



# ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

13 – 14 июня 2024 года Казахстан

## УСТРОЙСТВА, ПОВЫШАЮЩИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ НОВЫХ И ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТНОСТИ И КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ДИНАМИЧЕСКОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ (TMD CVS) И СТЕНОВЫХ ДЕМПФЕРОВ (WD CVS)

**БОНДАРЕВ ДМИТРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ, К.Т.Н.,  
ГЛ. СПЕЦ., ООО «ЦКТИ-ВИБРОСЕЙСМ»**



## Введение

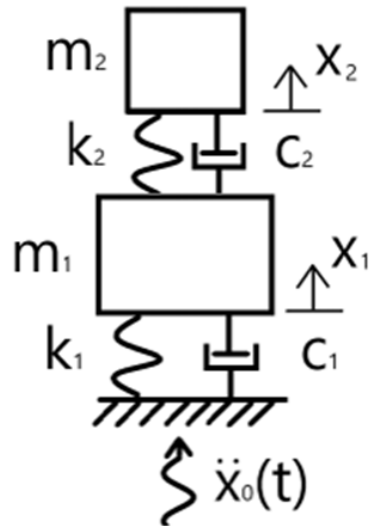
Для снижения сейсмических нагрузок в зданиях и сооружениях используются различные виды сейсмоизоляции.

Как правило, устройства сейсмоизоляции (base isolation) устанавливаются в зданиях с первой собственной частотой выше 1 Гц. Высотные здания и здания с гибким нижним этажом имеют частоту собственных колебаний ниже 1 Гц и, таким образом, необходимы **другие устройства для снижения сейсмических нагрузок.**

Одними из таких устройств являются стеновые демпферы и динамический гаситель колебаний.



# Динамический гаситель колебаний (ДГК). Tuned mass damper (TMD). Уравнения для модели с двумя степенями свободы. Критерии оптимизации



СИСТЕМА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

$$f_2 = \frac{f_1}{1+\mu}$$

$$\xi_2 = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}}$$

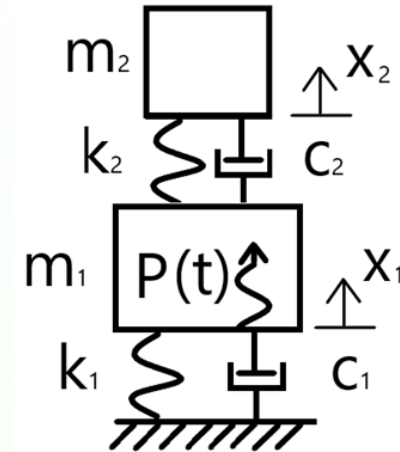
DEN HARTOG. КРИТЕРИЙ МИНИМАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОСНОВНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ

$$f_2 = \frac{f_1}{\sqrt{1+\mu}}$$

$$\xi_2 = \sqrt{\frac{3\mu}{4(2+\mu)(1+\mu)}}$$

DEN HARTOG. КРИТЕРИЙ МИНИМАЛЬНЫХ УСКОРЕНИЙ ОСНОВНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ

Существует множество других критериев: минимальной скорости основной части здания, минимальной перерезывающей силы в основании здания, минимального относительного перемещения ДГК и т.д.



СИСТЕМА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ ПРИ ВЕТРОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

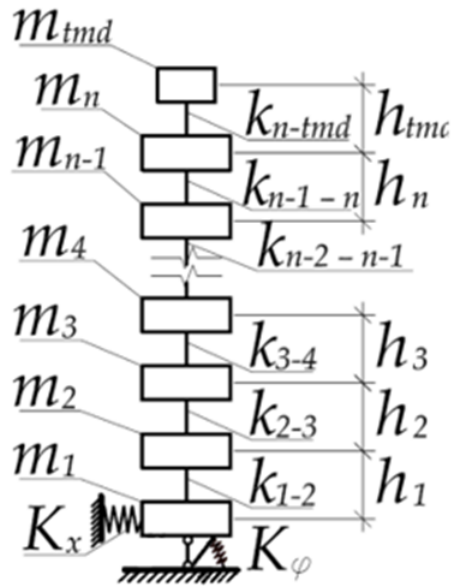
$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = -\ddot{x}_0 - \frac{k_1}{m_1}x_1 - \gamma^2\mu\omega_1^2(x_1 - x_2) - 2\xi_2\omega_1\gamma\mu(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - 2\xi_1\omega_1\dot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 = -\ddot{x}_0 - \omega_2^2(x_2 - x_1) - 2\xi_2\omega_1\gamma(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{P(t)}{m_1} - \frac{k_1}{m_1}x_1 - \gamma^2\mu\omega_1^2(x_1 - x_2) - 2\xi_2\omega_1\gamma\mu(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - 2\xi_1\omega_1\dot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 = -\omega_2^2(x_2 - x_1) - 2\xi_2\omega_1\gamma(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \end{cases}$$

Где  $m_1, k_1$  масса и жёсткость основной части здания,  $m_2, k_2$  масса и жёсткость ДГК,  $\ddot{x}_0$  – акселерограмма воздействия.  $x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \ddot{x}_1, \ddot{x}_2$  перемещения, скорость и ускорения здания и ДГК  $\mu$  – отношение массы ДГК ( $m_2$ ) и массы здания ( $m_1$ ).  $\xi_1, \xi_2$  параметры затухания здания и ДГК,  $\gamma$  – отношение частоты ДГК ( $\omega_2$ ) к частоте здания ( $\omega_1$ ).



# Уравнения для модели с несколькими степенями свободы, учитывающей только сдвиговую жёсткость этажа



Преимущества данной модели: учитывает горизонтальную и качательную жёсткость грунта.

Недостатки: учитывает только сдвиговую жёсткость этажа. Подходит далеко не для всех типов конструктивных систем.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_x + K_{1-2} & -K_{1-2} & \dots & 0 & 0 & K_{1-2}h_1 \\ -K_{1-2} & K_{1-2} + K_{2-3} & \dots & 0 & 0 & (K_{2-3}h_2 - K_{1-2}h_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & K_{n-1-n} + K_{TMD} & -K_{TMD} & (K_{TMD}h_{TMD} - K_{n-1-n}h_n) \\ 0 & 0 & 0 & -K_{TMD} & K_{TMD} & -K_{TMD}h_{TMD} \\ K_{1-2}h_1 & (K_{2-3}h_2 - K_{1-2}h_1) & \dots & (K_{TMD}h_{TMD} - K_{n-1-n}h_n) & -K_{TMD}h_{TMD} & \sum_{i=1}^n (K_{i,i+1}h_i^2 + K_\varphi) \end{bmatrix}$$

СИСТЕМА С НЕСКОЛЬКИМИ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ (БИРБРАЕР А. Н.)

МАТРИЦА ЖЁСТКОСТИ

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = -[M](\{U_x\}\ddot{x}_0)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & m_n & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & I \end{bmatrix}; I = I_c + \sum_{i=1}^n m_i h_i^2$$

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ДИНАМИКУ СИСТЕМЫ С НЕСКОЛЬКИМИ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

$$K = \vartheta \frac{GA}{h}$$

МАТРИЦА МАСС

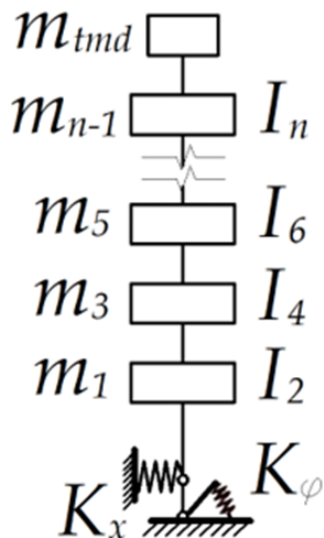
$$\{U_x\}^T = \{1, \dots, 1, 0\}$$

ВЕКТОР НАПРАВЛЯЮЩИХ КОСИНУСОВ

СДВИГОВАЯ ЖЁСТКОСТЬ ЭТАЖА



## Уравнения для модели с несколькими степенями свободы, учитывающей изгибную и сдвиговую жёсткость здания



СИСТЕМА С НЕСКОЛЬКИМИ  
СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ (БОНДАРЕВ Д.  
Е.)

$$[K] = \begin{bmatrix} A12i/l^2 + 12i/l^2 & 6i/l - B6i/l & -12i/l^2 & 6i/l & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 6i/l - B6i/l & C4i + 4i & -6i/l & 2i & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -12i/l^2 & -6i/l & 12i/l^2 + 12i/l^2 & 0 & -12i/l^2 & 6i/l & 0 & \dots & 0 \\ 6i/l & 2i & 0 & 4i + 4i & -6i/l & 2i & 0 & \dots & 0 \\ & 0 & 0 & -12i/l^2 & -6i/l & & & & 0 \\ & 0 & 0 & 6i/l & 2i & & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 12i/l^2 + K_{TMD} & -6i/l & -K_{TMD} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & -6i/l & 4i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -K_{TMD} & 0 & K_{TMD} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{Where } A = \frac{l^2 K_X(K_\phi + i)}{l^2 K_X(K_\phi + 4i) + 12i(K_\phi + i)}, \quad B = \frac{l^2 K_X(K_\phi + 2i)}{l^2 K_X(K_\phi + 4i) + 12i(K_\phi + i)}, \quad C = \frac{3i(K_\phi + l^2 K_X) + l^2 K_X K_\phi}{l^2 K_X(K_\phi + 4i) + 12i(K_\phi + i)}$$

$i = \frac{EI}{l}$ ,  $l$  – height of the floor,  $EI$  – bending stiffness of the floor.

Mass matrix can be written:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & & & & & \\ 0 & I_2 & & & & & \\ & & m_3 & 0 & & & \\ \vdots & & 0 & I_4 & & & \\ & & & & \ddots & 0 & \\ & & & & 0 & m_{n-1} & \\ & 0 & & & & & I_n & 0 \\ & & & & & \dots & 0 & m_{TMD} \end{bmatrix}; \quad I_i = \frac{m_i}{12}(l^2 + b^2) \quad (15)$$

Where  $I_i$  – moment of inertia of the floor,  $l$  – height of the floor,  $b$  – width of the building.

**МАТРИЦА ЖЁСТКОСТИ И МАТРИЦА МАСС**

$$\{U_x\}^T = \{1, 0, 1, 0, \dots, 1, 0, 1\}$$

**ВЕКТОР НАПРАВЛЯЮЩИХ  
КОСИНУСОВ**



# Уравнения для модели с несколькими степенями свободы, учитывающей изгибные и сдвиговые жёсткости

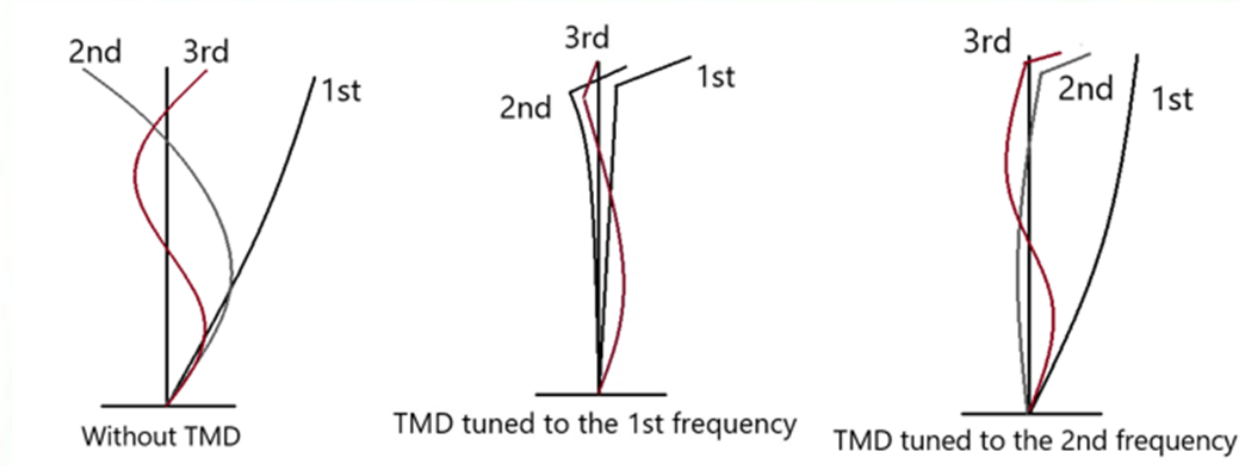
$$[C] = \begin{bmatrix} \xi_1 \omega_1 M_1 & 0 & \dots & & & & \\ 0 & \xi_2 \omega_2 M_2 & & & & & \\ \vdots & & \xi_3 \omega_3 M_3 & 0 & & & \\ & & 0 & \xi_4 \omega_4 M_4 & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & 0 & \xi_{n-2} \omega_{n-2} M_{n-2} & & \\ & & & & \dots & & \\ & & & & & \xi_{n-1} \omega_{n-1} M_{n-1} & \\ & & & & & 0 & \\ & & & & & & \xi_n \omega_n M_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

Where  $\xi_1 \dots \xi_n$  – damping ratios,  $M_1 \dots M_n$  – generalized modal masses,  $\omega_1 \dots \omega_n$  – modal frequencies.

## МАТРИЦА ДЕМПФИРОВАНИЯ

Формирование матрицы диссипаций, показанное на данном слайде, позволяет для каждой формы колебаний задать свой собственный параметр затухания.

Если настроить ДГК на высшие моды, то возможно задание отдельно затухания для первой формы колебаний (покачивание здания на грунте) и для формы, на частоту которой настроен ДГК.

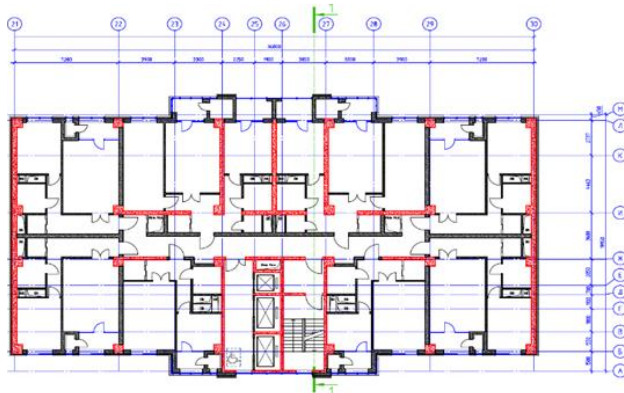


ПЕРВЫЕ ТРИ ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ ЖЁСТКО ЗАЩЕMLЁННОГО СТЕРЖНЯ. СЛЕВА НАПРАВО: БЕЗ ДГК; ДГК, НАСТРОЕННОГО НА ПЕРВУЮ СОБСТВЕННУЮ ЧАСТОТУ; ДГК, НАСТРОЕННОГО НА ВТОРУЮ СОБСТВЕННУЮ ЧАСТОТУ



ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
 «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

## Описание объекта исследования



ПЛАН ТИПОВОГО ЭТАЖА



ОБЩИЙ ВИД ТРЁХ ЗДАНИЙ

Объект состоит из трёх точечных высотных многоквартирных зданий. Три здания имеют общий подземный двухуровневый паркинг. Здания выполнены из монолитного железобетона. Конструктивная схема здания – каркасно-стеновая. Фундамент у трёх зданий общий – монолитная фундаментная плита.

Каждое из трёх зданий имеет длину в плане – **36 метров**, ширину – **19.95 метров**, высоту над уровнем земли – **102.6 метра**. **33 надземных** и **2 подземных этажа**. Высота этажа – 3.1 м.

Здание имеет технический этаж (32 этаж), который имеет высоту 2.2 метра. Три здания разделены между собой сейсмическим и тепловым зазором шириной 500 мм (в чистоте) или 1000 мм (между осями несущих конструкций).



## Цель расчётного исследования

С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКЦИИ ЗДАНИЯ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНО СНИЗИТЬ ОТВЕТНЫЕ АБСОЛЮТНЫЕ УСКОРЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ЗДАНИЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.

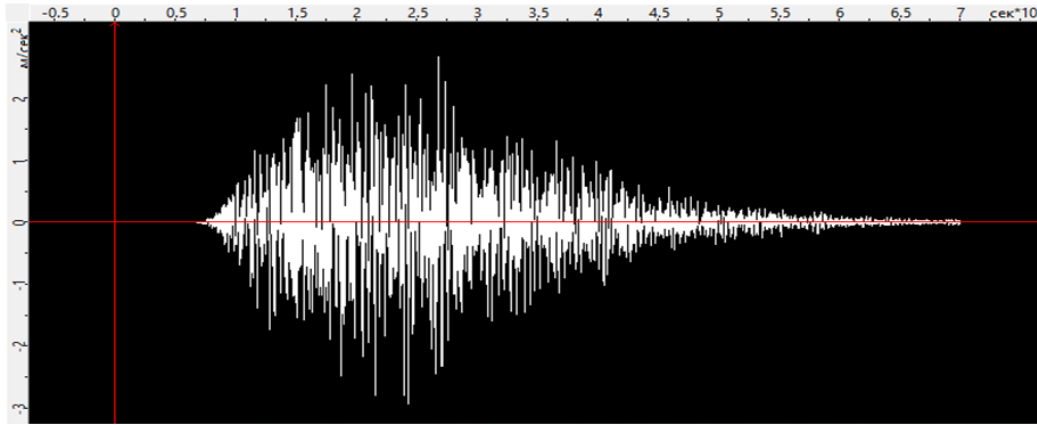
Положения расчёта:

- СНИЖЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ УСКОРЕНИЙ ОТ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ СВИДЕТЕЛЬСТВУЕТ ОБ УМЕНЬШЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ВО ВРЕМЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, НА ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ;
- СНИЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПОВЫШАЕТ ОБЩУЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЁЖНОСТЬ СООРУЖЕНИЯ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ;
- УСПЕШНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СНИЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ЗДАНИЕ МОЖЕТ ЗНАЧИТЕЛЬНО СОКРАТИТЬ РАСХОДЫ НА СТРОИТЕЛЬСТВО, А ТАКЖЕ НА РЕМОНТ ЗДАНИЯ ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ;
- СНИЖЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ УСКОРЕНИЙ УМЕНЬШАЕТ РИСК ПОЛУЧЕНИЯ ТРАВМ И ЛЕТАЛЬНЫХ ИСХОДОВ ДЛЯ ЖИТЕЛЕЙ ВО ВРЕМЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ;
- СНИЖЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ УСКОРЕНИЙ ОТ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НЕОБХОДИМО ДЛЯ КОМФОРТНОГО ПРОЖИВАНИЯ НА ПОСЛЕДНЕМ ЭТАЖЕ МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА, ЧТО РЕГЛАМЕНТИРУЕТСЯ СОВРЕМЕННЫМИ НОРМАТИВНЫМИ ДОКУМЕНТАМИ.

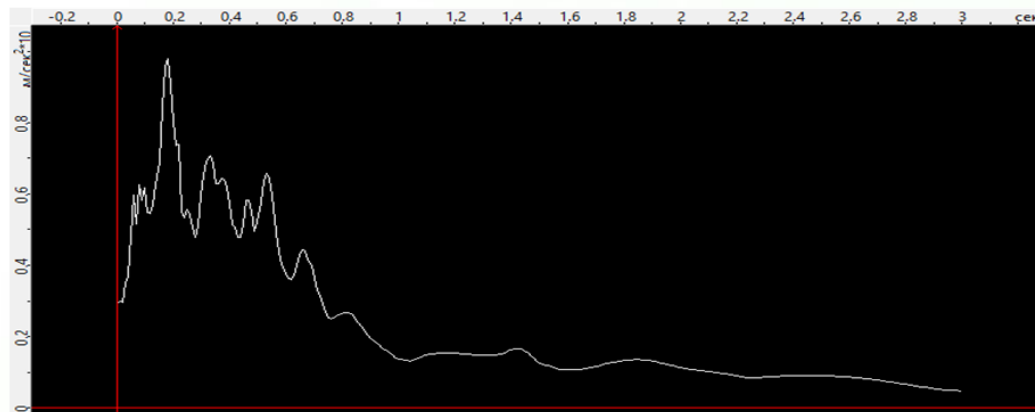




## Описание Сейсмического воздействия



СИНТЕЗИРОВАННАЯ АКСЕЛЕРОГРАММА (PGA=2.93 м/с<sup>2</sup>)



5% СПЕКТР ОТВЕТА УСКОРЕНИЙ В ОСЯХ ПЕРИОДОВ

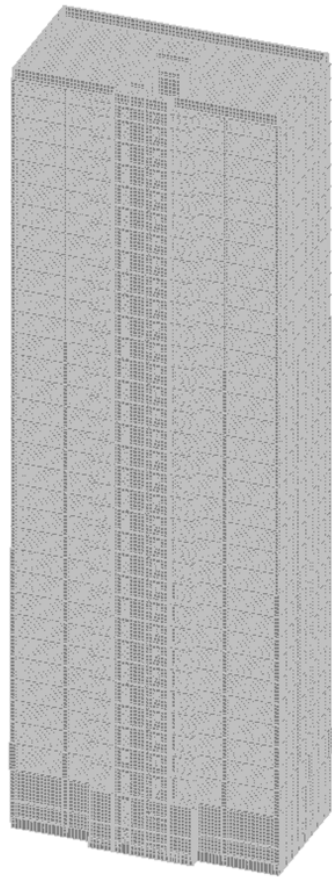
**Сейсмичность площадки строительства - 9 баллов.**

Расчёт на сейсмическое воздействие производился заданием синтезированных акселерограмм, представленных в отчёте по инженерно-геофизическим исследованиям.

**Акселерограмма воздействия по оси X и 5-ти процентный спектр ответа ускорений в осях периодов (PGA=2.93 м/с<sup>2</sup>)**



## Описание пространственной конечно-элементной модели для объекта



ОБЩИЙ ВИД КЭ МОДЕЛИ ЗДАНИЯ

Расчёт на сейсмическое воздействие проводился во временной области методом прямого интегрирования. Шаг интегрирования был выбран 0,01 с.

Матрица диссипаций формировалась по типу материала (метод Фиалко). Для железобетонных конструкций назначен параметр затухания – 5% от критического.

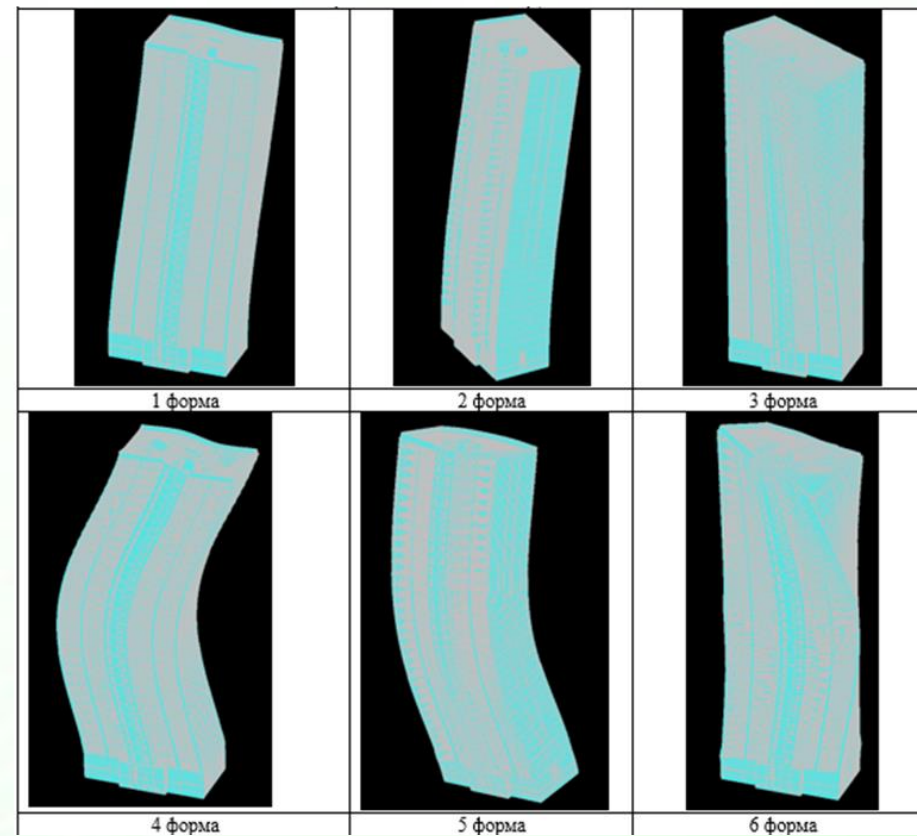
сейсмическое воздействие задавалось как вынужденные смещения опор. входной информацией являются сейсмограммы.

Сейсмическое воздействие задавалось трёхкомпонентным.



## Собственные формы и собственные частоты здания

Номер формы	Собственное значение	Частота		Период сек	Модальные массы (%)		
		рад/сек	Гц		X	Y	Z
1	0.46	2.16	0.34	2.9	67.23	0	0
2	0.41	2.43	0.39	2.58	0	62.46	0
3	0.32	3.16	0.5	1.99	0.33	0	0
4	0.13	7.52	1.2	0.84	14.92	0	0
5	0.09	11.39	1.81	0.55	0	20.02	0.02
6	0.08	13.29	2.12	0.47	0.07	0	0
7	0.07	14.99	2.39	0.42	4.81	0	0
8	0.04	22.78	3.63	0.28	0	0	69.71
9	0.04	23.12	3.68	0.27	2.11	0	0.02
10	0.04	24.37	3.88	0.26	0.41	0	0
Сумма модальных масс					89.87	82.48	69.74



## Критерий оптимизации для определения необходимых параметров TMD

Чтобы подобрать оптимальную **массу, жёсткость и демпфирование** в конструкциях гасителя проводилось несколько десятков расчётов, в котором варьировались указанные параметры. решалась оптимизационная задача, где целевой функцией является максимальное уменьшение ускорений в уровне перекрытий по отношению к зданию, в котором отсутствуют специальные системы динамического регулирования

В КАЧЕСТВЕ КРИТЕРИЯ БЫЛ ПРИНЯТ СЛЕДУЮЩИЙ ПАРАМЕТР: СУММА РАЗНИЦ УСКОРЕНИЙ ПО ВСЕМ ТРИДЦАТИ ТРЁМ ЭТАЖАМ:

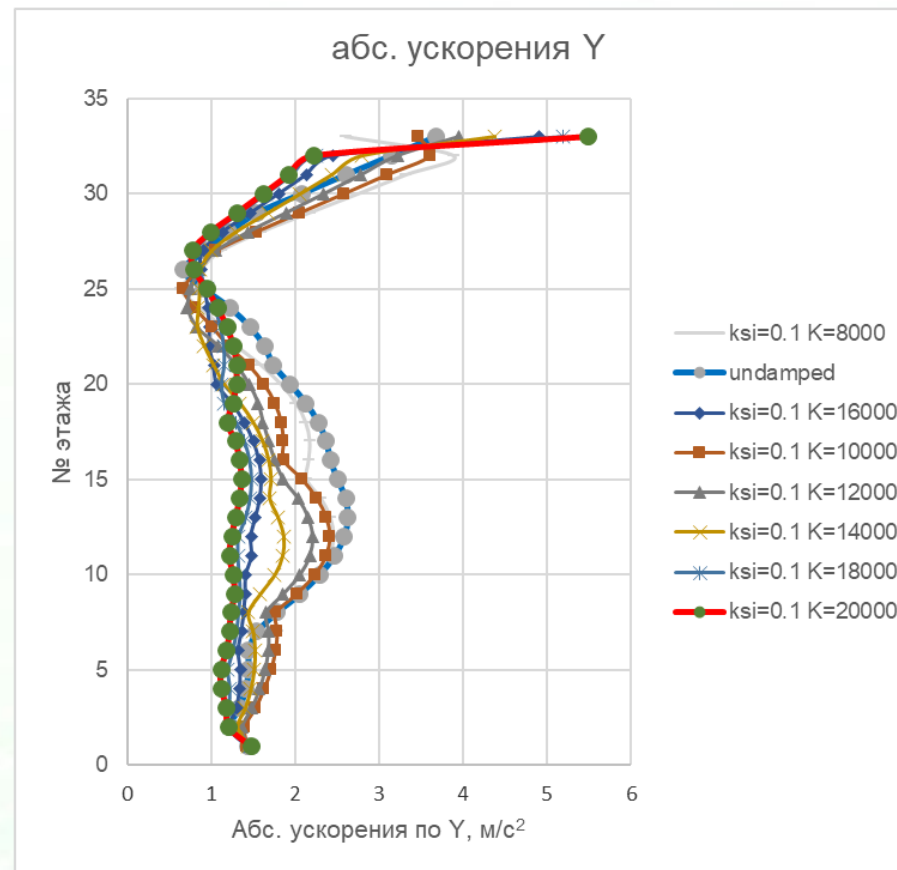
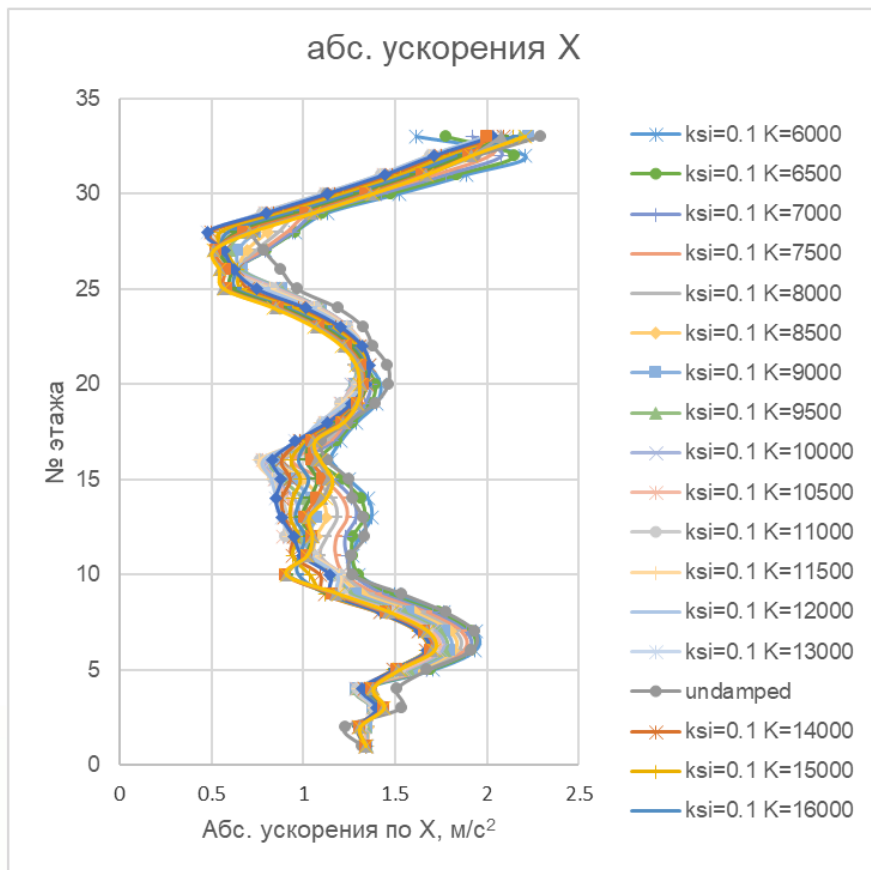
$$Cr = \max \sum_{i=1}^n (\max A_i - \max A_i^{TMD}); \quad (6.6)$$

Где  $n$  – количество этажей в здании,  $\max A_i$  – максимальное ускорение в  $i$ -ом этаже за всё время воздействия в здании без TMD,  $\max A_i^{TMD}$  – максимальное ускорение в  $i$ -ом этаже за всё время воздействия в здании с TMD.

КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ



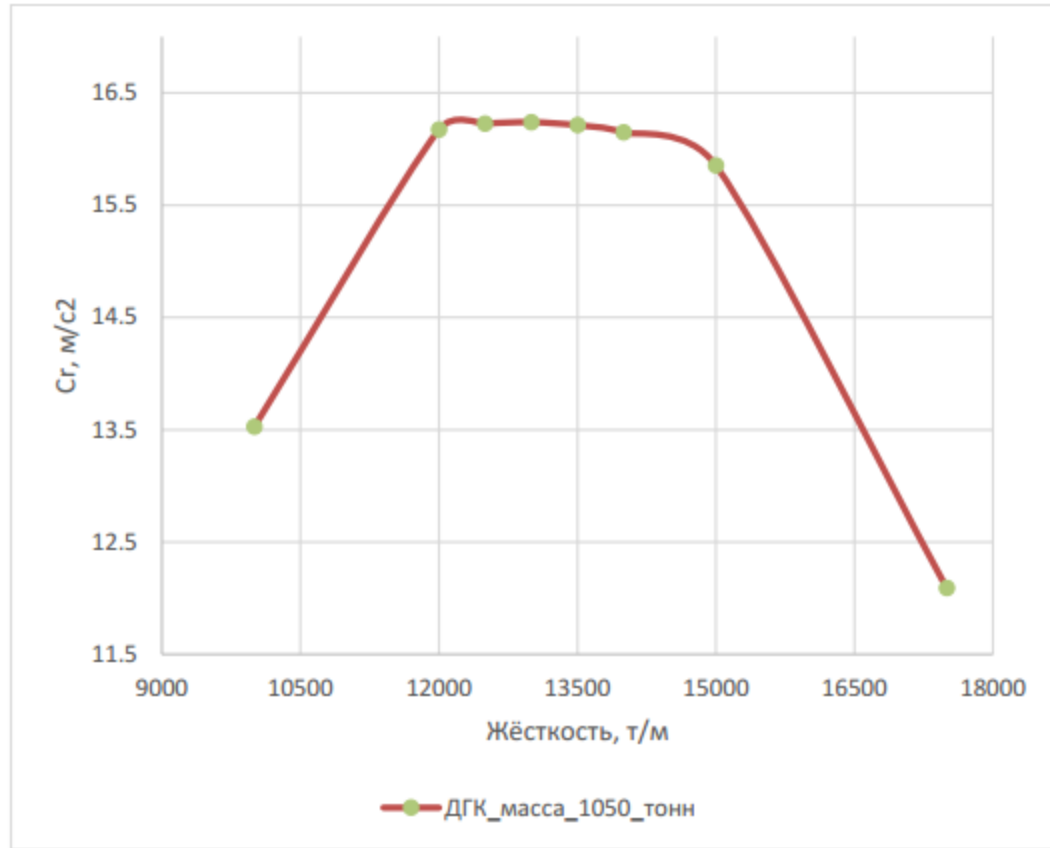
## Оптимизация параметров TMD



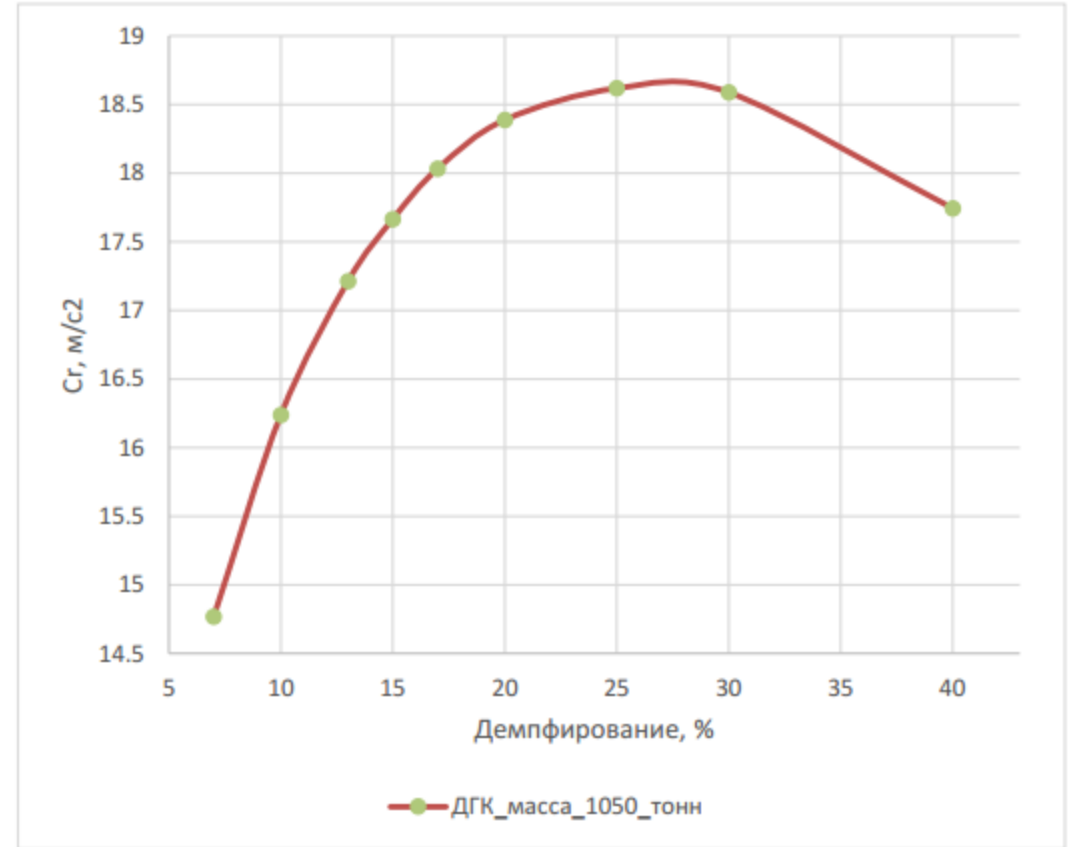
РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОДБОРА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЖЁСТКОСТИ TMD



# ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ. ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ЖЁСТКОСТИ И ДЕМПФИРОВАНИЯ ДГК



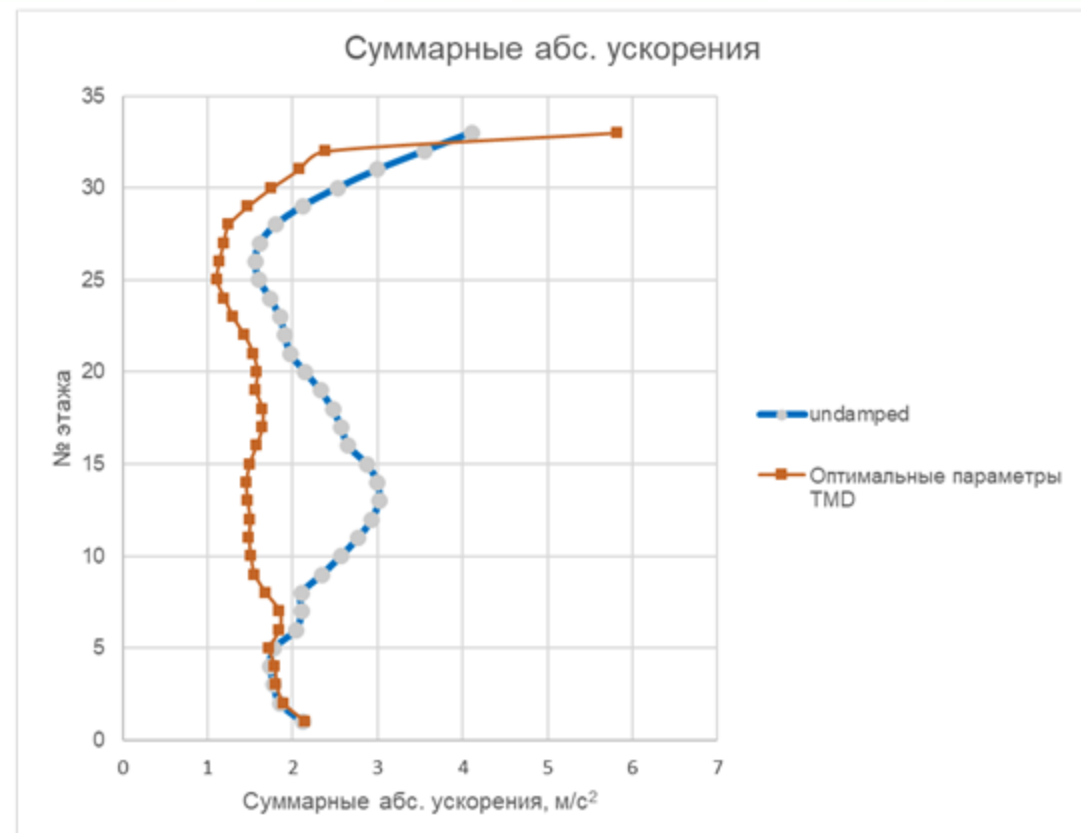
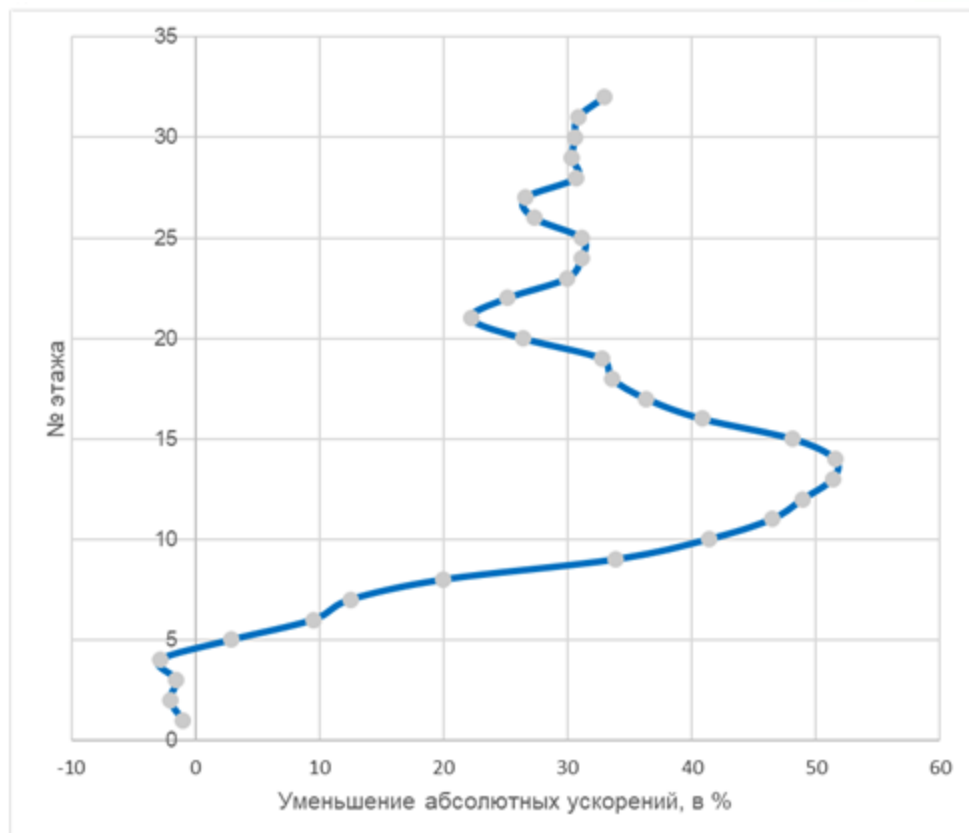
Зависимость «критерий оптимизации – суммарная жёсткость ДГК» для ДГК массой 1050 тонн



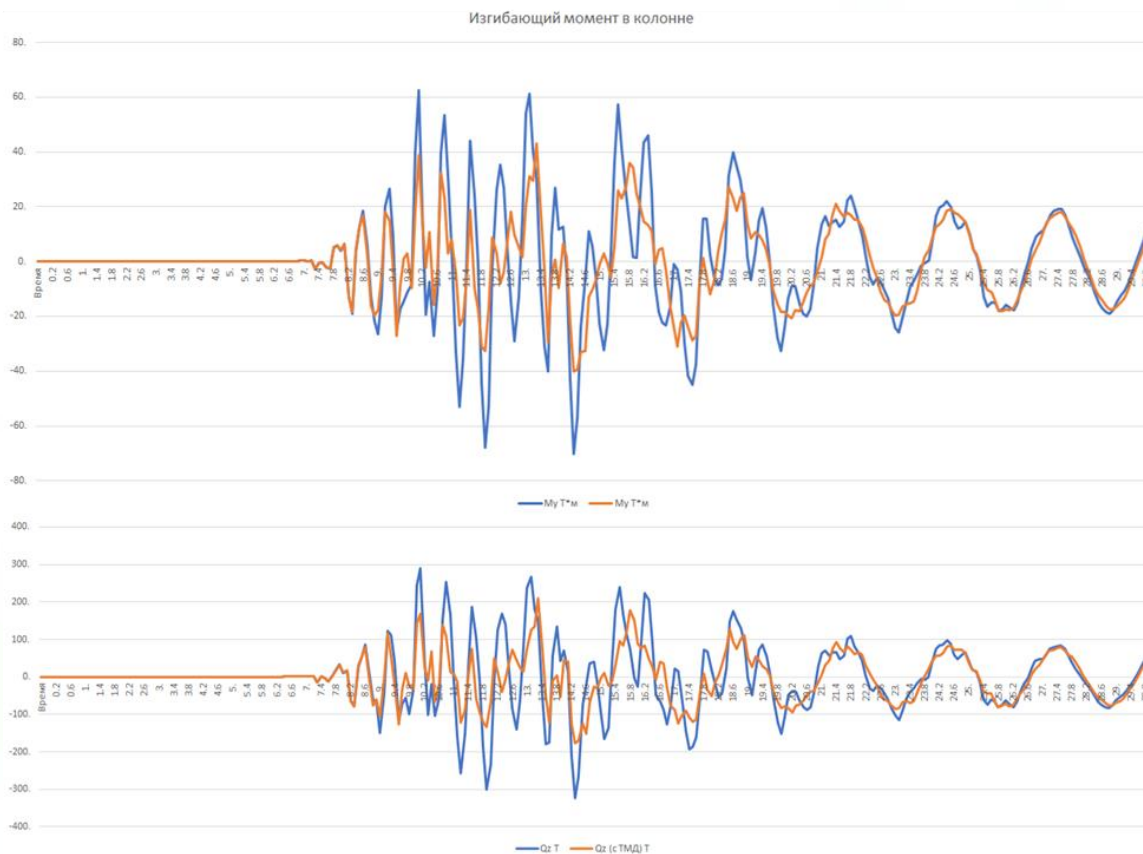
Зависимость «критерий оптимизации – демпфирование (в долях от критич.)» для жёсткости 13000 т/м и ДГК массой 1050 тонн



# ГРАФИК СНИЖЕНИЯ УСКОРЕНИЯ ПО ВСЕЙ ВЫСОТЕ ЗДАНИЯ

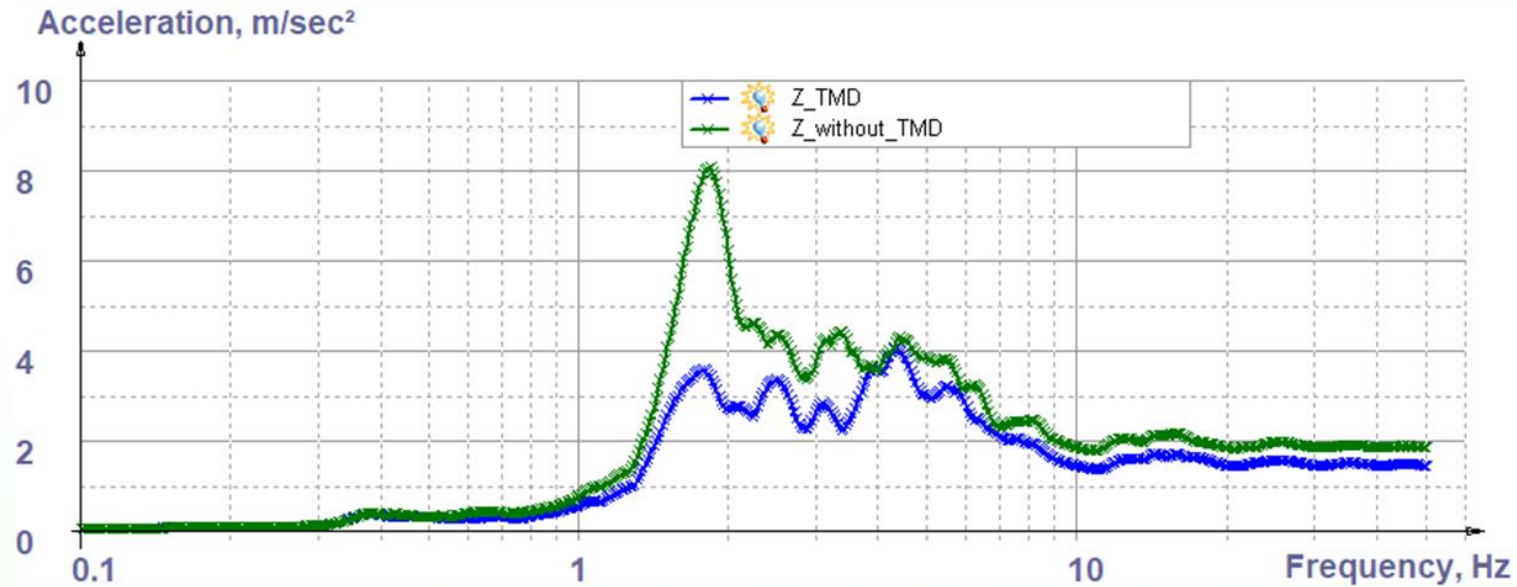


# Графики уменьшения усилий в элементах здания за счёт использования TMD





## Снижение вертикальных ускорений

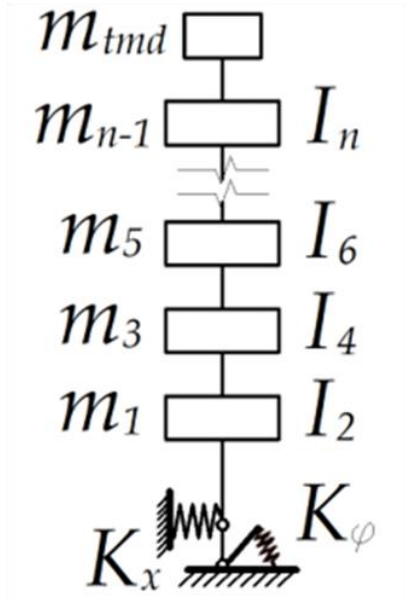


Пятипроцентный спектр ускорений верхней точки здания с учётом ДГК и без

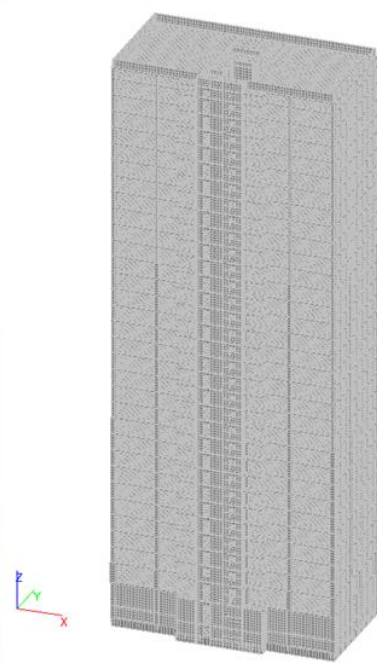
ДГК позволяет снизить ускорения, вызванные вертикальной компонентой сейсмического воздействия, до 30%.



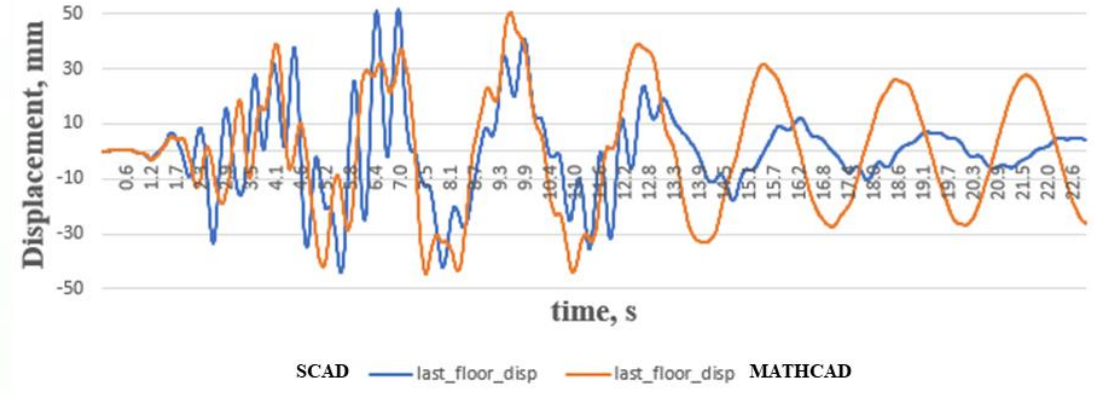
# Сравнение аналитической и численной моделей



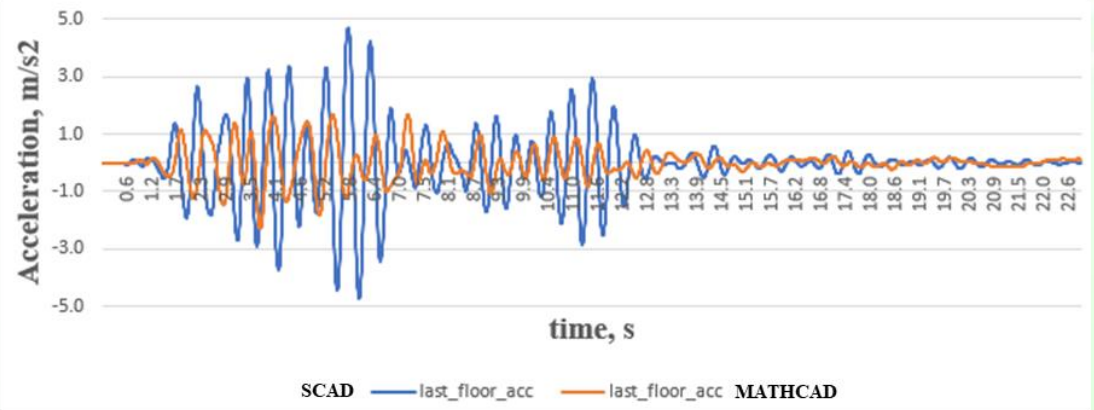
АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ



ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ



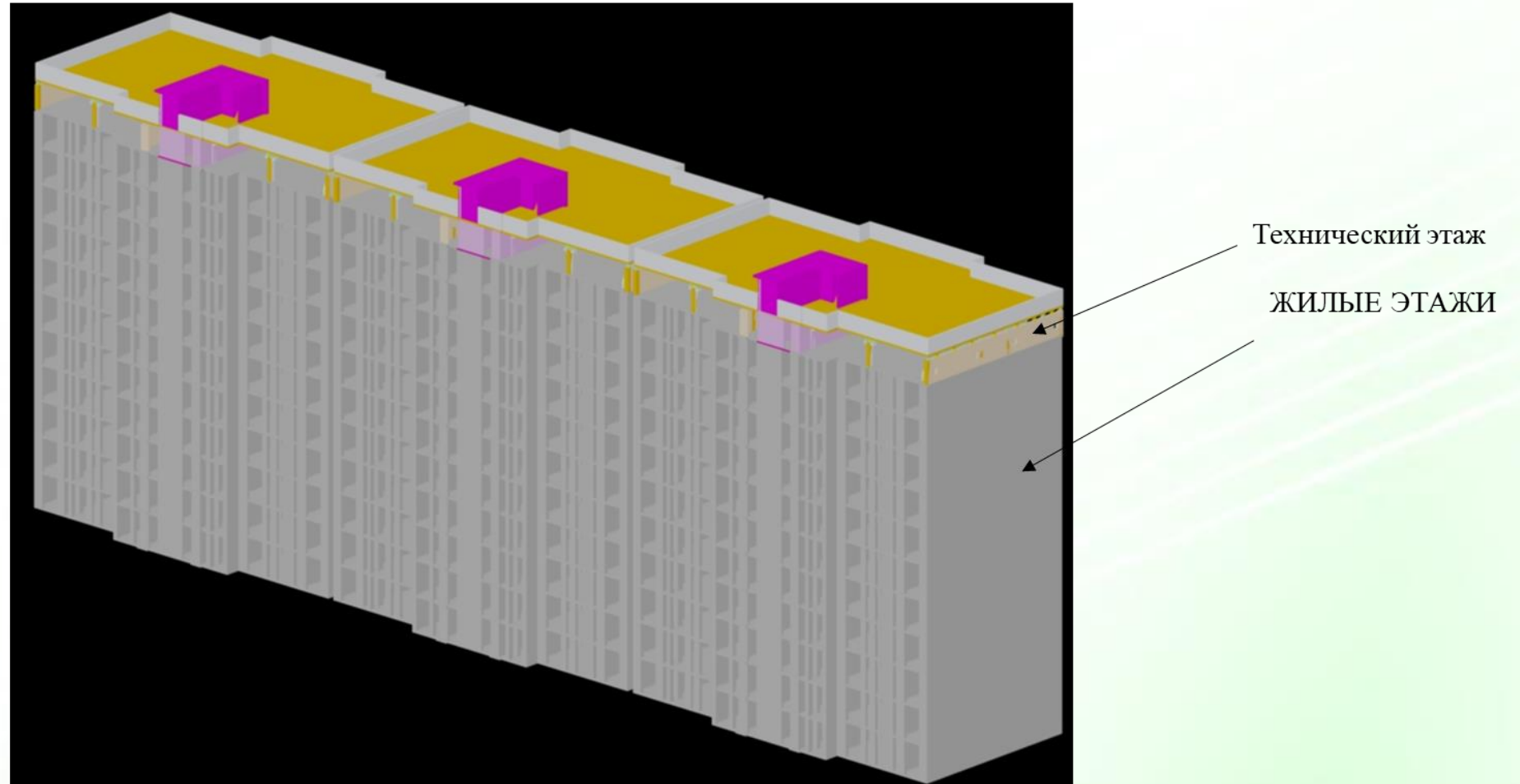
СРАВНЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВЕРХНЕЙ ТОЧКИ ЗДАНИЯ, М



СРАВНЕНИЕ УСКОРЕНИЙ ВЕРХНЕЙ ТОЧКИ ЗДАНИЯ, М/С<sup>2</sup>

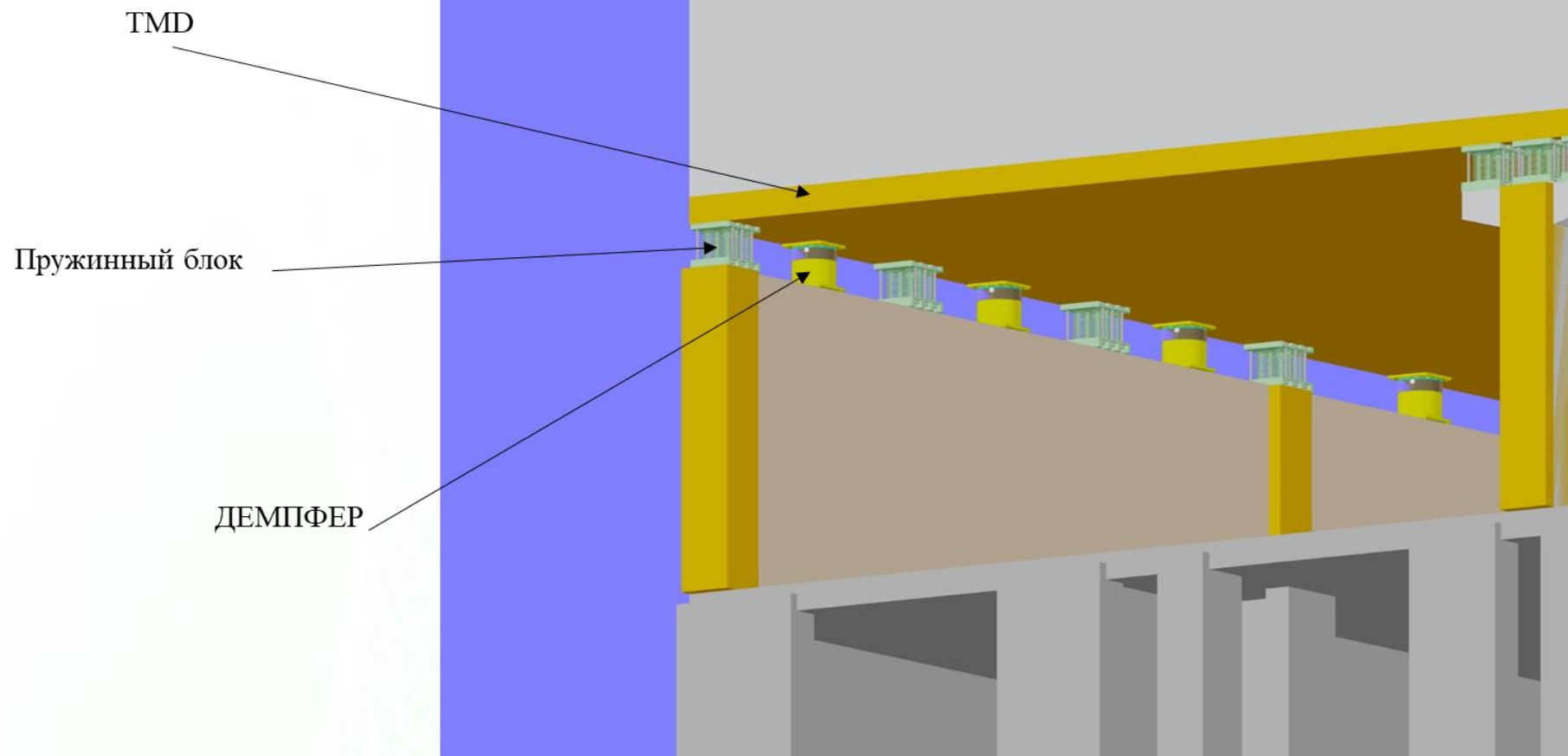


## Трёхмерная визуализация реализации TMD



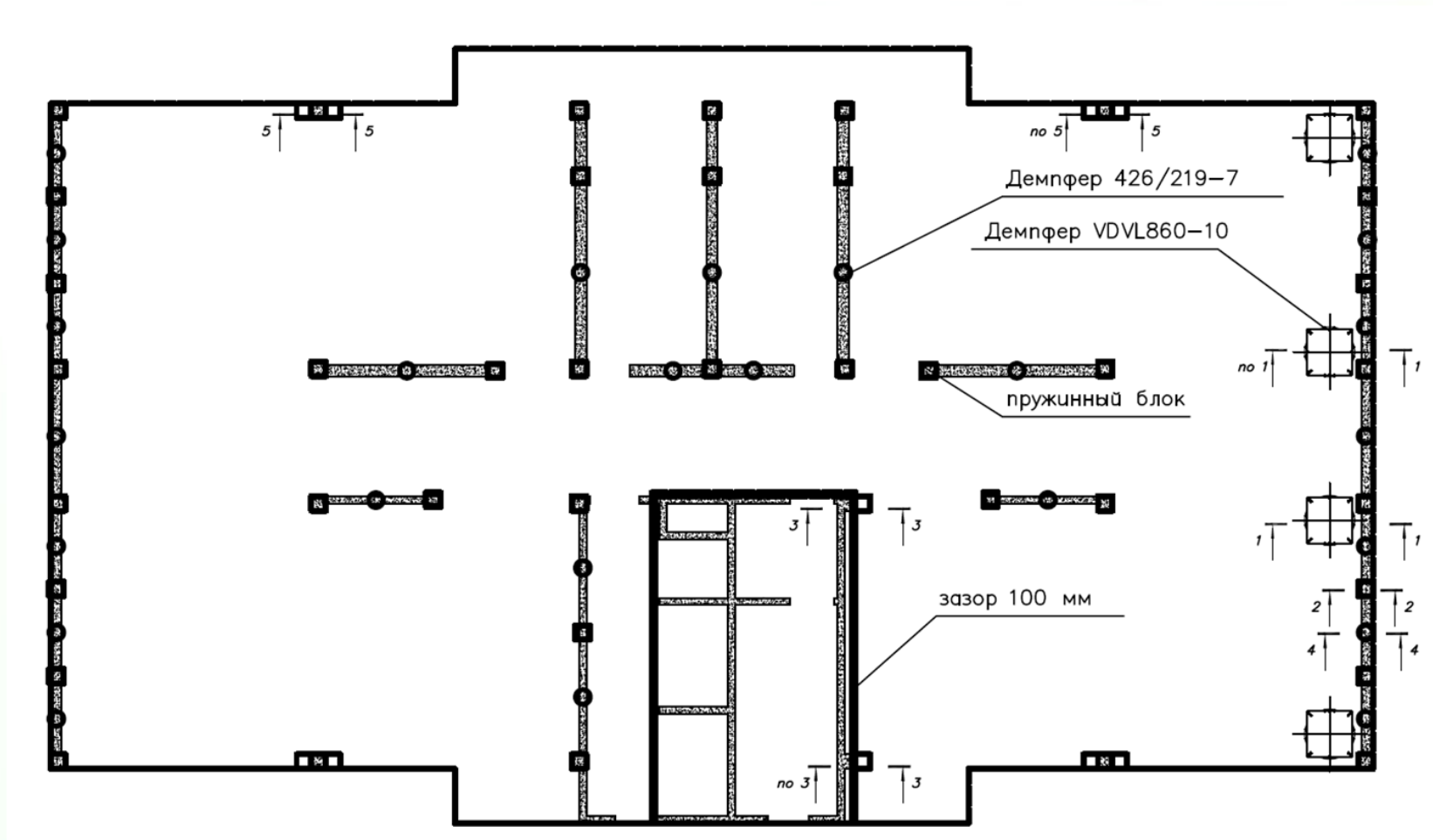
ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

## Вид а

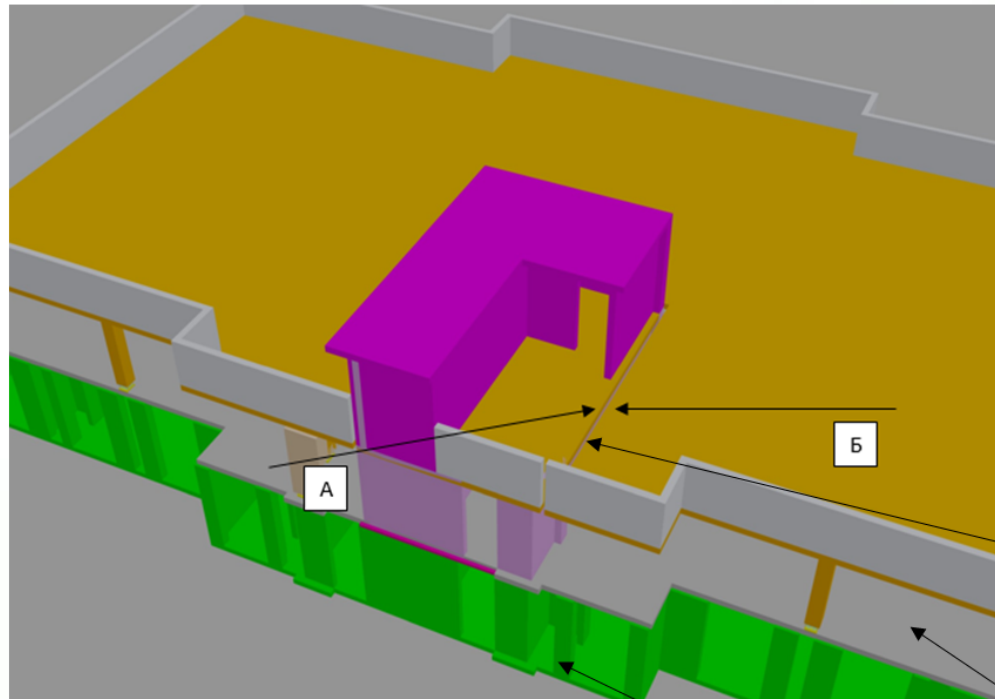


ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

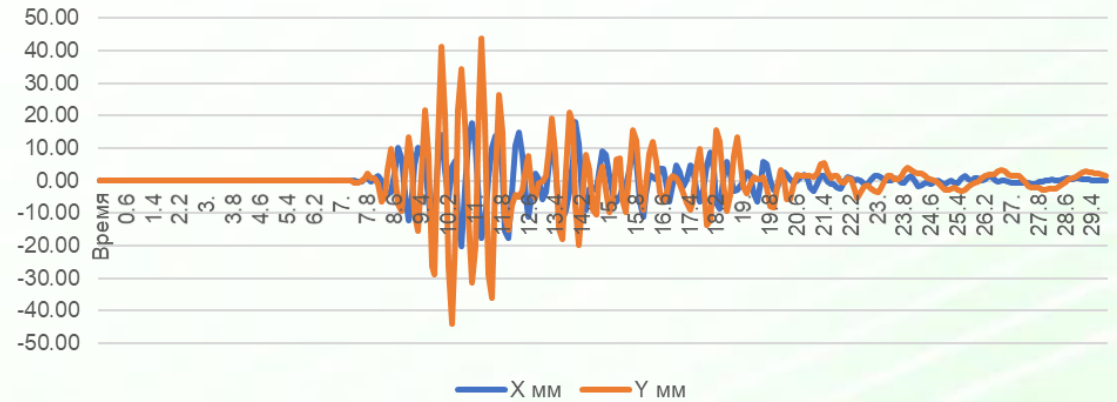
## Схема расположения демпферов и пружинных блоков



# Относительные перемещения TMD и основного объёма здания при расчёте на сейсмическое воздействие



Относительные перемещения точек А и Б



ЗАЗОР 100 ММ

Технический этаж

ЖИЛОЙ ЭТАЖ



# Использование стеновых демпферов для уменьшения сейсмических нагрузок в каркасных зданиях

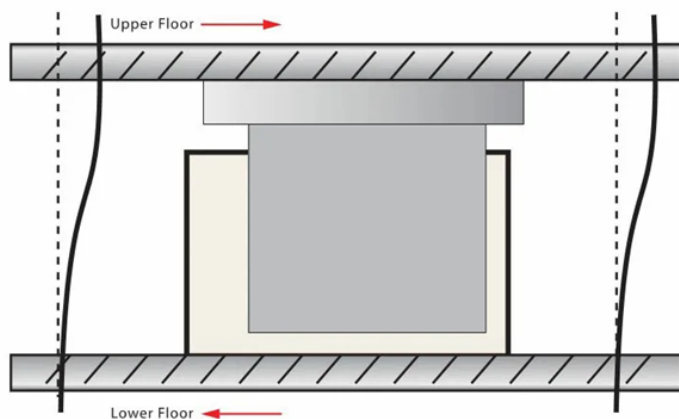
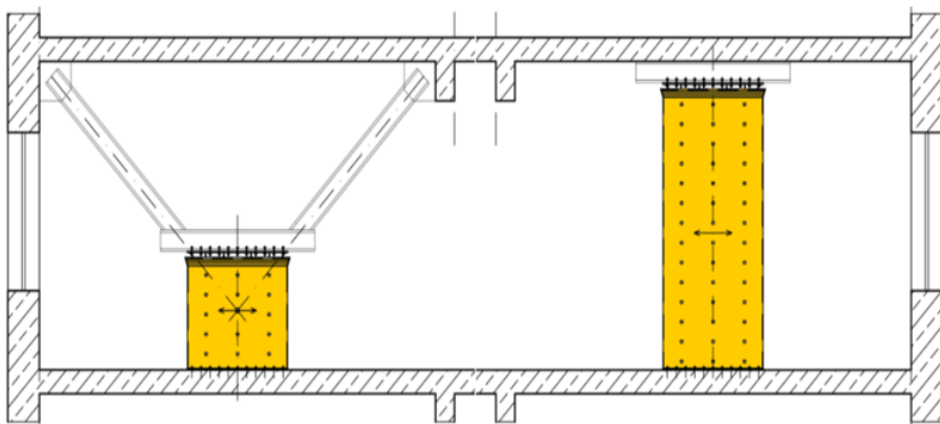
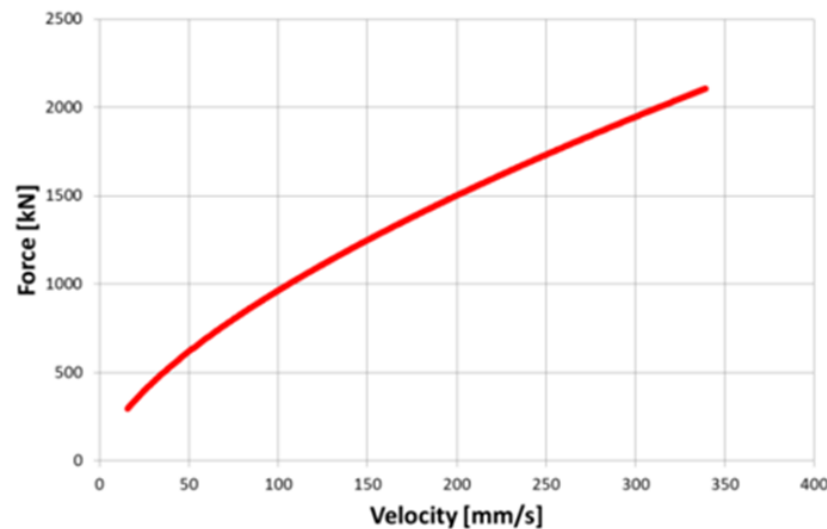


СХЕМА РАБОТЫ СТЕНОВОГО ДЕМПФЕРА



ПРИМЕР УСТРОЙСТВА СТЕНОВОГО ДЕМПФЕРА



СИЛОВАЯ ДИАГРАММА СТЕНОВОГО ДЕМПФЕРА

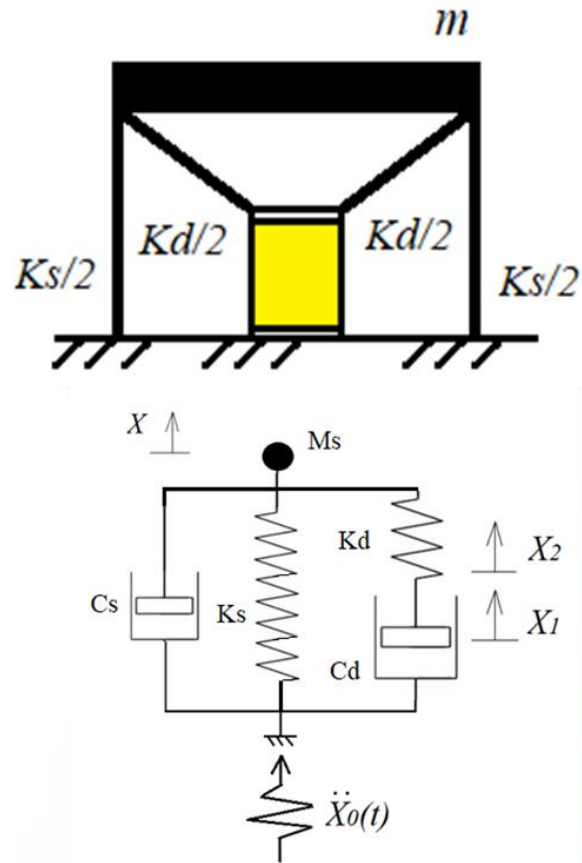
В мировой практике стеновые демпферы используют для уменьшения ускорений в зданиях, когда при сейсмическом воздействии ожидаются большие межэтажные сдвиги.

Как правило, стеновые демпферы используют в зданиях с каркасной конструктивной схемой. Многочисленные исследования показывают, что стеновые демпферы неэффективны в стеновых конструктивных схемах, т.к. в них преобладают преимущественно изгибные формы колебаний.

Соответственно, **эффективность** стеновых демпферов зависит от **конструктивной** схемы здания и **частотного состава** воздействия.



## Расчётная модель здания, оснащённого стеновым демпфером. Плоская задача



МОДЕЛЬ ОДНОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ,  
ОСНАЩЁННОГО СТЕНОВЫМ  
ДЕМПФЕРОМ. ДЕМПФЕР КРЕПИТСЯ  
ПОСРЕДСТВОМ УПРУГОГО  
ЭЛЕМЕНТА

Упругий элемент и демпфер будут соединены последовательно. Таким образом, необходимо решить систему дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_sx + c_d\dot{x}_1 = -m\ddot{x}_0(t) \\ c_d\dot{x}_1 = k_dx_2 \end{cases} \quad (3)$$

где  $c_s$  – коэффициент вязкого сопротивления, соответствующий конструкциям здания;

$m$  – масса здания;

$k_s$  – жёсткость конструкций здания;

$k_d$  – жёсткость упругой связи, соединяющей демпфер с конструкциями здания;

$c_d$  – коэффициент вязкого сопротивления, соответствующий стеновому демпферу.

$\ddot{x}_0(t)$  – ускорение основания системы (акселерограмма сейсмического воздействия).

Так как  $x_1 + x_2 = x$ , преобразуем уравнение 3 к следующему виду:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_sx + c_d\dot{x}_1 = -m\ddot{x}_0(t) \\ c_d\dot{x}_1 = k_dx - k_dx_1 \end{cases} \quad (4)$$

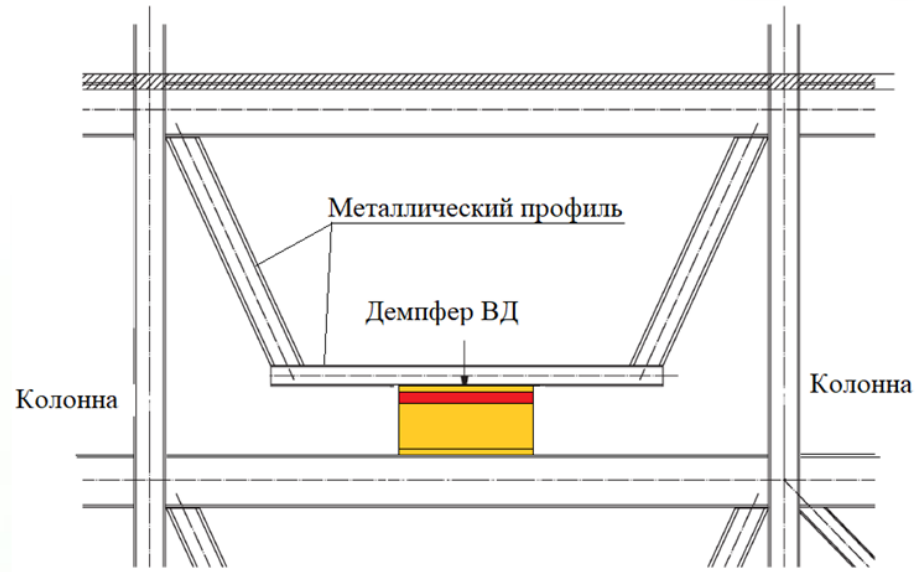




## Стеновой демпфер «WD CVS»



ОБЩИЙ ВИД ВЫСОКОВЯЗКОГО  
ДЕМПФЕРА ВД-630/426-15



ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА  
УСТАНОВКИ СТЕНОВОГО  
ДЕМПФЕРА «WD CVS» («WALL  
DAMPER CVS») МЕЖДУ  
КОЛОННАМИ

Рассматривается вариант конструкции стенового вязкого демпфера, способного рассеивать энергию во всех трёх ортогональных направлениях.

Такой стеновой демпфер позволит снизить сейсмические нагрузки от **ВОЗМОЖНЫХ ВОЛНОВЫХ ЭФФЕКТОВ** в вертикальной плоскости (rocking) за счёт сопротивления такого демпфера в вертикальном направлении.

Также демпфер позволит **значительно снизить эффекты кручения здания** в горизонтальной плоскости (torsion), которые могут быть вызваны наличием эксцентриситета между центром масс и центром жёсткостей здания.



## Расчётная модель здания, оснащённого стеновым демпфером “WD CVS”. Плоская задача

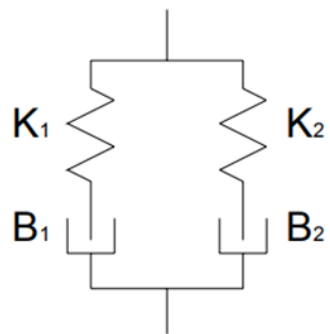
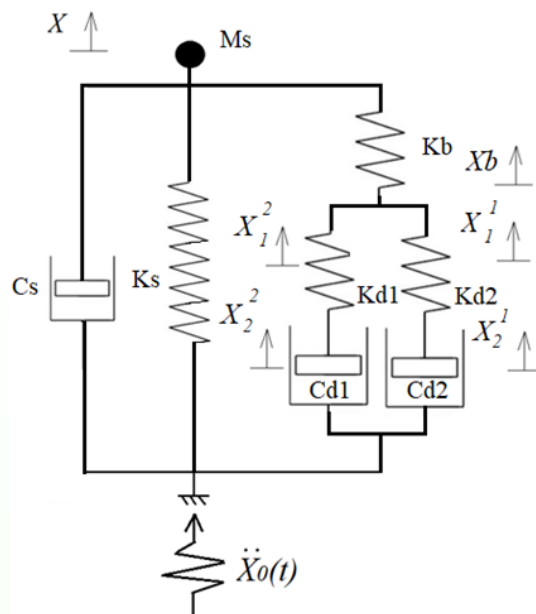


СХЕМА РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ  
ВЫСОКОВЯЗКОГО  
ДЕМПФЕРА (K – ЖЁСТКОСТЬ,  
B – ВЯЗКОСТЬ ЦЕПЕЙ  
ДЕМПФЕРА)



РАСЧЁТНАЯ СХЕМА  
ОДНОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ,  
ОСНАЩЕННОГО СТЕНОВЫМ  
ДЕМПФЕРОМ «WD CVS» («WALL  
DAMPER CVS») ПОСРЕДСТВОМ  
УПРУГОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ  
СВЯЗИ

Необходимо решить систему дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_s x + k_b x_b = -m\ddot{x}_0(t) \\ k_b x_b = k_{d1}x_1^1 + k_{d2}x_1^2 \\ k_{d1}x_1^1 = c_{d1}\dot{x}_2^1 \\ k_{d2}x_1^2 = c_{d2}\dot{x}_2^2 \end{cases} \quad (5)$$

где  $c_s$  – коэффициент вязкого сопротивления, соответствующий конструкциям здания;

$m$  – масса здания;

$k_s$  – жёсткость конструкций здания;

$k_b$  – жёсткость упругой связи, соединяющей демпфер с конструкциями здания;

$k_{d1}$  – жёсткость упругой связи в первой цепи демпфера;

$k_{d2}$  – жёсткость упругой связи в первой цепи демпфера;

$c_{d1}$  – коэффициент вязкого сопротивления, соответствующий первой цепи демпфера;

$c_{d2}$  – коэффициент вязкого сопротивления, соответствующий первой цепи демпфера;

$\ddot{x}_0(t)$  – ускорение основания системы (акселерограмма сейсмического воздействия).



# Расчётная модель здания, оснащённого стеновым демпфером «WD CVS». Плоская задача

Так как  $x_1^1 + x_2^1 = x_1^2 + x_2^2$  и  $x = x_b + x_1^2 + x_2^2$  (или  $x = x_b + x_1^1 + x_2^1$ ) преобразуем уравнение 5 и сформируем вектор начальных условий и вектор первых и вторых производных в явном виде для решения системы дифференциальных уравнений численным методом в среде ПК MathCad.

Сформируем вектор первых и вторых производных в явном виде:

$$D = \begin{cases} -\ddot{x}_0(t) - c_s \frac{y_2}{m} - k_s \frac{y_1}{m} - k_{d1} \frac{A}{m} - k_{d2} \left( \frac{k_b(y_1 - y_4) - k_{d1}A}{m(k_{d2} + k_b)} \right) \\ k_{d1} \left( \frac{k_b(y_1 - y_4) - k_{d1}A}{(k_{d2} + k_b)c_{d1}} \right) - (y_3 - y_4)/c_{d1} \\ k_{d2} \left( \frac{k_b(y_1 - y_4) - k_{d1}A}{c_{d2}(k_{d2} + k_b)} \right) \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{где } A = \frac{y_1 k_b - y_3 (c_{d1} + k_b) - c_{d2} y_4}{k_b}$$

Зададим вектор начальных условий:

$$y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} y_1 = x \\ y_2 = \dot{x} \\ y_3 = x_1^2 \\ y_4 = x_1^1 \end{matrix} \quad (7)$$

Полученные уравнения позволяют решить плоскую задачу: учесть горизонтальные колебания одноэтажного здания вдоль одной из горизонтальных осей с учётом стенового демпфера «WD CVS» («Wall Damper CVS»). Модель полезна тем, что с её помощью можно быстро выполнить оптимизационный анализ и подобрать жёсткость металлического профиля  $k_b$ , а также необходимые параметры вязкоупругого демпфера. Недостатки данной модели в том, что она не учитывает кручение здания в плане.

С помощью данных уравнений можно выполнить предварительный оптимизационный анализ и подобрать необходимые:

- Жёсткость металлического профиля;
- Оптимальное количество демпферов.

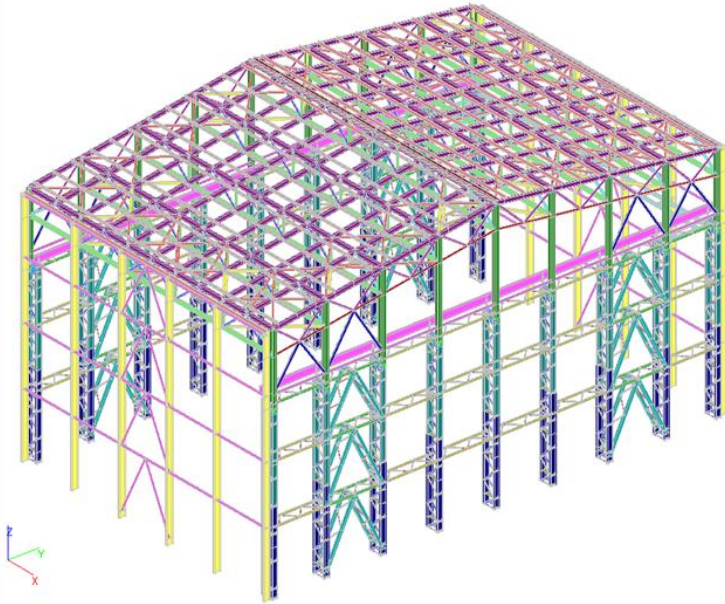
В качестве критерия был принят следующий параметр: наименьшие суммарные усилия в конструкциях здания.

$$Cr = \min (Ks * x)$$

где  $Ks$  – жёсткость конструкций здания,  $x$  – перемещение массы, полученное по результатам решения системы дифференциальных уравнений (уравнение 6).



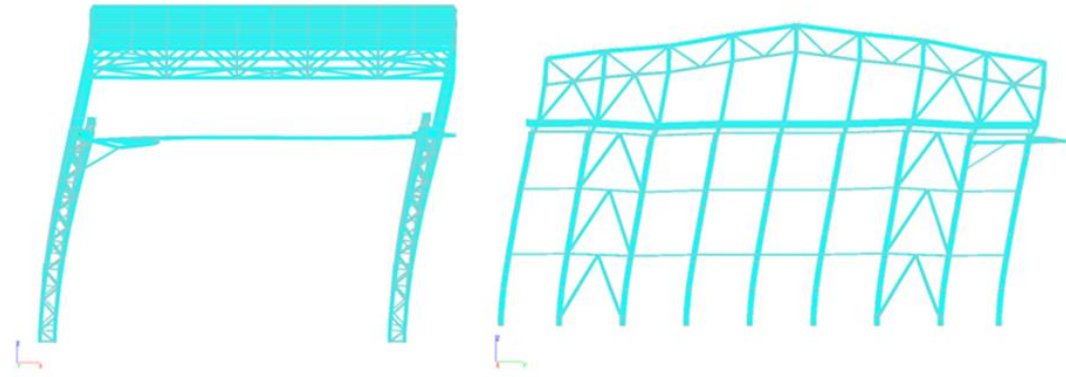
## Расчёт металлокаркаса. Пространственная задача



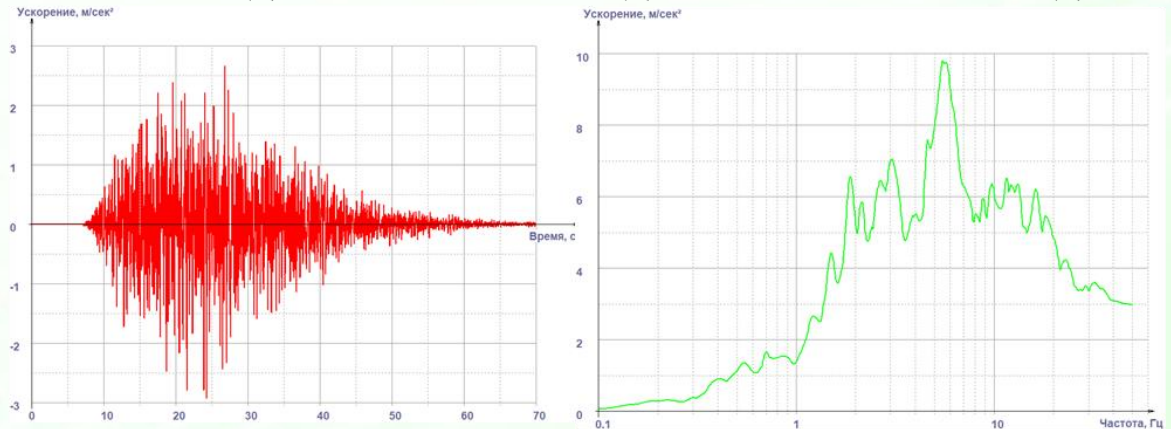
**РАСЧЁТНАЯ СХЕМА ПРОМЫШЛЕННОГО  
ОТДЕЛЬНО СТОЯЩЕГО ЗДАНИЯ,  
ВЫПОЛНЕННОГО ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
КОНСТРУКЦИЙ**

Таблица 1. Собственные частоты здания

Номер формы	Период сек	Модальные массы (%)		
		X	Y	Z
1	1.1	76.59	0	0
2	0.61	0	84.43	0
53	0.13	0	0.15	35.55



**СОБСТВЕННЫЕ ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ. СЛЕВА: ПОПЕРЕЧНЫЕ  
КОЛЕБАНИЯ ЗДАНИЯ, СПРАВА: ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЗДАНИЯ**



**ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПЯТИПРОЦЕНТНЫЙ СПЕКТР УСКОРЕНИЙ.**

**PGA=2.93 M/C2**



**ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»**

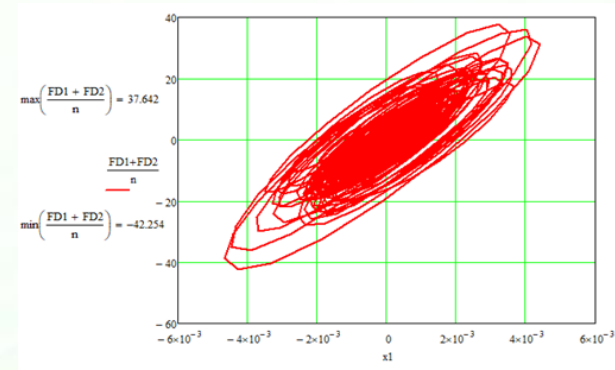
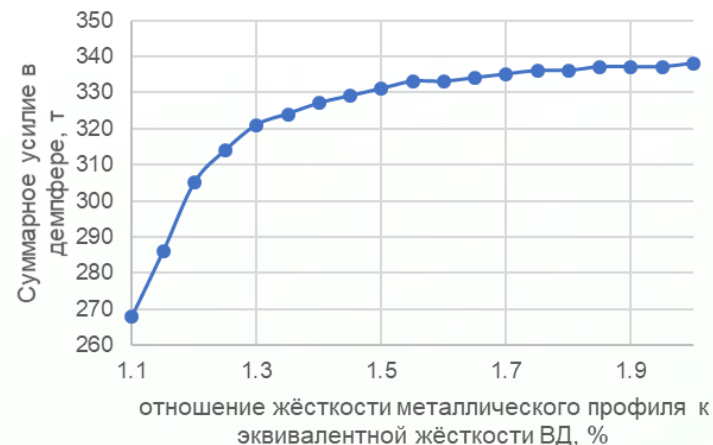
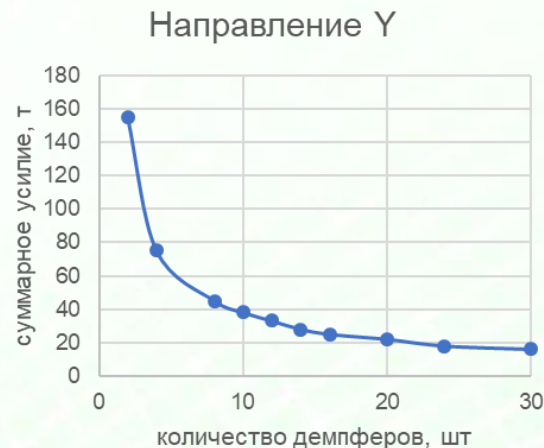
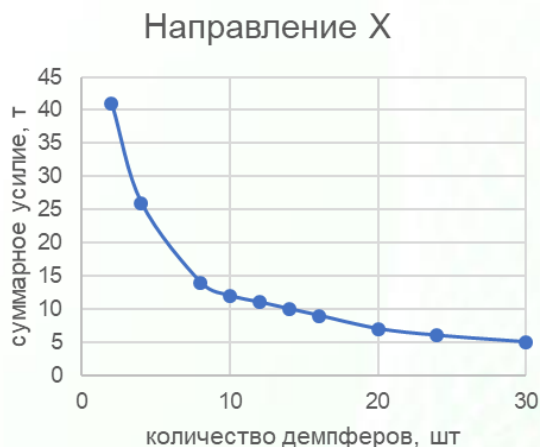
## Результаты оптимизационного анализа

В результате оптимизационного анализа упрощённой модели здания, оснащённого стеновыми демпферами, вдоль направлений X и Y необходимо установить:

- 8 демпферов ВД-630/426-15 по направлению X;
- 16 демпферов ВД-630/426-15 по направлению Y.

Количество демпферов подбиралось в зависимости от снижения суммарного усилия, возникающего в пружине с жёсткостью  $K_s$  (Рисунок 8). Графики снижения суммарного усилия от количества демпферов приведена на рисунке 12.

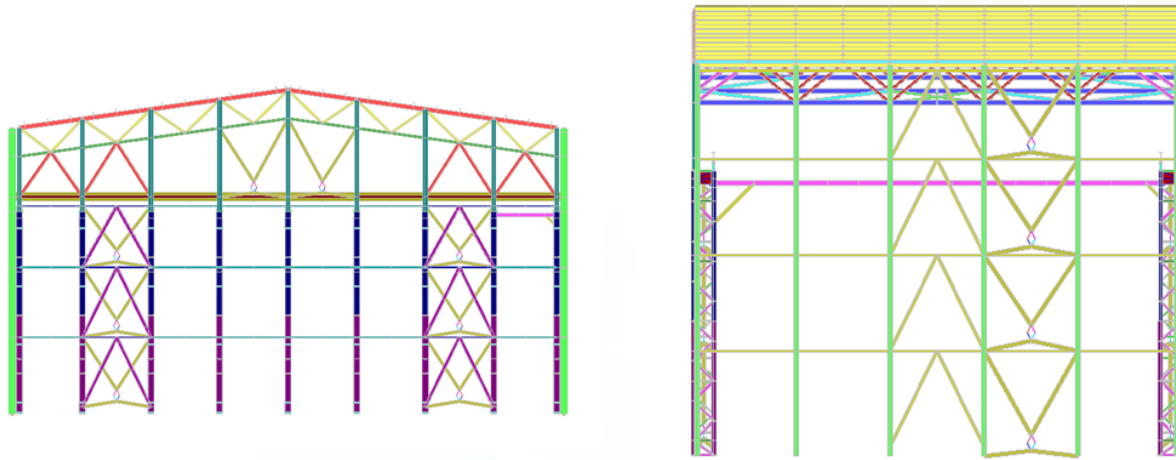
В результате оптимизационного анализа было определено, что для обеспечения эффективной работы вязкоупругого демпфера жёсткость металлического профиля должна превышать эквивалентную жёсткость демпфера не менее, чем в 5 раз (Рисунок 13).



**СИЛОВАЯ ДИАГРАММА  
СТЕНОВОГО ДЕМПФЕРА. СЛЕВА  
УКАЗАНЫ МАКСИМАЛЬНЫЕ И  
МИНИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ**



# Расчёт пространственной модели металлического каркаса

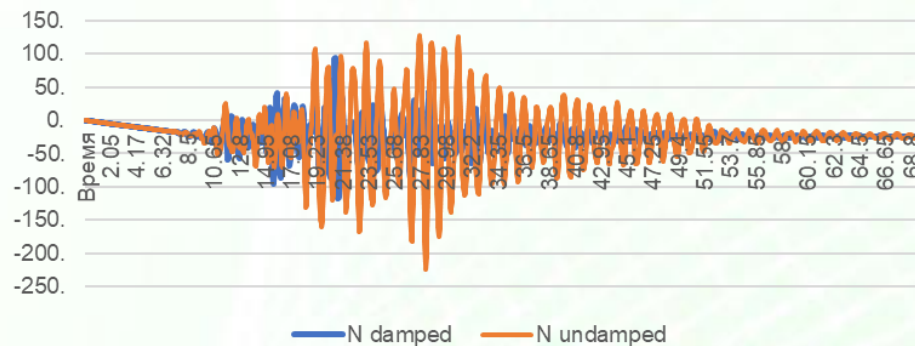


МОДЕЛЬ ЗДАНИЯ, ОСНАЩЁННОГО СТЕНОВЫМИ ДЕМПФЕРАМИ. СЛЕВА ИЗОБРАЖЕНЫ ДЕМПФЕРЫ, УСТАНОВЛИВАЕМЫЕ В ПРОДОЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ. СПРАВА ИЗОБРАЖЕНЫ ДЕМПФЕРЫ, УСТАНОВЛИВАЕМЫЕ В ПОПЕРЕЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ

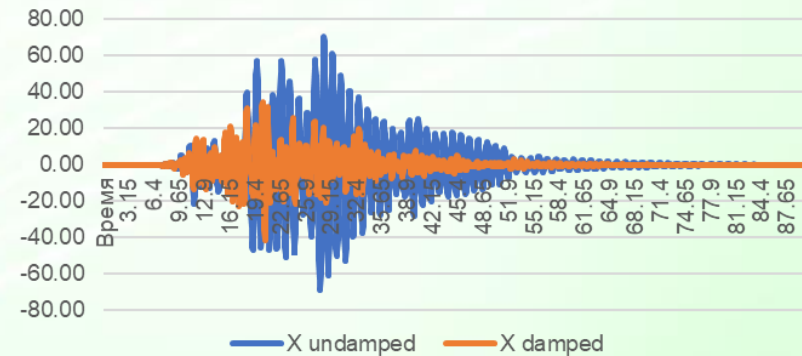
Таблица 2. Сравнение усилий и перемещений

Исследуемый параметр		Без демпферов	Со стеновыми демпферами
Двухветвевая колонна в осях б/А в уровне фундамента	$N_{min}$ , т	-224	-120
Двухветвевая колонна в осях б/Д в уровне фундамента	$N_{min}$ , т	-179	-103
Нижняя панель фермы в осях 5-6/А	$N_{min}$ , т	18.2	9.2
Относительные перемещения верха здания вдоль оси X	$D_{max}$ , мм	70	34
Относительные перемещения верха здания вдоль оси Y	$D_{max}$ , мм	41	29

Усилие в колонне, в Т



Относительные перемещения по X, мм



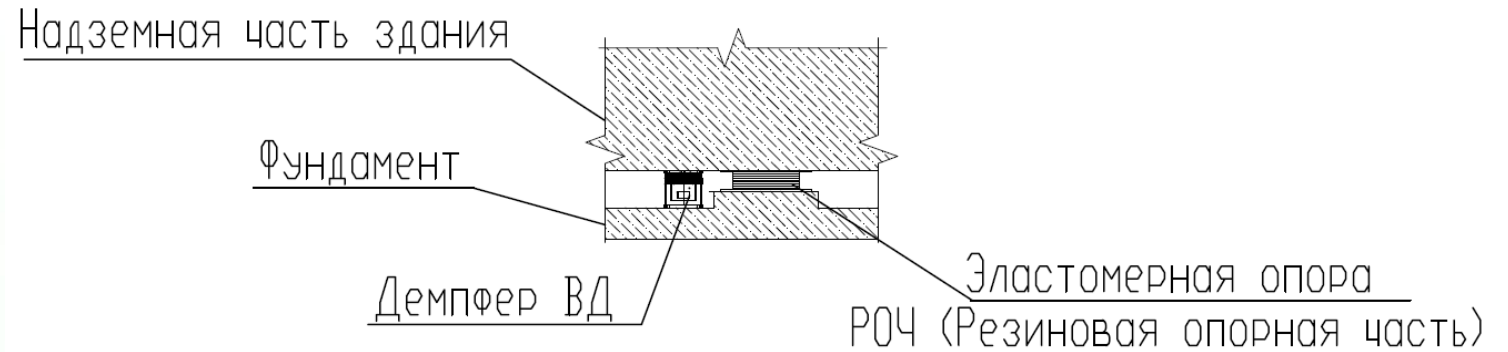
# ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИС



**ЭЛАСТОМЕРНАЯ ОПОРА**



**ДЕМПФЕР ООО «ЦВС» В СОЧЕТАНИИ С  
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИМИ ДЕМПФЕРАМИ ДЛЯ ОПОРЫ МОСТА**



**ДЕМПФЕР ООО «ЦВС» В СОЧЕТАНИИ С  
ЭЛАСТОМЕРНОЙ ОПОРОЙ**

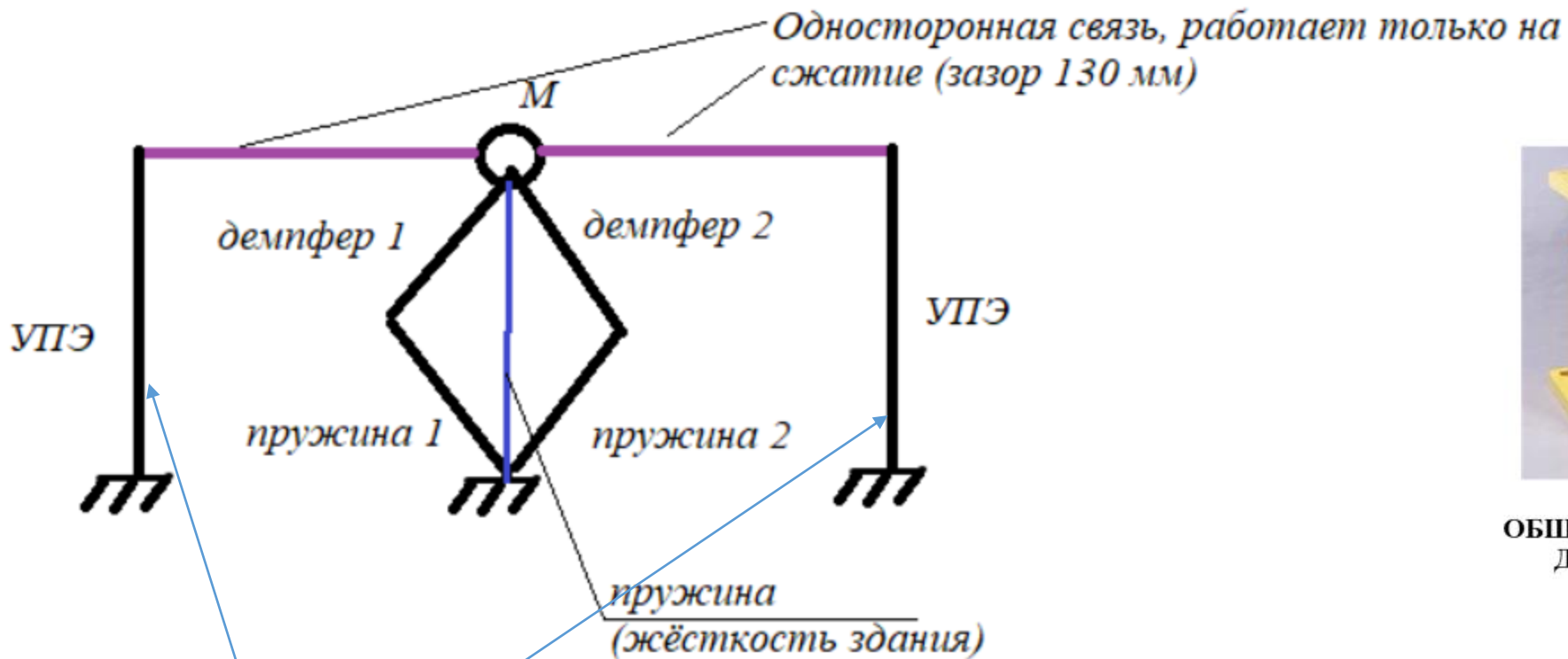


**ДЕМПФЕР ООО «ЦВС» В СОЧЕТАНИИ С ПРУЖИНЫМИ БЛОКАМИ**

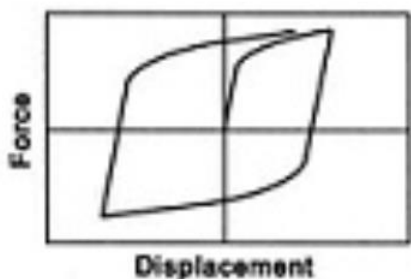


**ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»**

# УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ ОГРАНИЧИТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В СЛУЧАЕ ДЕЙСТВИЯ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ



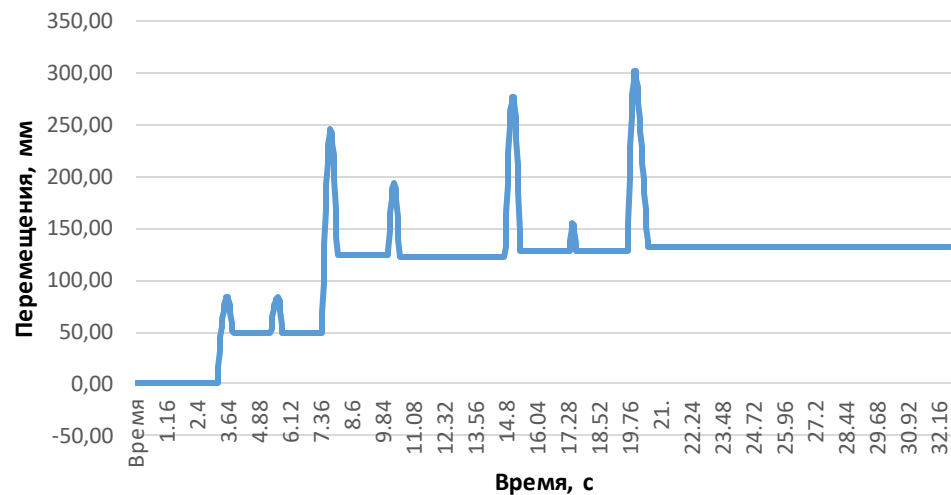
ОБЩИЙ ВИД ВЫСОКОВЯЗКОГО ДЕМПФЕРА ВД-630/426-15



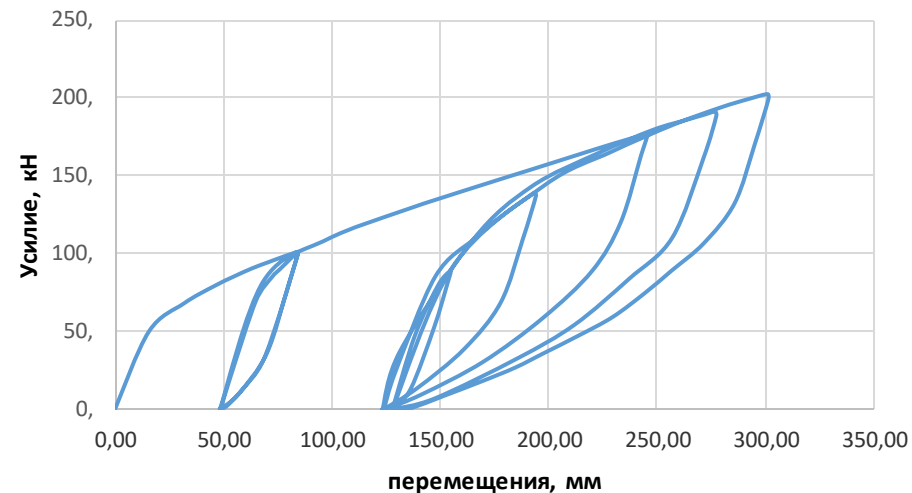


# РЕЗУЛЬТАТЫ УЧЁТА В МОДЕЛИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ

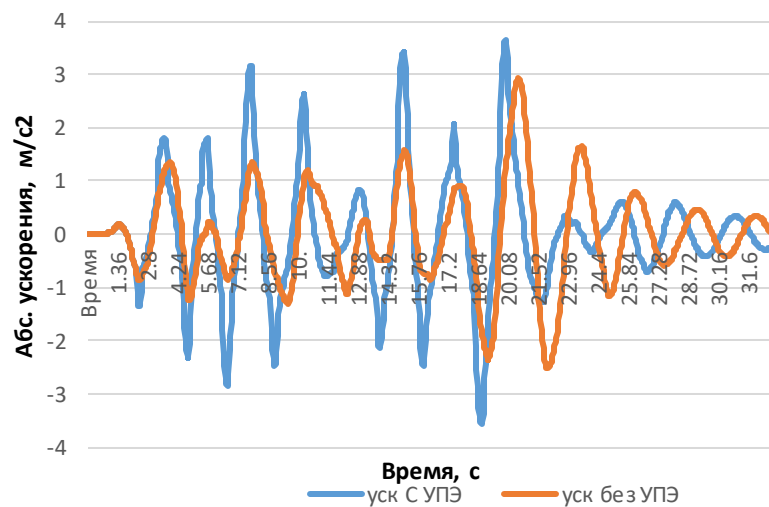
## Деформации УПЭ



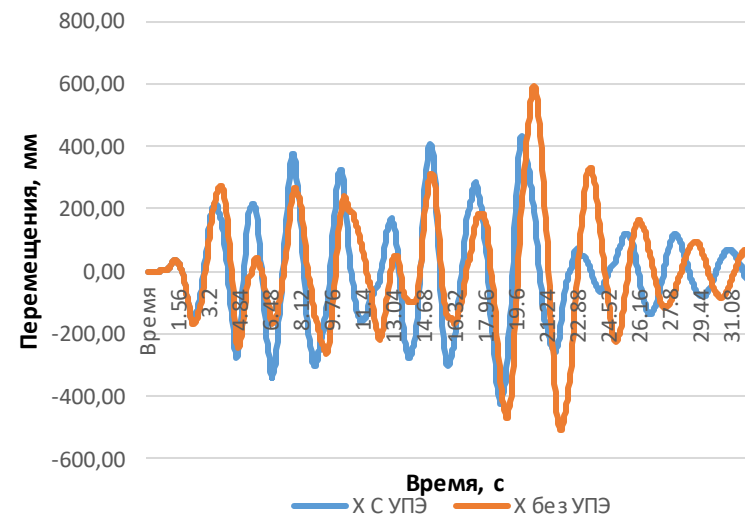
## Силовая диаграмма УПЭ



## Абс. ускорения



## Перемещения СИС



## Заключение

- Инновационное техническое решение TMD ЦВС позволяет значительно снизить поэтажные ускорения здания при землетрясении. Для средних этажей снижение достигает 50%, для верхних этажей здания TMD ЦВС снижает ускорения на 30% по отношению к зданию без гасителя;
- Использование аналитических моделей позволило значительно ускорить время расчёта по сравнению с пространственными КЭ моделями, а также позволило в короткое время определить оптимальные параметры TMD;
- Относительные смещения плиты покрытия технического этажа (TMD), расположенного на пружинных опорах, не превышают **50 мм**, что меньше конструктивного зазора в **100 мм**;
- Данное техническое решение позволяет снизить внутренние усилия в конструкциях здания до 30-40%;
- При расчёте на землетрясение интенсивностью 9 баллов установка стеновых демпферов “WD CVS” позволяет снизить перемещения здания и внутренние усилия в элементах здания в 2 раза.
- Учёт упругопластических ограничителей в виде стенок демпфера в случае запроектных землетрясений позволяет снизить общие перемещения сейсмоизолированной системы на 35%, что влечёт за собой незначительное увеличение абсолютных ускорений сейсмоизолированного здания на 16%.



**Спасибо за внимание!**



**ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»**