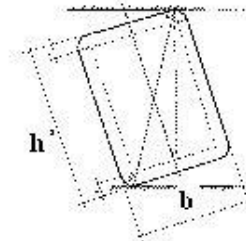
Roballs



$$m \ddot{u} + \gamma b \dot{u} + c u = 0 \Rightarrow m \ddot{u} \sin \alpha + \gamma b \dot{u} \sin \alpha + c u \sin \alpha - P \sin \alpha = 0$$



ОПОРЫ КУРЗАНОВА
ОПОРЫ ЧЕРЕПАННСКОГО
ОПОРЫ НЕНЕВУРГА



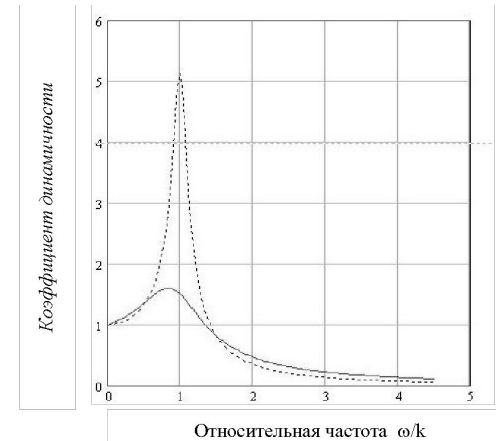
$$\ddot{\alpha} + 1 + \beta^2 + 4v(v + \cos \alpha + \beta \sin \alpha) + 2v\alpha^2(\beta \cos \alpha - \sin \alpha) + \frac{\xi}{R}(\beta \cos \alpha - \sin \alpha) \text{sign} \alpha = 0; \quad \beta = b - \frac{2r}{h}; \quad v = \frac{r}{h}$$

УКОРОЧЕННОЕ УРАВНЕНИЕ

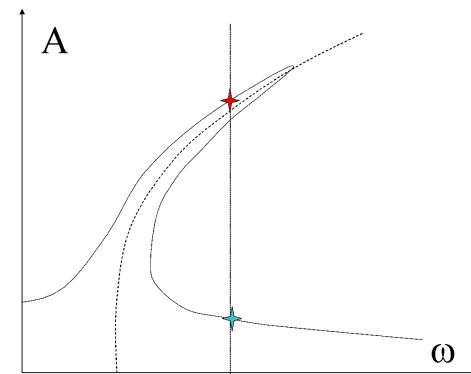
$$\ddot{\alpha} - k^2 \alpha \cdot \text{sign} \alpha = 0$$

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.
-
- Странники 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 - $\gamma=0.2$

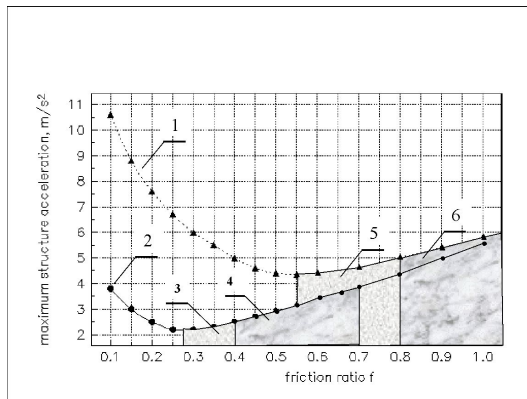
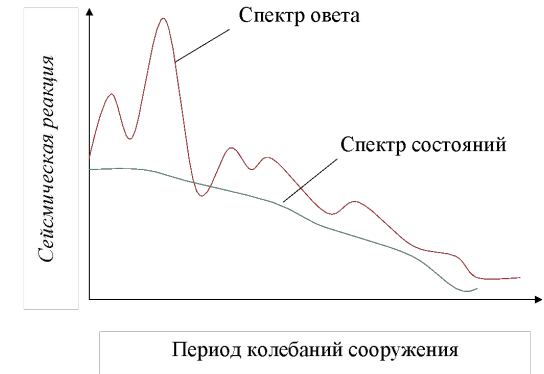


РАСЧЕТ И НАСТРОЙКА СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

- Расчет систем сейсмоизоляции должен включать две обязательные части:
- оценку ускорений и сейсмических нагрузок (силовой расчет);
- оценку взаимных смещений сейсмоизолированных частей сооружения (кинематический расчет).
- При проведении кинематического расчета, который является, как правило, определяющим для обеспечения работоспособности сейсмоизоляции, необходимо исключить искажения в длиннопериодной области воздействия; **Сейсмоизолированные сооружения весьма чувствительны к виду динамического воздействия и выбор расчетных акселерограмм приобретает для них принципиальное значение.**
- Смещения сейсмоизолированного сооружения, как правило, значительны, и нелинейные эффекты начинают играть важную роль при его колебаниях.
- **НАИБОЛЕЕ СЕРЬЕЗНЫ И ИНТЕРЕСНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В ОБЛАСТИ РАСЧЕТА И ПОДБОРА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 20 ЛЕТ**
- 1. Причина низкой сейсмостойкости сейсмоизолированных сооружений - большие взаимные смещения сейсмоизолированных частей сооружения и падение сооружения с опор под силой тяжести (Савинов, Айзенберг)
- 2. Обоснование необходимости сильного демпфирования систем сейсмоизоляции (Савинов)
- 3. Обоснование независимости сил демпфирования в системе сейсмоизоляции от спектрального состава воздействия (Савинов, Белаш, Уздин)
- 4. Оптимизация сейсмоизоляции с упругопластическим ограничителем перемещений и демпфером сухого трения. Обоснование «вредности» двухсторонних ограничителей и целесообразности многокаскадного демпфирования. (Савинов, Сахарова)

НАИБОЛЕЕ СЕРЬЕЗНЫ И ИНТЕРЕСНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В ОБЛАСТИ РАСЧЕТА И ПОДБОРА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 20 ЛЕТ

- 5. Введение спектра состояний для адаптивных систем (Айзенберг, Смирнов)
- 6. Установление рабочей зоны настройки сейсмоизоляции для системы с ДСТ (Уздин, Долгая)
- 7. Обоснование необходимости передемпфирования систем сейсмоизоляции (Уздин, Долгая)



- Рис.6. Зависимость максимальных ускорений сейсмоизолированного сооружения от коэффициента трения f
- 1 – для землетрясения силой $I=9$ баллов ; 2 – для $I=8$.
- 3 – рабочая зона для $I=8$; 4 – зона передемпфирования для $I=8$;

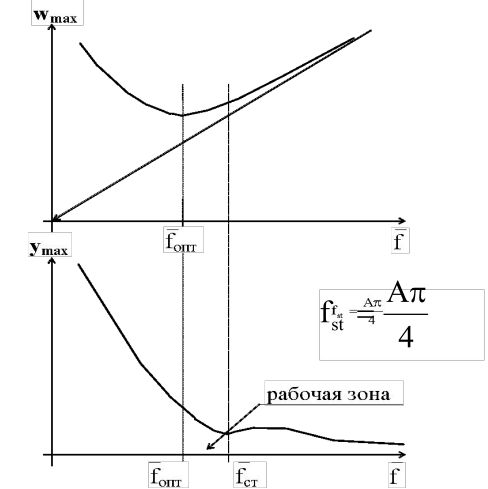


Рис.5. Иллюстрация к определению рабочей зоны для подбора трения в системе сейсмоизоляции сооружения

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПЕРЕДЕМПФИРОВАНИЯ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

ВЯЗКОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ

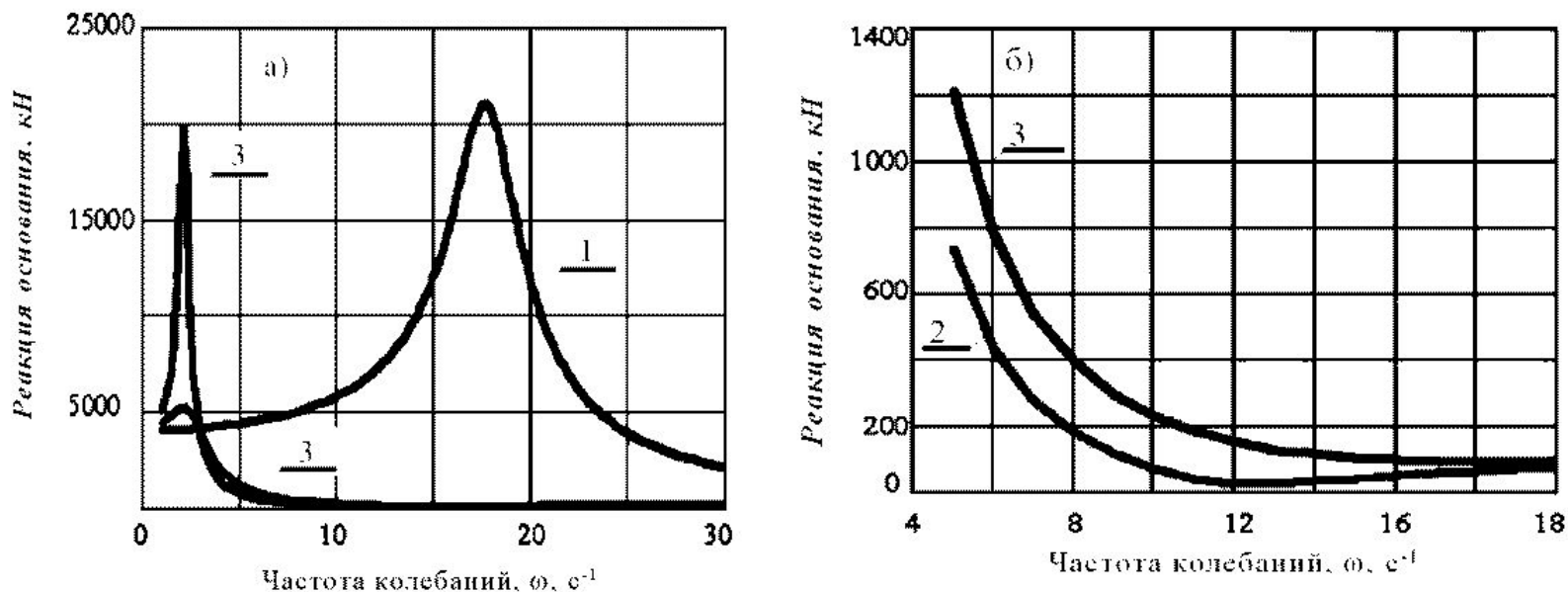


Рис.1. АЧХ опорной реакции здания

а) в диапазоне частот от 0 до 30 c^{-1} ; б) фрагмент в диапазоне частот от 5 до 20 c^{-1}

1 – без сейсмоизоляции;

2 – с сейсмоизолирующим фундаментом при $T=3\text{ c}$ и $\gamma=0.2$; 3 – то же при $\gamma=1.2$

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПЕРЕДЕМПФИРОВАНИЯ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

СУХОЕ ТРЕНИЕ

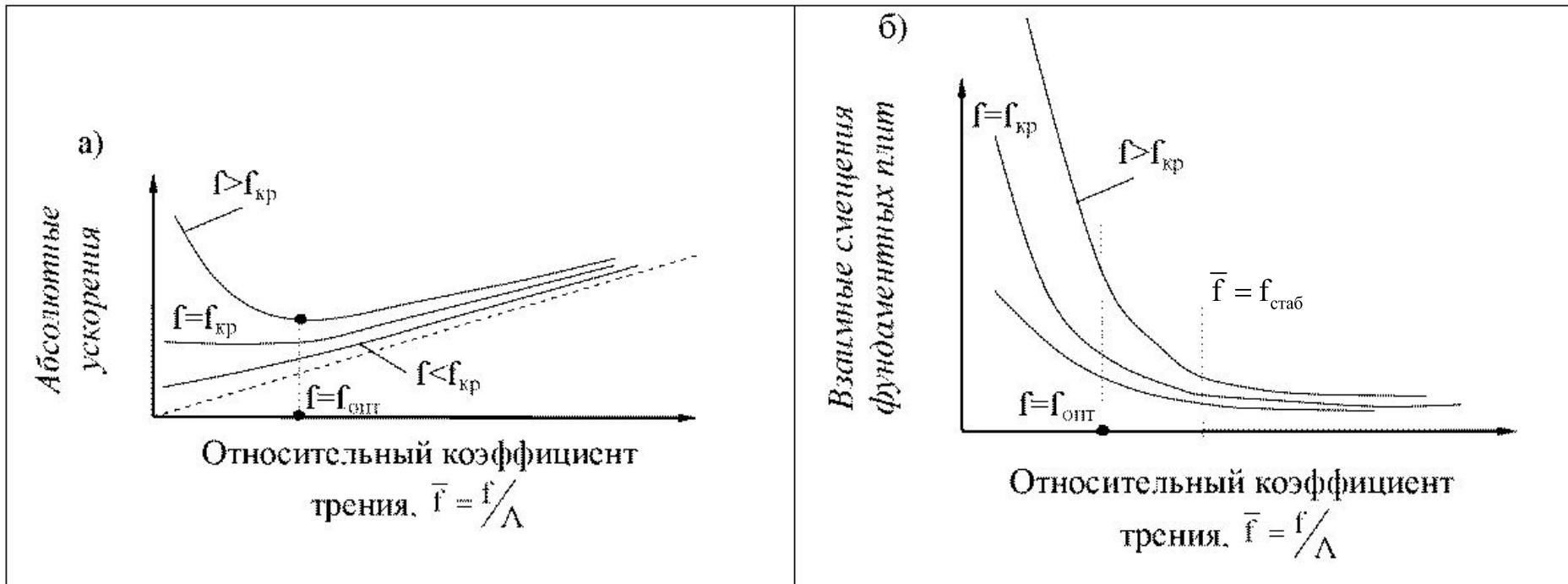


Рис.2. Зависимости абсолютного ускорения и взаимного смещения фундаментных плит сейсмоизолирующего фундамента от относительного коэффициента трения $\bar{f} = f/\Lambda$ (Λ - ускорение основания в долях ускорения силы тяжести g)

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПЕРЕДЕМПФИРОВАНИЯ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

Сейсмоизолирующий скользящий пояс

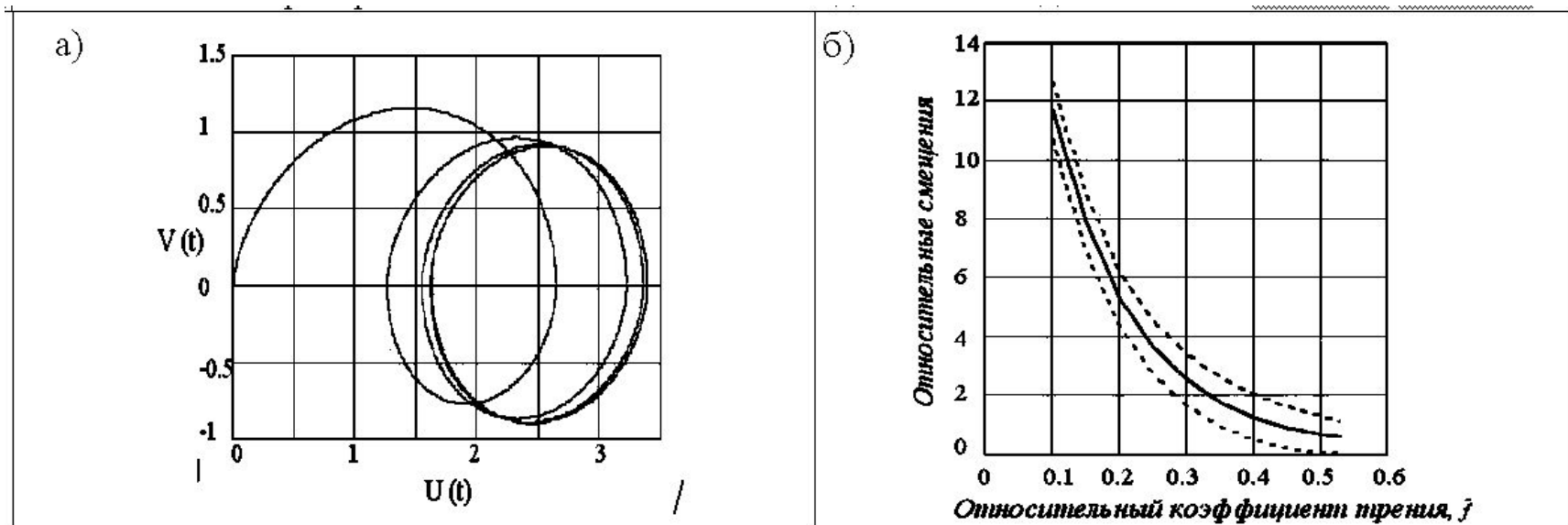
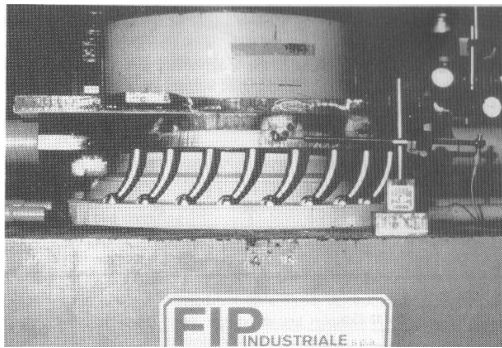
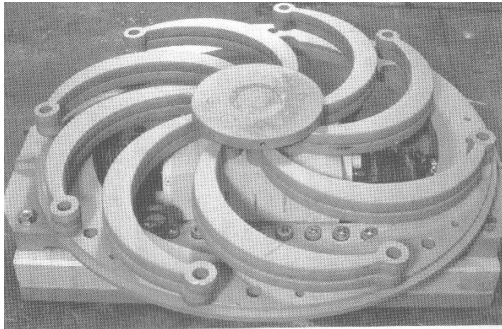


Рис.3. Траектория движения здания с сейсмоизолирующим скользящим фундаментом на фазовой плоскости (а) и зависимость перемещений здания от относительного коэффициента трения (б); сплошная линия – односторонний унос, пунктир – амплитуда вибраций

СЕЙСМОИЗОЛЯЦИЯ МОСТОВ

- СЕЙСМОИЗОЛИРУЮЩИЕ ОПОРНЫЕ ЧАСТИ ФИРМЫ FIP-INDUSTRIALE



- ПЕРВЫЕ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННЫЕ МОСТЫ В СССР

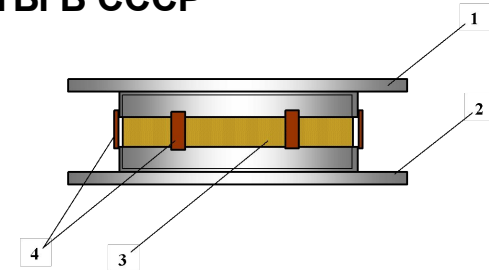
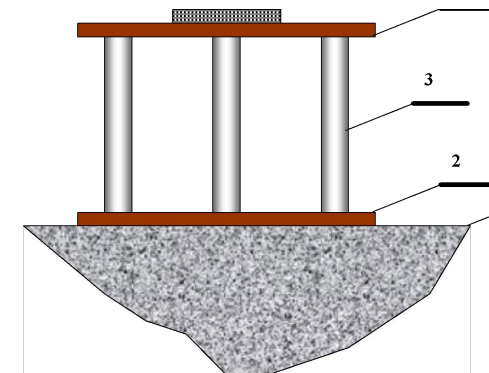


Рис. 7. Принципиальная схема опорной части на мостах метро через каналы Ак-Тепе и Салар в г. Ташкенте (1974-78 годы)
1- верхний опорный лист; 2 – нижний опорный лист; 3 – РОЧ;
4 – элементы ограниченной несущей способности

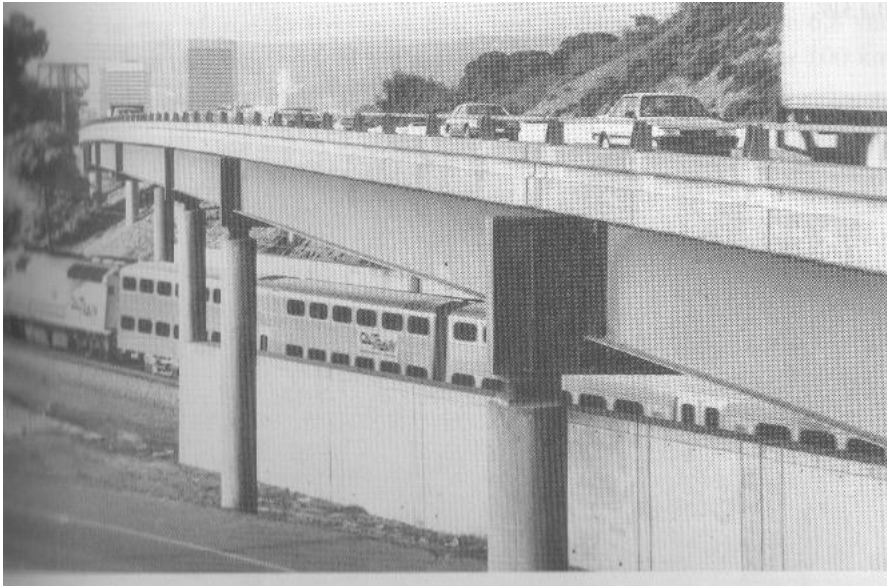
- ГИБКИЕ ОПОРНЫЕ ЧАСТИ ЛГТМ



1 – РОЧ; 2 – опорные листы; 3 – гибкие стойки; 4 оголовок

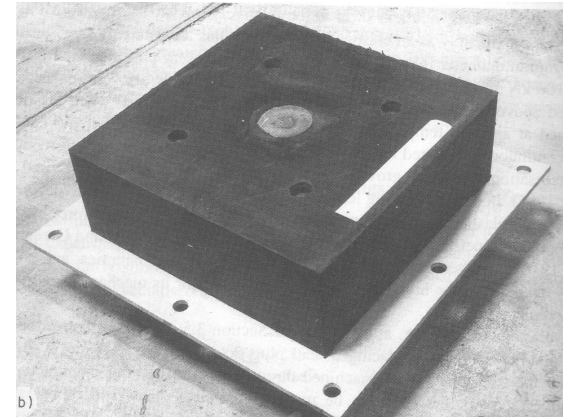
СЕЙСМОИЗОЛЯЦИЯ МОСТОВ

а)

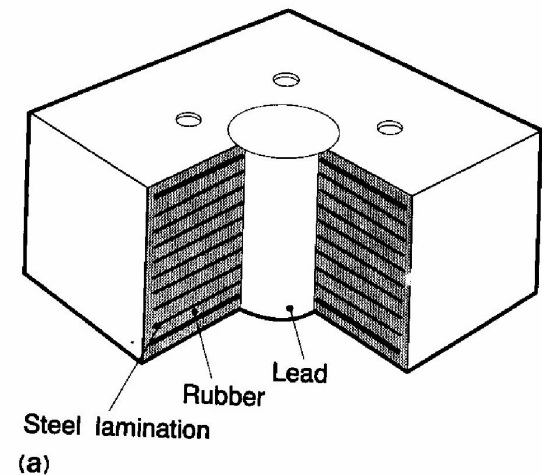


Путепровод в Сан-Франциско
(Sierra Point Overhead Bridge)
на резиновых опорах со
свинцовым сердечником (а),
внешний вид(б) и схема
устройства опор (в)

б)

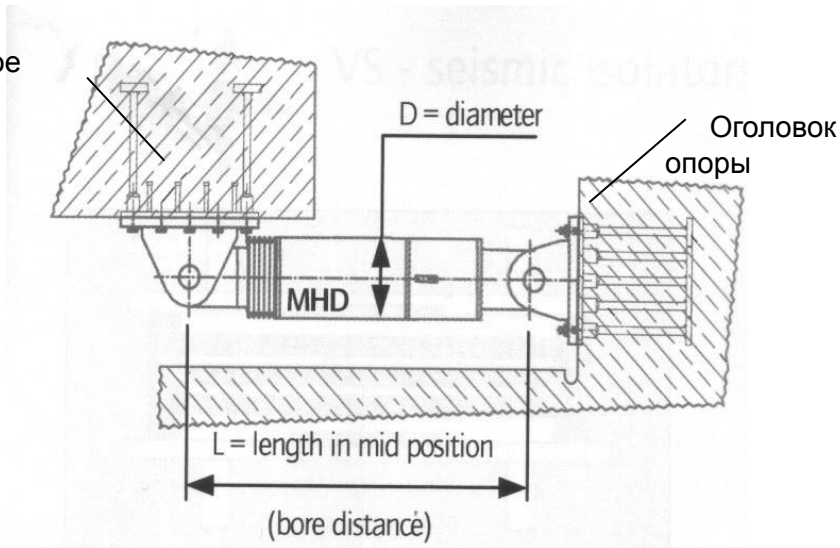


в)



СЕЙСМОИЗОЛЯЦИЯ МОСТОВ

Пролетное строение



. Схема установки демпфера вязкого трения



. Шаровая сейсмоизолирующая опорная часть моста «Бениция-Мартиненз» в Сан-Франциско

Однако для мостов, при наличии достаточно широкого опыта применения сейсмоизоляции, теоретические вопросы оптимизации ее параметров не отражены в литературе. Более того, имеющиеся исследования указывают на возможность негативного влияния применения сейсмоизолирующих опорных частей мостов на сейсмостойкость некоторых мостовых конструкций

ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ МОСТОВ

- 1. Простая сейсмоизоляция

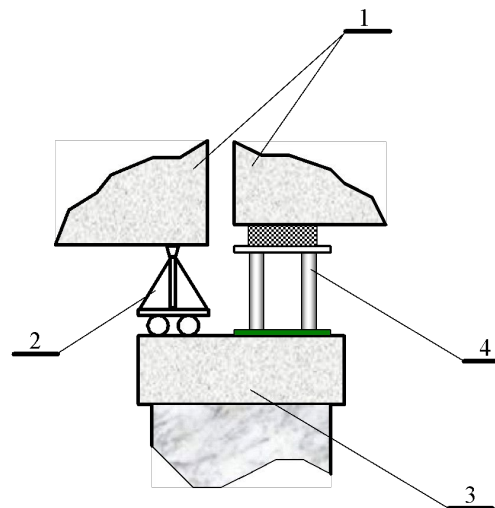
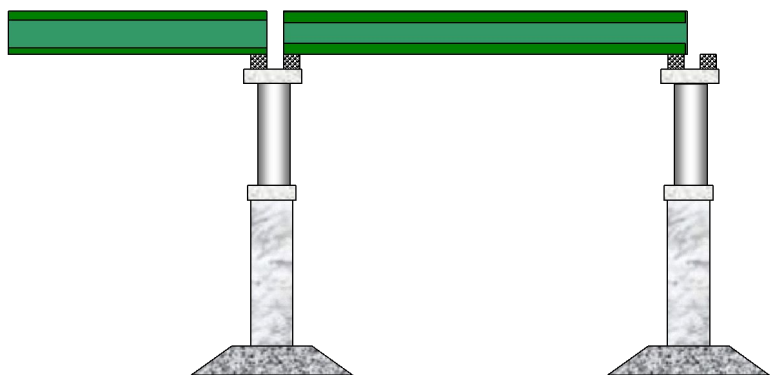
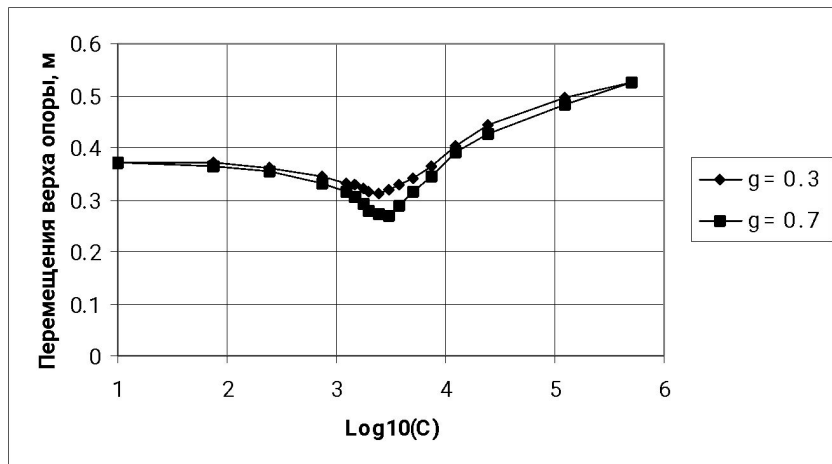


Рис.12. Простая сейсмоизоляция
1 – пролетные строения; 2 – подвижная опорная часть;
3 – оголовок опоры; 4 – гибкая опорная часть



Возможность использования пролетного строения в качестве ДГК опоры

ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ МОСТОВ

- 2. Сильно демпфированная сейсмоизоляция

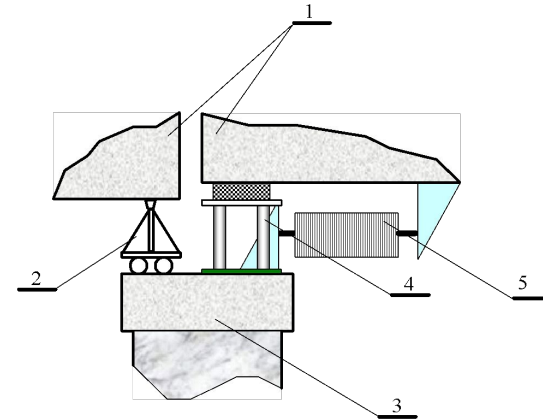
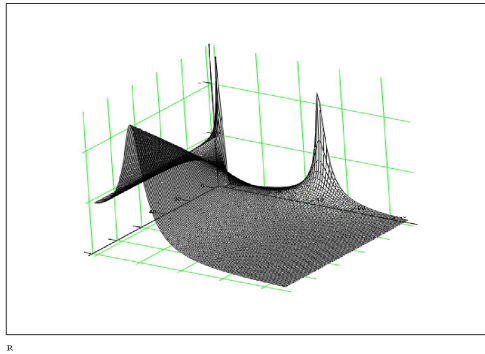


Рис.12. Простая сейсмоизоляция
1 – пролетные строения; 2 – подвижная опорная часть; 3 – оголовок опоры; 4 – гибкая опорная часть; 5 – демпфер

- 3. Объединяющая сейсмоизоляция

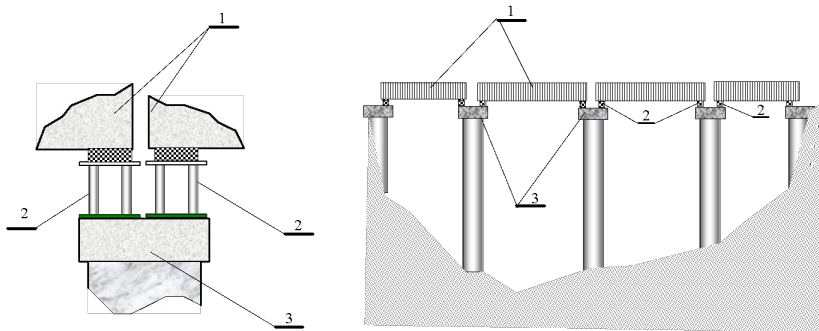


Рис13. Объединяющая сейсмоизоляция
1 – пролетные строения; 2 – гибкая опорная часть; 3 – оголовок опоры;

ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ МОСТОВ

- Динамическое гашение колебаний

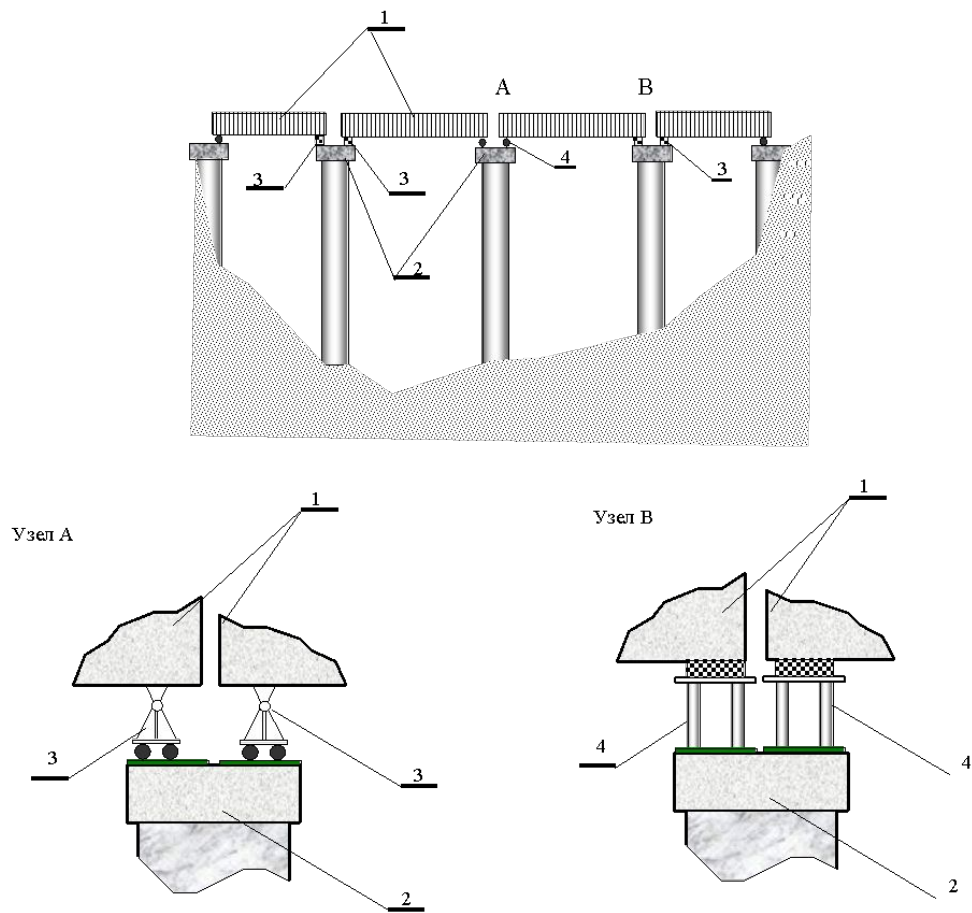


Рис. 7. Объединяющая сейсмоизоляция

1 – пролетные строения; 2 – оголовок опоры; 3 – подвижная опорная часть; 4 – гибкая опорная часть

НОВЫЕ ТИПЫ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

• 1. Новые демпферы

Первое направление связано с развитием технологий изготовления демпфирующих устройств. Понимание необходимости сильного демпфирования систем сейсмоизоляции привело к созданию новых демпфирующих устройств.

Прежде всего, появились металлические сплавы, позволившие создать элементы, выдерживающие значительное количество циклов пластических деформаций и рассеивающих при этом значительное количество энергии. Консольные конические стержни из этих сплавов устанавливаются между верхним и нижним опорными листами сейсмоизолирующей опоры и обеспечивают эффективное рассеяние сейсмических колебаний. Наибольшее распространение такого рода элементы получили в мостах

$$F = -F_0 \cdot V^\alpha \text{sign} V$$



► Tuy Medio-Caracas railway (Venezuela) - 3.000 kN to 25.000 kN steel hysteresis

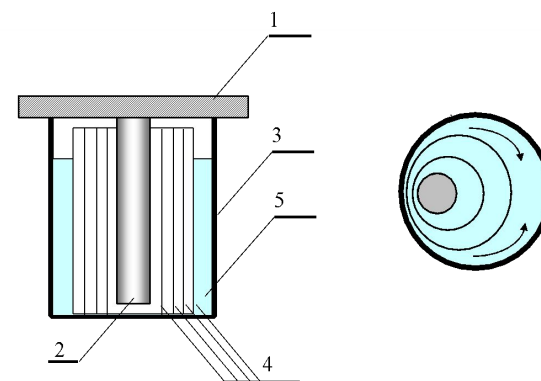
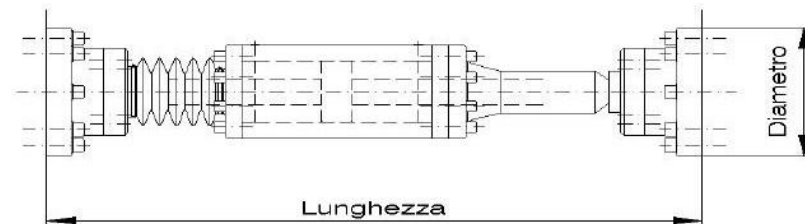


Рис. 17. Жидкостной демпфер системы В.В.Костарева (а) и схема движения рабочей жидкости (б)
1 – крышка; 2 – палец; 3 – корпус; 4- система колец;
5 – рабочая жидкость

НОВЫЕ ТИПЫ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

- Демпферы в виде фрикционно-подвижных болтовых соединений

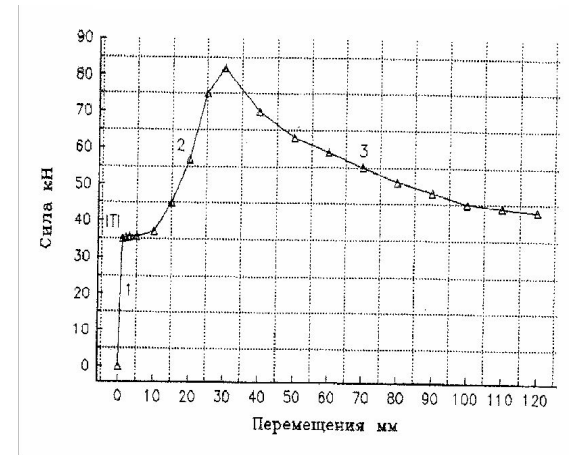


Рис.3.1. Характерная диаграмма деформирования ФПС

1 – упругая работа ФПС;
 2 – стадия проскальзывания листов ФПС при заклиненных шайбах, характеризующаяся ростом натяжения болта вследствие его изгибной деформации
 3 – стадия скольжения шайбы болта, характеризующаяся интенсивным износом контактных поверхностей

Рис. 18. Принципиальная схема фрикционно-подвижного соединения

а) встык б) внахлестку
 1- соединяемые листы; 2 – высокопрочные болты;
 3- шайба; 4 – овалы отверстия; 5 – накладки.

$$T = T_0 f \times \Delta N = T_0 - f \times \left(1 - e^{-kas}\right) \times k \times N_0 \times a^{-1} =$$

$$= T_0 \times \left[1 - \left(1 - e^{-kas}\right) \times k \times a^{-1}\right]$$

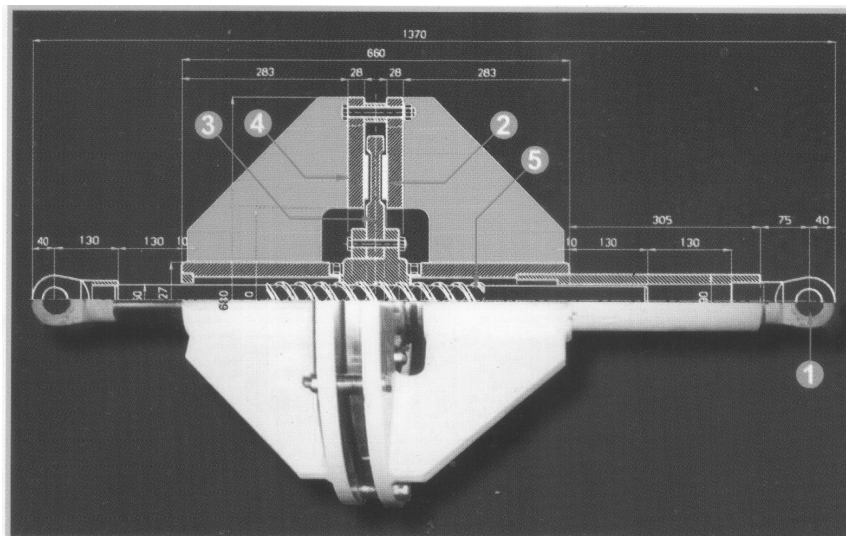
НОВЫЕ ТИПЫ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

- Второе направление – полуактивные системы сейсмоизоляции.
- В отличие от активных систем защиты, в которых имеется мощный источник энергии, управляющий поведением системы во время землетрясения, полуактивные системы сейсмозащиты включают небольшой источник энергии, который включает ту или иную систему пассивной защиты при интенсивных сейсмических колебаниях. В наиболее простых полуактивных системах источник энергии приводит к включению или выключению каких-либо связей, например, убирает стопорное устройство в сейсмоизолирующей опоре. Однако возможны и более оригинальные решения. Например по предложению канадских специалистов в рабочую жидкость демпфера включен металлический мелкодисперсный наполнитель. В обычном состоянии наполнитель находится в виде осадка и не влияет на коэффициент поглощения в демпфере. При землетрясении вокруг рабочего цилиндра демпфера пропускается электрический ток, приводящий к распределению наполнителя по рабочей жидкости в соответствии с силовыми линиями магнитного поля. При этом коэффициент поглощения в демпфере существенно возрастает.

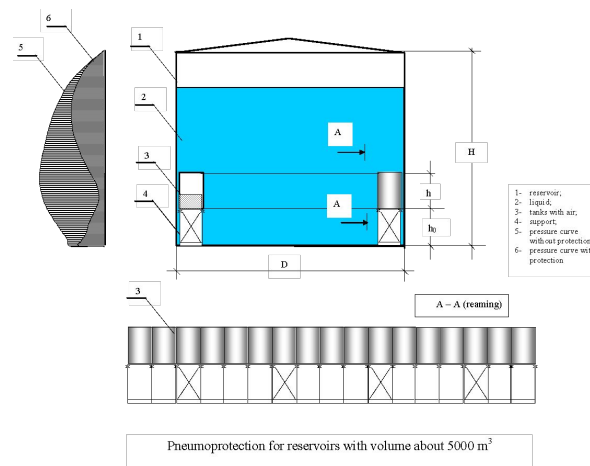
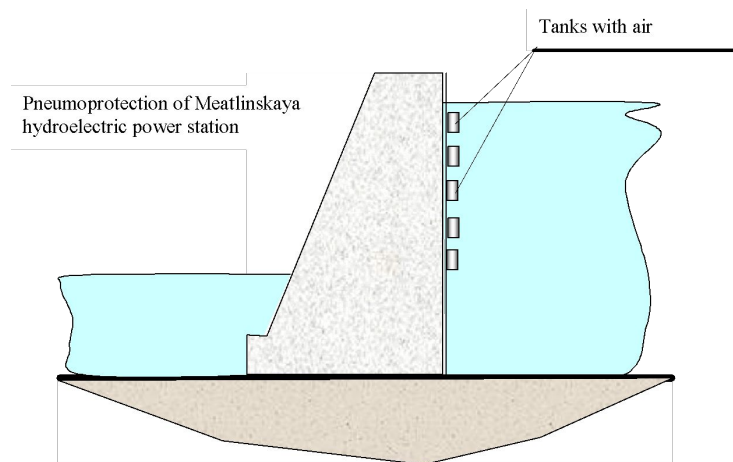
Третье направление – **использование физически новых видов возвращающих сил**. Помимо наиболее простых упругих связей в настоящее время применяются гравитационные системы сейсмоизоляции. Эти системы хорошо известны в России и описаны выше. В последние годы гравитационные опорные части стали применяться за рубежом. Выше приведен пример таких опорных частей в сейсмостойком мостостроении. Весьма перспективно использование пневматических сил в качестве восстанавливающих. Установка сооружений на надувные подушки применялась в Японии и бывшем СССР. О.А.Савиновым развито новое направление сейсмоизоляции, получившее название пневмозащиты сооружений. В системах пневмозащиты емкости с воздухом устанавливаются на напорных гранях сооружений, контактирующих с жидкостью. При этом возможен эффект сейсмоизоляции жидкости от сооружения и использование жидкости в качестве гасящей массы, а воздуха – в качестве пружины динамического гасителя колебаний

К числу самых последних разработок в области сейсмоизоляции можно отнести демпфирующее устройство, разработанное итальянской фирмой «Алга» и использующее электромагнитные силы взаимодействия между изолированными частями сооружения. (Рис.19)

НОВЫЕ ТИПЫ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ



*Рис.19. Магнитный демпфер
1 – шаровой шарнир, соединяющий
сейсмоизолированные части конструкции;
2 – постоянный магнит; 3 – вращающийся диск;
4 – фиксированные опорные плиты; 5 –
стержень с винтовой нарезкой*



ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

- **Необходимая точность математической модели**

$$\ddot{\xi} + 2\pi\gamma\dot{\xi} + 4\pi^2\xi - \bar{f} \cdot \text{sign}\dot{\xi} = -T^2\ddot{y}_0$$

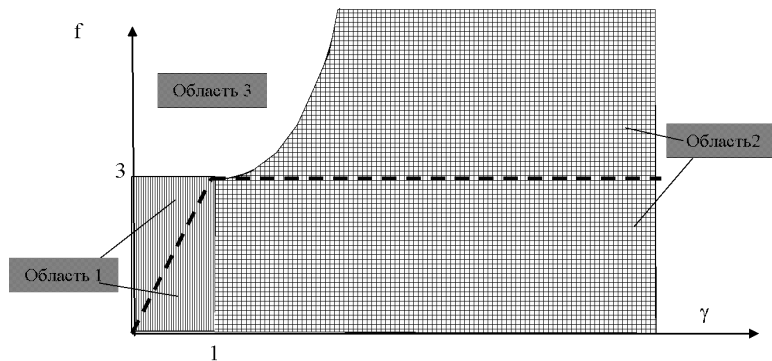
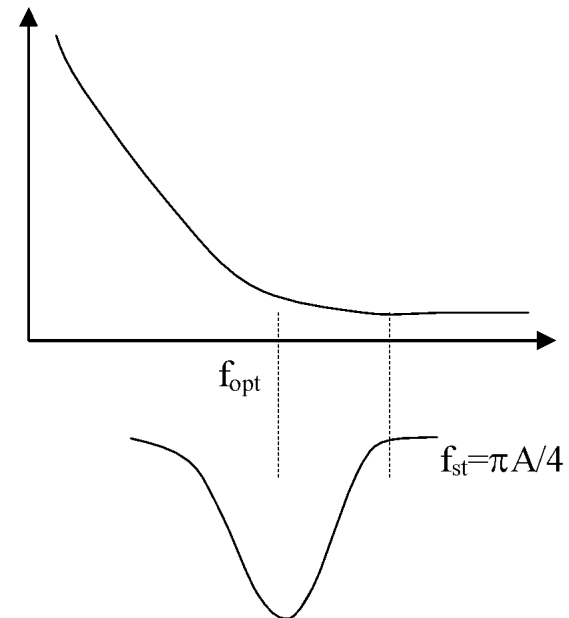


Рис.1. Асимптотический портрет уравнения колебаний осциллятора с вязким и сухим трением

Необходимая точность результатов расчета



Применение метода осреднения показывает, что отбрасывание в расчетной акселерограмме гармоник с частотой ω дает погрешность в смещениях порядка k/ω , где k — частота сейсмоизоляции

